



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**EFFECTO DEL INTEMPERISMO SOBRE LAS  
PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS, EL DESEMPEÑO Y LA  
DURABILIDAD DE SUELOS VIALES ADITIVADOS CON  
ESTABILIZANTES QUÍMICOS**

Autor

Eliana Patricia Llano Cardona

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

2021



**EFFECTO DEL INTEMPERISMO SOBRE LAS PROPIEDADES  
FISICOQUÍMICAS, EL DESEMPEÑO Y LA DURABILIDAD DE  
SUELOS VIALES ADITIVADOS CON ESTABILIZANTES  
QUÍMICOS**

**Eliana Patricia Llano Cardona**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

**Doctora en Ingeniería de Materiales**

Asesora:

Prof. Gloria Restrepo

Línea de Investigación:

Desarrollo de Nuevos Materiales

Grupo de Investigación:

Procesos Físicoquímicos Aplicados

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

2021

*A mi amada Ana Esperanza, por ser la manifestación más clara de  
Dios en mi vida*

---

## AGRADECIMIENTOS

---

Primero que todo le doy infinitas gracias a la profesora Gloria Restrepo, Directora del Grupo de Procesos Físicoquímicos Aplicados, por creer en mí, en mis capacidades y apoyarme constantemente; porque indudablemente sin su apoyo nada de esto hubiese sido posible

Al Grupo Procesos Físicoquímicos Aplicados por los innumerables recursos puestos al servicio del desarrollo de este trabajo.

A todos mis compañeros del grupo, que me apoyaron y contribuyeron con el desarrollo experimental de ese trabajo, especialmente a Ana, Andy, Diana, Daniel, Diva, Yonny y Dairo.

Deseo también expresar mis agradecimientos al Instituto Mexicano del transporte por permitirme un espacio para realizar mi pasantía, especialmente al Dr Paul Garnica, Dra. Natalia Pérez e ing. David Leiva por sus enseñanzas y contribución con este trabajo.

Al laboratorio de suelos y concretos de la facultad de ingeniería de la Universidad de Antioquia y a Robert por su disposición para ayudarme con los ensayos.

Y por último y no menos importantes quiero agradecer a mis padres: Humberto y Consuelo, a mi hermano Carlos Andrés y a mi hermoso Mauricio por ser siempre mi fuente inagotable de amor.

---

# INDICE GENERAL

---

RESUMEN.....	17
OBJETIVOS.....	21
<b>1. CAPÍTULO I: suelos, intemperismo y estabilización .....</b>	<b>22</b>
1.1. Introducción .....	22
1.2. Suelos .....	25
1.3. Suelos expansivos.....	31
1.4. Estabilización de suelos.....	33
1.5. Intemperismo natural y acelerado .....	65
<b>2. CAPÍTULO II: desarrollo experimental.....</b>	<b>69</b>
2.1. Introducción.....	69
2.2. Materiales .....	71
2.3. Equipos y montajes diseñados y fabricados para el desarrollo experimental.....	74
2.4. Caracterización fisicoquímica y mecánica del suelo .....	78
2.5. Caracterización fisicoquímica de los aditivos .....	83
2.6. Evaluación inicial del desempeño de los sistemas mixtos de suelo con los aditivos químicos.....	83
2.7. Evaluación ambiental de los sistemas de suelo con los aditivos químicos.....	85
2.8. Preparación de los especímenes para pruebas de intemperismo.....	85
2.9. Diseño de experimentos pruebas de intemperismo .....	90
2.10. Prueba complementaria. Construcción de tramos piloto.....	96
2.11. Diagrama resumen metodológico.....	97
<b>3. CAPÍTULO III: resultados y análisis.....</b>	<b>98</b>
3.1. Introducción .....	98
3.2. Caracterización fisicoquímica y mecánica del suelo .....	99
3.3. Caracterización fisicoquímica de los aditivos .....	114
3.4. Evaluación inicial del desempeño de los sistemas mixtos de suelo con los aditivos químicos .....	116
3.5. Evaluación ambiental de los sistemas mixtos de de suelo con los aditivos químicos.....	141

3.6. Pruebas de intemperismo.....	147
<b>4. CAPÍTULO IV: prueba complementaria. Construcción de tramos piloto .....</b>	<b>174</b>
4.1. Introducción.....	174
4.2 Desarrollo metodológico .....	175
4.3 Resultados .....	182
4.4. Conclusiones .....	204
<b>5. CAPÍTULO V: conclusiones generales, productos, recomendaciones y perspectivas .....</b>	<b>206</b>
5.1. Objetivos alcanzados .....	206
5.2. Conclusiones generales .....	207
5.3. Productos de investigación.....	212
5.4. Recomendaciones y trabajos futuros .....	214
5.5. Perspectivas.....	215
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>216</b>

---

## INDICE DE TABLAS

---

### CAPÍTULO I: suelos, intemperismo y estabilización

<b>Tabla 1.1.</b> Resultados de producción científica de los temas de estudio .....	25
<b>Tabla 1.2.</b> Sistema unificado de clasificación (Braja M Das, 2013). Adaptado y traducido .....	28
<b>Tabla 1.3.</b> Clasificación de materiales de carreteras subrasante (Braja M Das, 2013) ....	30
<b>Tabla 1.4</b> Propiedades representativas obtenidas con la estabilización de suelos usando cemento y cal (Bielza Feliú, 1999) .....	41
<b>Tabla 1.5.</b> Estado del arte sobre uso de estabilizantes tradicionales: cal y cemento .....	41
<b>Tabla 1.6.</b> Estado del arte sobre uso de estabilizantes no tradicionales: aceites sulfonados .....	50
<b>Tabla 1.7.</b> Estado del arte sobre uso de estabilizantes no tradicionales: enzimas .....	53
<b>Tabla 1.8.</b> Estado del arte sobre uso de estabilizantes no tradicionales: polímeros y resinas .....	57
<b>Tabla 1.9.</b> Estado del arte sobre uso de estabilizantes no tradicionales: organosilanos	64

### CAPÍTULO II: desarrollo experimental

<b>Tabla 2.1.</b> Propiedades fisicoquímicas del producto polimérico. <i>Fuente:</i> ficha de datos de seguridad del producto comercial .....	72
<b>Tabla 2.2.</b> Propiedades fisicoquímicas del aceite sulfonado. <i>Fuente:</i> ficha de datos de seguridad del producto comercial .....	72
<b>Tabla 2.3.</b> Propiedades fisicoquímicas del organosilano. <i>Fuente:</i> ficha de datos de seguridad del producto comercial .....	73
<b>Tabla 2.4.</b> Propiedades fisicoquímicas del producto enzimático. <i>Fuente:</i> ficha de datos de seguridad del producto comercial .....	73
<b>Tabla 2.5.</b> Propiedades fisicoquímicas del producto puzolánico. <i>Fuente:</i> ficha de datos de seguridad del producto comercial .....	73
<b>Tabla 2.6.</b> Propiedades fisicoquímicas de la cal. <i>Fuente:</i> ficha de datos de seguridad del producto comercial .....	74
<b>Tabla 2.7.</b> Propiedades fisicoquímicas del cemento Portland. <i>Fuente:</i> ficha de datos de seguridad del producto comercial .....	74
<b>Tabla 2.8.</b> Dosificaciones establecidas para evaluación de estabilizantes.....	86
<b>Tabla 2.9.</b> Desglose de las unidades experimentales sometidas a intemperismo acelerado .....	91
<b>Tabla 2.10.</b> Desglose de las unidades experimentales sometidas a intemperismo natural y condiciones resguardadas.....	92
<b>Tabla 2.11.</b> Identificación factores de control del diseño de experimentos .....	93

<b>Tabla 2.12.</b> Identificación de las variables de entrada del diseño de experimentos.....	94
<b>Tabla 2.13.</b> Identificación de los factores de ruido del diseño de experimentos.....	95
<b>Tabla 2.14.</b> Identificación de las variables de respuesta del diseño de experimentos ...	95

### **CAPÍTULO III: resultados y análisis**

<b>Tabla 3.1.</b> Perfil estratigráfico del suelo objeto de estudio.....	99
<b>Tabla 3.2.</b> Clasificación del suelo de acuerdo con los sistemas AASTHO y USCS.....	101
<b>Tabla 3.3.</b> Clasificación de fracciones del suelo según la distribución de tamaños de partícula.....	103
<b>Tabla 3.4.</b> Criterios de clasificación de la fracción fina de suelos .....	105
<b>Tabla 3.5.</b> Caracterización fisicoquímica del suelo estudiado.....	107
<b>Tabla 3.6.</b> Resultados de la caracterización mecánica del suelo natural.....	107
<b>Tabla 3.7.</b> Resultados análisis XRF del suelo .....	108
<b>Tabla 3.8.</b> Resultados análisis DRX del suelo estudiado .....	110
<b>Tabla 3.9.</b> Resultados de caracterización fisicoquímica de los aditivos evaluados .....	114
<b>Tabla 3.10.</b> Resultados análisis XRF del producto puzolánico.....	115
<b>Tabla 3.11.</b> Resultados óptimos obtenidos de las curvas de compactación.....	118
<b>Tabla 3.12.</b> Resultados ensayos CBR.....	120
<b>Tabla 3.13.</b> Resultados ensayos de corte directo para los sistemas de suelo aditivado.....	125
<b>Tabla 3.14.</b> Resultados de límites de Atterberg e índice de plasticidad para los sistemas de suelo aditivado .....	126
<b>Tabla 3.15.</b> Resultados de pH, conductividad y CIC para los sistemas de suelo aditivado .....	129
<b>Tabla 3.16.</b> Resultados del coeficiente de conductividad hidráulica de los materiales evaluados.....	129
<b>Tabla 3.17.</b> Resultados de la caracterización textural para los sistemas de suelo aditivado .....	134
<b>Tabla 3.18.</b> Resultados análisis EDS sobre la superficie de los materiales evaluados..	138
<b>Tabla 3.19.</b> Resultados de pH y COT para lixiviados de los sistemas de suelo aditivado .....	142
<b>Tabla 3.20.</b> Resultados de DBO5, DQO y biodegradabilidad para lixiviados de los sistemas de suelo aditivado .....	143
<b>Tabla 3.21.</b> Resultados del análisis de tamaño de partícula para el para el material particulado desprendido de los sistemas de suelo aditivado .....	146
<b>Tabla 3.22.</b> Resultados test de Levene para los conjuntos de datos de las variables de respuesta según el factor intemperismo .....	153
<b>Tabla 3.23.</b> Resultados pruebas de hipótesis no paramétricas para evaluar el efecto del intemperismo .....	153
<b>Tabla 3.24.</b> Resultados test de Levene para los conjuntos de datos de las variables de respuesta según el sistema aditivado .....	154

<b>Tabla 3.25.</b> Resultados pruebas de hipótesis no paramétricas para evaluar el efecto de los aditivos evaluados respecto al suelo natural.....	155
<b>Tabla 3.26.</b> Resultados coeficiente de correlación de Spearman * .....	158
<b>Tabla 3.27.</b> Factores de aceleración calculados con datos experimentales para cada material evaluado.....	160
<b>Tabla 3.28.</b> Resultados ensayo de corte directo para muestras en condiciones resguardadas.....	162
<b>Tabla 3.29.</b> Resultados ensayo de corte directo para muestras sometidas a intemperismo natural.....	163
<b>Tabla 3.30.</b> Resultados ensayo de corte directo para muestras sometidas a intemperismo acelerado.....	163
<b>Tabla 3.31.</b> Resultados de CIC para los materiales expuestos a intemperismo acelerado .....	165
<b>Tabla 3.32.</b> Resultados de la caracterización textural para los sistemas de suelo aditivado después de 540h de intemperismo acelerado.....	166
<b>Tabla 3.33.</b> Resultados análisis EDS sobre la superficie de los materiales evaluados sometidos a 540 h de intemperismo acelerado .....	169
<b>Tabla 3.34.</b> Resultados de pH del lixiviado de los materiales expuestos intemperismo acelerado.....	170
<b>Tabla 3.35.</b> Resultados de COT del lixiviado de los materiales expuestos intemperismo acelerado.....	171
<b>Tabla 3.36.</b> Resultados de biodegradabilidad del lixiviado de los materiales expuestos intemperismo acelerado .....	172

#### **CAPÍTULO IV: prueba complementaria. Construcción de tramos piloto**

<b>Tabla 4.1.</b> Dosificaciones establecidas para la evaluación de los productos en laboratorio .....	179
<b>Tabla 4.2.</b> Perfil estratigráfico de los suelos presentes en los apiques realizados en el tramo donde se aplicó la Zeolita/Cemento.....	182
<b>Tabla 4.3.</b> Perfil estratigráfico de los suelos presentes en los apiques realizados en el tramo donde se aplicó la Enzima .....	183
<b>Tabla 4.4.</b> Resultados de los análisis de suelos presentes en un rango entre 0 y 40 cm de profundidad en los apiques correspondientes al tramo seleccionado para aplicar la Zeolita/Cemento .....	185
<b>Tabla 4.5.</b> Resultados de los análisis de suelos presentes en un rango entre 0 y 40 cm de profundidad en los apiques correspondientes al tramo seleccionado para aplicar la Enzima .....	186
<b>Tabla 4.6.</b> Resultados análisis de laboratorio suelo homogéneo.....	187
<b>Tabla 4.7.</b> Resultados curvas de compactación sistemas aditivados.....	189

<b>Tabla 4.8.</b> Resultados de la evaluación fisicoquímica y mecánica del sistema mixta Suelo-Zeolita/Cemento .....	190
<b>Tabla 4.9.</b> Resultados de la evaluación fisicoquímica y mecánica del sistema mixto Suelo-Enzima .....	191
<b>Tabla 4.10.</b> Resultados de densidad en campo por el método de cono de arena antes y después de intervención en el tramo correspondiente a la Zeolita/Cemento.....	192
<b>Tabla 4.11.</b> Resultados de módulo obtenido con LWD antes y después de intervención con la Zeolita/Cemento.....	192
<b>Tabla 4.12.</b> Índice de condición de la vía URCI reportado antes y después de intervención con la Zeolita/Cemento.....	193
<b>Tabla 4.13.</b> Resultados de densidad en campo por el método de cono de arena antes y después de intervención en el tramo correspondiente a la Enzima.....	195
<b>Tabla 4.14.</b> Resultados de módulo obtenido con LWD antes y después de intervención con la Enzima.....	195
<b>Tabla 4.15.</b> Índice de condición de la vía URCI reportado antes y después de intervención con la Enzima.....	197

---

## INDICE DE FIGURAS

---

### CAPÍTULO I: suelos, intemperismo y estabilización

<b>Figura 1.1.</b> Resultados por año de producción científica de los temas de estudio .....	25
<b>Figura 1.2.</b> Componentes de un suelo (Besoain, 1985).....	27
<b>Figura 1.3.</b> Gráfica de plasticidad (Braja M Das, 2013) .....	29
<b>Figura 1.4.</b> Esquema de las unidades básicas y láminas constituyentes de las arcillas..	31
<b>Figura 1.5.</b> Desequilibrio eléctrico por cargas de aristas arcillosas .....	32
<b>Figura 1.6.</b> Aplicabilidad de las técnicas de mejoramiento de suelos en función del tamaño de partícula (Mitchell, 1981).....	34
<b>Figura 1.7.</b> Síntesis esquemática de las reacciones puzolánicas .....	39
<b>Figura 1.8.</b> Determinación del tipo de estabilizador apropiado basado en el contenido de partículas que pasan la malla No. 200 y el índice de plasticidad del suelo (Currin et al., 1976) .....	40
<b>Figura 1.9</b> Proceso de fijación del silano sobre la superficie mineral (Colmenares Roldán, 2015) .....	63
<b>Figura 1.10.</b> Cámara de envejecimiento acelerado .....	65

### CAPÍTULO II: desarrollo experimental

<b>Figura 2.1.</b> Fotografías del corredor vial seleccionado para el estudio .....	71
<b>Figura 2.2.</b> Fotografías de la toma de suelo, preparación y secado en laboratorio.....	71
<b>Figura 2.3.</b> Molde y martillo para compactación de probetas cilíndricas de 5 cm x 10 cm. Acotaciones de la figura en mm (sin escala) .....	75
<b>Figura 2.4.</b> Molde y gato hidráulico para compactación de probetas rectangulares.....	75
<b>Figura 2.5.</b> Porta muestras para exposición de probetas cilíndricas en cámara intemperismo acelerado .....	76
<b>Figura 2.6.</b> Porta muestras para exposición de probetas rectangulares en cámara intemperismo acelerado .....	76
<b>Figura 2.7.</b> Montaje para exposición de probetas a intemperismo natural.....	77
<b>Figura 2.8.</b> Cámara de lixiviación para pruebas ambientales de los suelos estabilizados .....	77
<b>Figura 2.9.</b> Cepillo de desgaste para pruebas de material particulado de las muestras de suelo .....	78
<b>Figura 2.10.</b> Preparación de las mezclas.....	87
<b>Figura 2.11.</b> Compactación de probetas cilíndricas.....	88
<b>Figura 2.12.</b> Compactación probetas rectangulares.....	89
<b>Figura 2.13.</b> Proceso de curado de probetas moldeadas.....	89
<b>Figura 2.14.</b> Probetas sometidas a las diferentes condiciones de intemperismo .....	90

<b>Figura 2.15.</b> Esquema de diseño de experimentos intemperismo acelerado.....	91
<b>Figura 2.16.</b> Esquema de diseño de experimentos intemperismo natural y condiciones resguardadas.....	92
<b>Figura 2.17.</b> Diagrama resumen metodológico.....	97

### **CAPÍTULO III: resultados y análisis**

<b>Figura 3.1.</b> Rango del límite líquido y del índice de plasticidad según el sistema de clasificación AASTHO (Braja M Das, 2013).....	101
<b>Figura 3.2.</b> Carta de plasticidad sistema USCS (Braja M Das, 2013).....	102
<b>Figura 3.3.</b> Curva granulométrica del suelo estudiado.....	102
<b>Figura 3.4.</b> Análisis de distribución de tamaño de partícula de la fracción fina del suelo estudiado obtenido por difracción láser .....	104
<b>Figura 3.5.</b> Curva granulométrica fracción fina obtenida por difracción láser .....	104
<b>Figura 3.6.</b> Resultados de densidad para diferentes fracciones del suelo.....	105
<b>Figura 3.7.</b> Difractograma de rayos X del suelo, con identificación de fases obtenido mediante refinado por el método Rietveld.....	109
<b>Figura 3.8.</b> (a) Grafica obtenida por TGA de la muestra de suelo. (b) Resultados cuantitativos de TGA de la muestra de suelo .....	111
<b>Figura 3.9.</b> (a) Grafica obtenida por DTA de la muestra de suelo. (b) Resultados de DTA de la muestra de suelo y compuestos asociados.....	112
<b>Figura 3.10.</b> Espectro FTIR del suelo estudiado.....	113
<b>Figura 3.11.</b> Resumen de los resultados de clasificación y caracterización del suelo en laboratorio .....	114
<b>Figura 3.12.</b> Difractograma de rayos X con identificación de fases del producto puzolánico .....	115
<b>Figura 3.13.</b> Resumen de los resultados de caracterización fisicoquímica de los aditivos evaluados.....	116
<b>Figura 3.14.</b> Curvas de compactación para sistemas de suelo con aditivos líquidos ...	118
<b>Figura 3.15.</b> Curvas de compactación para sistemas de suelo con aditivos sólidos .....	118
<b>Figura 3.16.</b> Curvas de Penetración para sistemas de suelo con aditivos líquidos.....	119
<b>Figura 3.17.</b> Curvas de Penetración para sistemas de suelo con aditivos sólidos.....	120
<b>Figura 3.18.</b> Resultados de resistencia a la compresión no confinada para los sistemas de suelo aditivado .....	121
<b>Figura 3.19.</b> Definición del módulo de rigidez E50. (Brinkgereve, 2004).....	121
<b>Figura 3.20</b> Resultados de módulo elástico E50 para los sistemas de suelo aditivado	122
<b>Figura 3.21.</b> Curvas de esfuerzo deformación del sistema mixto Suelo-Cal a 0 y 7 días de curado .....	122
<b>Figura 3.22.</b> Resultados de los cálculos de capacidad de carga considerando suelos cohesivos para los sistemas de suelo aditivado .....	124

<b>Figura 3.23.</b> Resultados del ensayo de velocidad de ascenso capilar para los sistemas de suelo aditivado .....	127
<b>Figura 3.24.</b> Espectros FTIR del sistema mixto suelo-aceite sulfonado .....	130
<b>Figura 3.25.</b> Espectros FTIR del sistema mixto suelo-polímero.....	131
<b>Figura 3.26.</b> Espectros FTIR del sistema mixto suelo-enzima.....	132
<b>Figura 3.27.</b> Espectros FTIR del sistema mixto suelo-organosilano.....	133
<b>Figura 3.28.</b> Espectros FTIR del sistema mixto suelo-zeolita/cemento.....	134
<b>Figura 3.29.</b> Difractograma de rayos X para sistemas mixtos suelo-aditivos líquidos. 135	
<b>Figura 3.30.</b> Difractogramas de rayos X para sistemas mixtos suelo-aditivos líquidos. (a) Suelo- aceite sulfonado, (b) Suelo-polímero, (c) Suelo-enzima, (d) suelo-organosilano. ....	136
<b>Figura 3.31.</b> Difractograma de rayos X para sistemas mixtos suelo-aditivos sólidos... 137	
<b>Figura 3.32.</b> Difractogramas de rayos X para sistemas mixtos suelo-aditivos sólidos. (a) Suelo- cal, (b) Suelo-cemento, (c) Suelo-zeolita/cemento.....	137
<b>Figura 3.33.</b> Imágenes SEM obtenidas para los sistemas mixtos de suelo aditivado. 1: suelo natural, 2: suelo-aceite sulfonado, 3: suelo-polímero, 4: Suelo-enzima, 5: suelo-organosilano, 6: suelo-cal, 7: suelo-cemento, 8: suelo-zeolita/cemento .....	140
<b>Figura 3.34.</b> Resumen de los resultados obtenidos en la evaluación inicial del desempeño de los sistemas mixtos de suelo con los aditivos químicos .....	141
<b>Figura 3.35.</b> Resultados de las pruebas de desgaste para los sistemas de suelo aditivado .....	144
<b>Figura 3.36.</b> Resultados de composición química para el material particulado desprendido de los sistemas de suelo aditivado. ....	145
<b>Figura 3.37.</b> Resumen de los resultados obtenidos en la evaluación ambiental de los sistemas mixtos de suelo con los aditivos químicos.....	146
<b>Figura 3.38.</b> Degradación de color con la exposición a intemperismo .....	148
<b>Figura 3.39.</b> Falla frágil presentada en todas las probetas ensayadas a compresión simple, independiente del tiempo y el aditivo.....	150
<b>Figura 3.40.</b> Resultados obtenidos en las variables de respuesta de materiales expuesto a condiciones resguardadas y de intemperismo natural .....	152
<b>Figura 3.41.</b> Resultados obtenidos en las variables de respuesta de los materiales expuestos a condiciones de intemperismo acelerado .....	157
<b>Figura 3.42.</b> Resultados obtenidos de la capacidad carga de los materiales expuestos a condiciones de intemperismo acelerado.....	161
<b>Figura 3.43.</b> Resumen de los análisis realizados para las diferentes condiciones de intemperismo evaluadas .....	161
<b>Figura 3.44.</b> Espectros FTIR obtenidos para los sistemas mixtos de suelo aditivado sometidos a intemperismo acelerado (a) y natural (b). (1): suelo natural, (2): suelo-aceite sulfonado, (3): suelo-polímero, (4): Suelo-enzima, (5): suelo-organosilano.....	164

<b>Figura 3.45.</b> Imágenes SEM obtenidas para los sistemas de suelo aditivado sometidos a 540 h de intemperismo acelerado. 1: suelo natural, 2: suelo-aceite sulfonado, 3: suelo-polímero, 4: Suelo-enzima, 5: suelo-organosilano, 6: suelo-cal, 7: suelo-cemento, 8: suelo-zeolita/cemento.....	168
<b>Figura 3.46.</b> Resumen de los resultados obtenidos en la caracterización de los materiales expuestos a condiciones de intemperismo .....	173

#### **CAPÍTULO IV: prueba complementaria. Construcción de tramos piloto**

<b>Figura 4.1.</b> Ubicación municipio de Valencia y tramos intervenidos con los productos estabilizantes (fuente Google Earth).....	176
<b>Figura 4.2.</b> Estado inicial del corredor vial Valencia-Villanueva .....	177
<b>Figura 4.3.</b> Esquema toma de muestras: Arreglo Triangular —apiques cada 250 m—. Etapa Exploratoria.....	177
<b>Figura 4.4.</b> Esquema para la elaboración de probetas aditivadas y del blanco del proceso .....	179
<b>Figura 4.5.</b> Registro fotográfico del tramo asignado al producto puzolánico Zeolita/Cemento antes de intervención .....	194
<b>Figura 4.6.</b> Registro fotográfico del tramo asignado al producto puzolánico Zeolita/Cemento después de intervención .....	194
<b>Figura 4.7.</b> Registro fotográfico del tramo asignado a la Enzima antes de intervención .....	197
<b>Figura 4.8.</b> Registro fotográfico del tramo asignado a la Enzima después de intervención .....	197
<b>Figura 4.9.</b> Resultados de densidad en campo por el método de cono de arena durante la etapa de seguimiento en el tramo tratado con el producto puzolánico Zeolita/Cemento .....	199
<b>Figura 4.10.</b> Resultados de módulo obtenido con LWD durante la etapa de seguimiento en el tramo tratado con el producto puzolánico Zeolita/Cemento .....	200
<b>Figura 4.11.</b> Resultados del índice de condición de la vía URCI durante la etapa de seguimiento en el tramo tratado con el producto puzolánico Zeolita/Cemento.....	200
<b>Figura 4.12.</b> Registro fotográfico durante la etapa de seguimiento en el tramo tratado con el producto puzolánico Zeolita/Cemento .....	201
<b>Figura 4.13.</b> Resultados de densidad en campo por el método de cono de arena durante la etapa de seguimiento en el tramo tratado con Enzima.....	202
<b>Figura 4.14.</b> Resultados de módulo obtenido con LWD durante la etapa de seguimiento en el tramo tratado con Enzima .....	202
<b>Figura 4.15.</b> Resultados del índice de condición de la vía URCI durante la etapa de seguimiento en el tramo tratado con Enzima.....	203
<b>Figura 4.16.</b> Registro fotográfico durante la etapa de seguimiento en el tramo correspondiente al producto enzimático .....	204

---

## LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

---

<b>Símbolo</b>	<b>Término</b>
<b>IP</b>	Índice de plasticidad
<b>LL</b>	Límite Líquido
<b>LP</b>	Límite Plástico
<b>DRX</b>	Difracción de rayos X
<b>XRF</b>	Fluorescencia de rayos X
<b>FTIR/ATR</b>	Espectrometría Infrarroja por Transformada de Fourier y Reflectancia Total Atenuada
<b>SEM</b>	Microscopía Electrónica de Barrido
<b>TGA/DTA</b>	Análisis Termogravimétrico y Térmico Diferencial
<b>ATP</b>	Análisis de Tamaño de Partícula
<b>DBO</b>	Demanda Biológica de Oxígeno
<b>DQO</b>	Demanda Química de Oxígeno
<b>COT</b>	Carbono Orgánico Total
<b>CBR</b>	California Bearing Ratio
<b>CIC</b>	Capacidad de intercambio catiónico
<b>URCI</b>	Índice de condición para vías no pavimentadas
<b>LWD</b>	Deflectómetro de Peso Liviano
<b>%T</b>	Porcentaje de transmitancia
<b>D<sub>10</sub></b>	Diámetro correspondiente al 10% más fino en la curva de distribución de tamaño de partícula
<b>D<sub>40</sub></b>	Diámetro correspondiente al 40% más fino en la curva de distribución de tamaño de partícula
<b>D<sub>50</sub></b>	Diámetro correspondiente al 50% más fino en la curva de distribución de tamaño de partícula

<b>D<sub>90</sub></b>	Diámetro correspondiente al 90% más fino en la curva de distribución de tamaño de partícula
<b>C<sub>u</sub></b>	Coefficiente de uniformidad $C_u = D_{60}/D_{10}$
<b>C<sub>c</sub></b>	Coefficiente de gradación $C_c = (D_{30})^2 / (D_{60} \times D_{10})$
<b>m<sup>3</sup>ssc</b>	Metro cúbico de suelo seco compacto a la densidad máxima
<b>φ</b>	Ángulo de fricción interna
<b>γ</b>	Peso unitario del suelo
<b>k</b>	Coefficiente de conductividad hidráulica.
<b>FA<sub>exp</sub></b>	Factor de aceleración que relaciona el intemperismo acelerado con el intemperismo natural
<b>I+D+i</b>	Investigación, Desarrollo e Innovación

## RESUMEN

El desarrollo de un país está asociado al estado de su infraestructura vial, factor potencializador de la conectividad nacional y regional, y diferenciador de la competitividad en bienes y servicios de los distintos sectores que integran su dinámica socio-económica, toda vez que es considerada como un componente del desarrollo y la integración interregional.

La construcción de infraestructura vial, como gran consumidor de materiales, ha explotado un sin fin de recursos naturales para responder a los estándares requeridos en los distintos procesos constructivos, tanto desde el diseño estructural como el de los mismos materiales, los cuales dan forma, soporte, resistencia al deterioro y debe garantizar durabilidad y una apropiada respuesta mecánica. Una de las limitaciones que enfrenta el desarrollo de la infraestructura vial es el constante deterioro de los recursos naturales que son la principal fuente de materiales; su explotación y uso irracional han provocado su agotamiento progresivo y legislaciones más estrictas tendientes a proteger y mantener estos recursos.

Ante la escasez de materiales y recursos para satisfacer las necesidades asociadas al desarrollo de la infraestructura vial de las sociedades modernas, han surgido variadas opciones que buscan aminorar costos e impactos, entre ellas se encuentra la estabilización química como una alternativa de solución para transformar los materiales existentes en cada región a través de procesos fisicoquímicos que mejoren sus propiedades de resistencia y durabilidad, aportando así a metodologías y procesos que pueden resultar más eficientes, económicas, amigables y sostenibles con el ambiente.

El creciente auge e interés por la estabilización química de suelos viales en los últimos años, se ha evidenciado en una proliferación de productos químicos comerciales que pretenden brindar soluciones duraderas de estabilización para todo tipo de suelos, sin embargo los estudios de desempeño y durabilidad de estos productos son limitados. Por tanto se hace necesario profundizar en el conocimiento de los fenómenos tanto físicos como químicos presentes en los procesos de estabilización, así como la correlación que existe entre esta fenomenología y la durabilidad que pueden presentar tanto los productos estabilizantes como los sistemas aditivados. Los aditivos químicos que vienen siendo empleados para el mejoramiento de suelos pueden clasificarse, según su naturaleza química, en: polímeros, aceites sulfonados, silanos, puzolanas y enzimas. Estas alternativas para el mejoramiento de suelos han sido usualmente orientadas a caminos sin pavimentar de mediano y bajo volumen de tránsito, donde el desgaste y la durabilidad de los materiales es debido principalmente a factores climáticos y de intemperismo natural.

El intemperismo deteriora los materiales expuestos al exterior produciendo cambios de color, superficies más rugosas, fisuramiento, agrietamiento, pérdida de cohesión y fragmentación, lo que finalmente se traduce en una pérdida de resistencia, efectividad y funcionalidad de estos materiales. El intemperismo acelerado es una metodología que permite evaluar en periodos cortos de tiempo la evolución de las propiedades fisicoquímicas de un material y predecir su comportamiento a largo plazo, mediante la combinación de las condiciones ambientales más desfavorables a las que estaría expuesto el material durante un período de tiempo relativamente prolongado. Para este propósito, se realizan pruebas empleando una cámara de envejecimiento acelerado, en la cual los materiales se exponen a ciclos alternados de luz ultravioleta (UV) y humedad, todo ello a temperaturas elevadas y controladas.

De acuerdo a lo anterior, es posible desarrollar una metodología que permita evaluar en períodos cortos de tiempo el comportamiento y durabilidad de este tipo de materiales bajo las condiciones ambientales naturales a las que pueden estar expuestos y predecir su desempeño a largo plazo. De esta forma sería posible evaluar la evolución de sus propiedades en el tiempo y estimar un tiempo de vida útil.

Inicialmente para este estudio se seleccionó y caracterizó un suelo natural de una vía de bajo volumen de tránsito, lo que permitió establecer sus propiedades mecánicas, fisicoquímicas y morfológicas. Según la clasificación USCS, se caracterizó como una arcilla magra y en el análisis mineralógico se encontró la presencia de minerales arcillosos como la caolinita y la illita; presentando un IP de 21, un CBR de 5.0% y una capacidad carga de 5.5 MPa. Las características encontradas indican que es un suelo de mala calidad desde el punto de vista geotécnico y que para su uso en aplicaciones de infraestructura vial, requiere de una intervención para mejorar sus propiedades ingenieriles.

Posteriormente se seleccionaron siete productos comerciales de diferente naturaleza química usados para el mejoramiento de suelos, e identificados en el desarrollo de este trabajo como: aceite sulfonado, polímero, enzima, organosilano, cal, cemento y zeolita/cemento. Los sistemas mixtos de suelo con cada uno de estos productos químicos fueron evaluados inicialmente y después de 7 días de curado mediante diversos ensayos fisicoquímicos, mecánicos y ambientales. Estos materiales demostraron desempeños adecuados para objetivos de mejoramiento en las propiedades ingenieriles del suelo; de manera general se presentaron mayores resistencias mecánicas, destacándose los resultados obtenidos para los sistemas mixtos suelo-cemento y suelo-zeolita/cemento los cuales aumentaron significativamente la capacidad de carga del suelo, alcanzado valores de 47 y 56 MPa, así como valores de CBR superiores al 100%. Para los sistemas mixtos de suelo aditivado con los productos líquidos, se encontraron cambios favorables en las propiedades fisicoquímicas respecto al suelo natural, como la reducción en la porosidad de los materiales y resistencia al agua que presentan. Entre los aditivos químicos se

destacan el organosilano y el polímero con coeficientes de conductividad hidráulica de  $1.08 \times 10^{-11}$  m/s y  $7.33 \times 10^{-11}$  m/s respectivamente, menores que el valor obtenido para el suelo natural de  $1.36 \times 10^{-09}$  m/s.

La caracterización ambiental realizada a los sistemas mixtos de suelo con los aditivos químicos muestra que los productos evaluados como estabilizantes de suelos viales, no presentan afectaciones para el ambiente en términos de toxicidad, biodegradabilidad y generación de material particulado. Es de resaltar que los resultados obtenidos para los sistemas mixtos de suelo con los aditivos líquidos son muy similares a los del suelo natural, mientras que para el caso de los productos sólidos se encuentra que sí hay una alteración de los parámetros evaluados, específicamente por la incorporación de calcio al sistema con la consecuente alcalinización del medio, obteniendo lixiviados con un pH entre 11 y 12. No obstante, esta alteración no representa afectación ambiental en tanto que el calcio es un componente natural de los suelos y se espera que en el tiempo, al completar las reacciones puzolánica, el sistema tienda a la neutralidad.

Después de esta valoración inicial, los materiales estudiados fueron sometidos y evaluados a diferentes condiciones de intemperismo, lo que permitió correlacionar su desempeño y durabilidad a condiciones ambientales aceleradas y a condiciones naturales. Estas correlaciones se expresan en términos de los factores de aceleración establecidos para cada material, para de esta forma estimar la evolución de las propiedades fisicoquímicas, ambientales y mecánicas de los materiales en el tiempo. Los mejores resultados de desempeño, en términos de capacidad de carga, se obtienen para los sistemas mixtos suelo-aceite sulfonado y suelo-zeolita/cemento, que luego de 540 h de intemperismo acelerado su resistencia está alrededor de 48 MPa, que es un buen resultado respecto al obtenido para el suelo natural que presentó una capacidad de carga de 18 MPa.

Finalmente, se evaluaron a escala real dos de los aditivos químicos estudiados en este trabajo: enzima y zeolita/cemento, mediante la construcción de tramos de prueba de un kilómetro de longitud por cada producto, ubicados en una vía de bajo volumen de tránsito. Los resultados obtenidos en la implementación y evaluación de los tramos piloto, evidencian el efecto positivo de los aditivos químicos en el suelo, lo que muestra la potencialidad de estas soluciones para el mejoramiento de vías no pavimentadas o de bajo volumen de tránsito del país. Se evidencia en el trabajo de campo, que los procesos constructivos no son complejos y solo requieren de un kit básico de maquinaria: máquina motoniveladora, retroexcavadora y vibrocompactador, tanto para aditivos líquidos como sólidos, encontrándose además una buena relación de costo beneficio susceptible de mejora en la medida que estas tecnologías se estandaricen y regulen para ser implementadas en el país.

Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación están asociados 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 y la durabilidad que pueden presentar tanto los productos estabilizantes como los sistemas aditivados. Estos resultados se constituyen en una herramienta para la evaluación del desempeño de productos y/o tecnologías alternativas para carreteras no pavimentadas o vías de bajos volúmenes de tránsito, lo que conducirá indudablemente a potenciar y estandarizar el uso de estos materiales como soluciones pertinentes para el mejoramiento de la infraestructura vial rural.

**Palabras clave:** materiales para estabilización química, suelos arcillosos, intemperismo sobre suelos viales, infraestructura vial sostenible, caracterización fisicoquímica y mecánica, análisis ambiental

## OBJETIVOS

- El objetivo general de este trabajo fue:

Evaluar el efecto del intemperismo sobre las propiedades fisicoquímicas y la durabilidad de suelos viales aditivados con estabilizantes químicos

- Los objetivos específicos planteados fueron:

Evaluar los sistemas de suelos bajo condiciones de intemperismo natural e intemperismo acelerado, en función de sus propiedades fisicoquímicas, ambientales, mecánicas y de durabilidad

Determinar la correlación entre las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de los sistemas aditivados sometidos a intemperismo natural e intemperismo acelerado

Proponer e implementar nuevas técnicas para evaluar la eficiencia de la estabilización química de suelos viales

Determinar la influencia que tiene el tipo de estabilizante sobre la durabilidad de los sistemas aditivados

Desarrollar un método capaz de evaluar a corto plazo y predecir el desempeño y evolución en el tiempo de suelos viales estabilizados químicamente

# 1. CAPÍTULO I: suelos, intemperismo y estabilización

## 1.1. Introducción

El suelo natural, material mineral que cubre la corteza terrestre, está conformado básicamente por cuatro componentes: agua, aire, compuestos orgánicos e inorgánicos. Este sistema es el resultado de la acción del *clima* y de los *organismos* asociados a él, sobre un *material parental*, bajo el control de un *relieve* y durante un determinado período de *tiempo*; cada uno de estos factores y su acción simultánea afectan las propiedades del suelo y son los responsables de que los suelos naturales presenten una alta variabilidad espacial y que no siempre cumplan con las propiedades deseadas de acuerdo con su aplicación o uso definido.

De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta que el suelo es un sistema complejo y heterogéneo en su formación, es frecuente que desde el punto de vista ingenieril los suelos naturales se cataloguen como inadecuados para la construcción de infraestructura vial. Para estas aplicaciones se requieren materiales con buenas especificaciones técnicas y capaces de soportar tanto las cargas del tránsito como los efectos del intemperismo natural al que están sometidos, manteniendo siempre buenas condiciones de serviciabilidad y transitabilidad.

Desde la práctica ingenieril entonces, se hace uso de materiales de préstamo para la construcción, conservación y mejoramiento de carreteras; sin embargo, cada vez es más difícil disponer de materiales que cumplan con las especificaciones y que se encuentren a una distancia razonable. Por ello, se hace necesario implementar tecnologías alternativas de mejoramiento del suelo para usos ingenieriles que hagan uso de los materiales locales y que presenten criterios técnicos, económicos y ambientales que los hagan sostenibles y durables.

En este sentido, la estabilización de suelos adquiere mayor relevancia cuando se establece su uso en obras civiles. El concepto “estabilización de suelos” se entiende como el proceso mediante el cual los suelos naturales se someten a cierta manipulación o tratamiento para mejorar algunas de sus propiedades, de tal forma que alcancen mayor resistencia ante los efectos del tránsito y del intemperismo natural al cual están sometidos (Valle Arenas, 2010).

Hay una gran variedad de técnicas de estabilización que buscan mejorar las propiedades ingenieriles de los suelos teniendo en cuenta solo parámetros físicos o

mecánicos; otras, como la estabilización química, tienen en cuenta los parámetros químicos y composicionales de los suelos para mejorar sus propiedades mediante la adición de productos químicos.

La estabilización química es un procedimiento alternativo 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 (Nicholson, 2015),(Petry & Little, 2002). Los productos químicos empleados como agentes estabilizantes incluyen una amplia gama de materiales, que pueden clasificarse en forma general en familias de acuerdo con su naturaleza química: puzolanas, polímeros, organosilanos, aceites sulfonados, sales orgánicas, emulsiones enzimáticas, sales inorgánicas, emulsiones asfálticas.

Usualmente, acorde con su aplicación y desempeño, esta alternativa de mejoramiento de suelos ha sido orientada a caminos sin pavimentar de mediano y bajo volumen de tránsito; donde el desgaste y la durabilidad de los materiales son debidos principalmente a factores climáticos y de intemperismo natural. Algunos estudios han demostrado que los efectos estabilizadores de los productos químicos evolucionan con el tiempo y dependen de las condiciones ambientales (Camacho Tauta et al., 2010). Al estar siempre expuestos al exterior, estos materiales son susceptibles a la degradación por el medio ambiente; en tales casos, una combinación de factores químicos, mecánicos y de energía lumínica desarrollan un complejo conjunto de reacciones que contribuyen a la degradación superficial, fenómeno conocido como intemperismo. El intemperismo produce en los materiales expuestos al exterior cambios de color, superficies más rugosas, fisuramiento, agrietamiento, pérdida de cohesión y fragmentación. Los factores del intemperismo que son mayormente responsables de los cambios en la superficie de los materiales son la radiación solar, la humedad y la temperatura (White et al., 2017), (Croll, 2019).

Una de las alternativas para evaluar la evolución de las propiedades fisicoquímicas de los materiales en el tiempo es someterlos a condiciones extremas de intemperismo, para lo cual existen cámaras de envejecimiento acelerado donde se exponen los materiales a ciclos alternados de luz ultravioleta (UV) y humedad, bajo temperaturas elevadas y controladas. En estas cámaras los efectos de la luz solar se simulan mediante el uso de lámparas fluorescentes (UV) especiales; el rocío y la lluvia se simulan mediante la condensación de humedad y/o la pulverización de agua; de esta forma en unos pocos días o semanas, una cámara de envejecimiento puede reproducir el daño que sufriría un material en el transcurso de meses o incluso años a la intemperie (Andrade et al., 2019), (White et al., 2017).

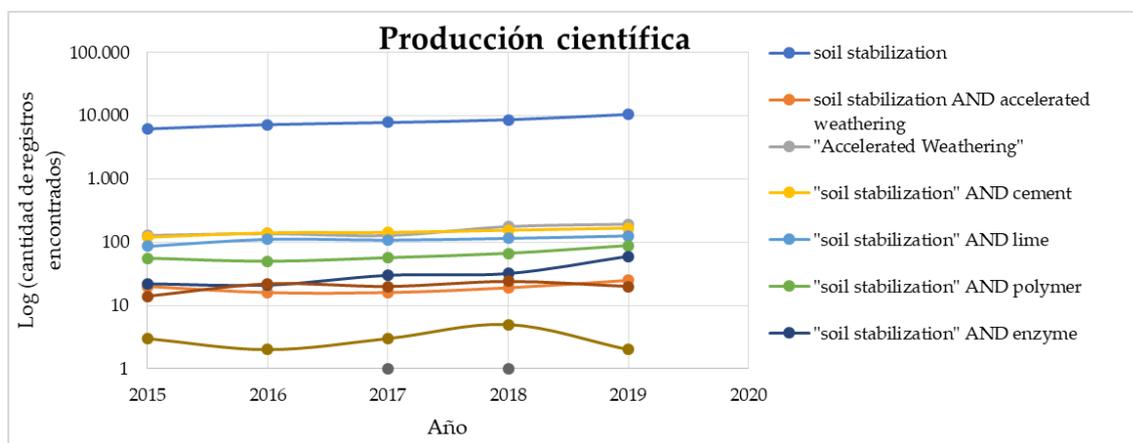
Entre los estudios encontrados en este tema en particular, se destaca el uso del intemperismo acelerado en materiales poliméricos (Fechine et al., 2006), (Orozco Esponisa, 2010), (Fuentes-Talavera et al., 2015), (Lizárraga Laborín et al., 2018), (Kuvshinnikova et al., 2018) (Garnai Hirsch et al., 2019), (Pickett et al., 2019); maderas (Valverde Otárola, 2011), (Urias et al., 2002), (Suárez Landeo et al., 2019), (Chee et al., 2019); semillas (González Hernández, 2013), (Gil et al., 2003); materiales metálicos (Suárez-Corrales et al., 2014); mezclas asfálticas (Reyes Ortiz & Camacho Tauta, 2008), (Echeverría & Echeverría, 2007), (Menapace et al., 2017); materiales de construcción (Sleiman et al., 2015), (Paolini et al., 2020); pigmentos y recubrimientos (Faria, 2015), (Kumano et al., 2019), (Gao et al., 2019), (Mai Anh Bui et al., 2020). Para el caso de estabilizantes químicos y sistemas aditivados estabilizante/suelo este tipo de estudios son escasos; entre ellos cabe mencionar dos trabajos de Camacho Tauta et al., 2008 y Camacho Tauta et al., 2010, que usan estas técnicas para el curado y envejecimiento de un estabilizante tipo aceite sulfonado y una investigación de Rezaeimalek, Nasouri, et al., 2017 que evaluó la durabilidad de un suelo arenoso tratado con un producto polimérico.

De otra parte, un estudio cuantitativo de la producción científica entre los años 2015 – 2019 sobre estabilización química de suelos en fuentes de información como: Web of Science, Scopus y Science Direct confirman la poca información disponible acerca de productos alternativos para la estabilización de suelos y, en particular, estudios de durabilidad mediante pruebas de intemperismo acelerado asociados a sistemas estabilizados. Para la búsqueda se utilizaron las palabras clave: soil stabilization, accelerated weathering, lime, cement, silane, pozzolanic, polymer, enzyme, sulphonate oil; los resultados obtenidos se muestran en Tabla 1.1.

Como se puede observar en la Tabla 1.1 existe mucha información técnica especializada relacionada con palabras como «Soil stabilization» y «accelerated weathering» y a medida que se refina la búsqueda, se reducen significativamente los resultados. Es de resaltar el crecimiento de investigaciones durante los últimos años sobre materiales alternativos que se observa en la Figura 1.1; ello evidencia la dinámica que presenta la temática relacionada con nuevas alternativas de estabilización.

**Tabla 1.1.** Resultados de producción científica de los temas de estudio

Palabras	«soil stabilization»	«accelerated weathering»	soil stabilization AND «accelerated weathering»	«soil stabilization» AND cement	«soil stabilization» AND lime	«soil stabilization» AND polymer	«soil stabilization» AND enzyme	«soil stabilization» AND pozzolan	«soil stabilization» AND sulphate oil	«soil stabilization» AND silane
Scopus	4 609	1 626	4	708	567	166	93	27	3	0
WOS	1 166	1 035	11	451	305	75	36	23	2	15
Science Direct	123 677	2 669	286	2 367	1 809	986	364	233	14	28



**Figura 1.1.** Resultados por año de producción científica de los temas de estudio

Por todo lo anteriormente expuesto, y teniendo en cuenta que se hace necesario implementar y estandarizar materiales alternativos para el mejoramiento de suelos con aplicaciones en infraestructura vial para carreteras de bajos volúmenes de tránsito, en esta investigación se estudió el efecto del intemperismo acelerado en las propiedades fisicoquímicas de suelos aditivados con productos químicos y su correlación con sistemas expuestos a condiciones reales, aportando información relevante sobre el desempeño de estos materiales así como una metodología de evaluación que en laboratorio permita conocer la evolución de sus propiedades en el tiempo.

## 1.2. Suelos

En la década de 1940, Jenny estableció que la formación de los suelos puede ser atribuida a la acción de cinco factores, presentados en el siguiente modelo (Jenny, 1940, como se citó en Jaramillo, 2011):

$$S = f(C, MP, O, R, T)$$

Donde:

S: Desarrollo del suelo

C: Clima

MP: Material Parental

O: Organismos

R: Relieve

T: Tiempo

De acuerdo con el modelo planteado, el desarrollo del suelo es función de la acción de un clima y de los organismos asociados a él, sobre un material parental, bajo el control de un relieve y durante un determinado tiempo. Estos cinco factores actúan siempre y de manera simultánea pero no igual, en la formación de cualquier tipo de suelo; sin embargo, no todos actúan con la misma intensidad, puede encontrarse que bajo algunas condiciones específicas alguno de los factores ejerza un mayor control sobre el desarrollo de un suelo con respecto a los demás (Jaramillo, 2011).

Con respecto a la definición de suelo se encontró que se presentan varios matices según quien trate de hacerla y la época en la que se haga. De acuerdo con el Soil Survey Staff SSS, el suelo es un cuerpo natural compuesto de sólidos —minerales inorgánicos y compuestos orgánicos— líquidos y gases que ocurre en la superficie de la tierra, ocupa un espacio y se caracteriza porque tiene horizontes o capas que se diferencian del material inicial como resultado de las adiciones, pérdidas, traslocaciones y transformaciones de energía y materia o porque es capaz de soportar plantas arraigadas en un ambiente natural (SSS, 1975, como se citó en Jaramillo, 2011).

Desde un punto de vista químico, el suelo se puede definir como un sistema heterogéneo, polifásico, particulado, polidisperso y poroso, de componentes sólidos, líquidos y gaseosos en diversas proporciones. La parte sólida está formada por minerales primarios, minerales de arcilla, y óxidos hidratados junto con materia orgánica y organismos vivos, lo cual forma un sistema polifásico de partículas más o menos discretas o agregadas. Por su parte, la fase líquida está conformada por agua y solución del suelo que actúa como medio a través del cual se hacen posibles las reacciones químicas entre los diferentes componentes del sistema. Finalmente, la fase gaseosa o atmósfera del suelo está formada por todos aquellos compuestos que, de acuerdo con las condiciones a las que está sometido el suelo, pueden presentarse en forma gaseosa; los compuestos más comunes en condiciones de aireación adecuada son: el CO<sub>2</sub>, el O<sub>2</sub> y el vapor de agua, tal como se muestra en la Figura 1.2 (Besoain, 1985).

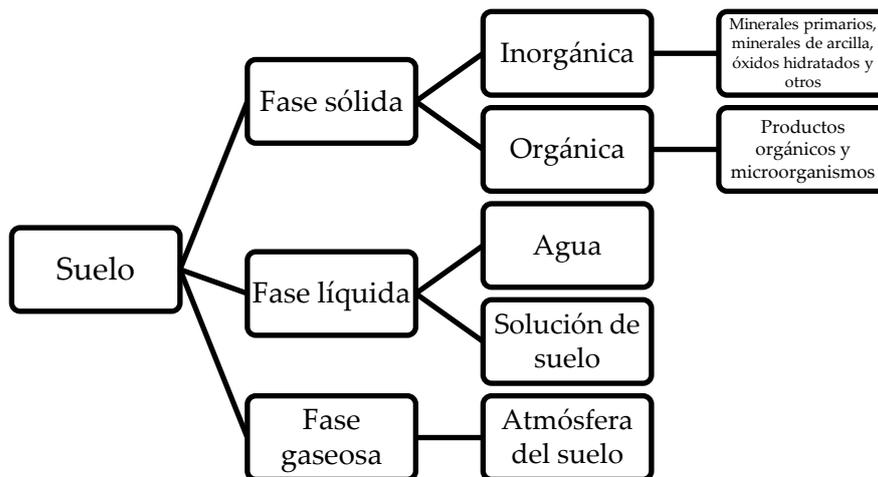


Figura 1.2. Componentes de un suelo (Besoain, 1985)

De las fases que componen un suelo, la fase sólida es la que posee mayor estabilidad y permanencia en el tiempo, por ello se usa como base para clasificar y caracterizar el suelo; por su parte, las fases gaseosas y líquidas pueden experimentar grandes fluctuaciones y no constituyen un parámetro de caracterización apropiado. Dentro del uso ingenieril se destacan dos sistemas para clasificar los suelos: el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos USCS y el Sistema AASHTO, los cuales utilizan el resultado del análisis granulométrico y los límites de consistencia para determinar la clasificación del suelo.

- *Sistema de Clasificación Unificada de Suelos USCS*

La forma original del Sistema de Clasificación Unificada de Suelos USCS fue desarrollada por Casagrande en 1942, como una herramienta para ser usada en las construcciones diseñadas por el Cuerpo de Ingenieros del ejército de Estados Unidos durante la segunda guerra mundial. En 1952, el Cuerpo de Ingenieros actualizó el sistema en cooperación con el United States Bureau of Reclamation, y en la actualidad es el sistema más usado en la ingeniería para la clasificación de suelos. Este sistema está basado en las propiedades de plasticidad y en la distribución de tamaño de grano, la clasificación se designa por dos letras, la primera considera el principal componente presente en el suelo —grava, arena, limo, arcilla— y la segunda describe información de la curva granulométrica —bien gradado o mal gradado— o plasticidad —alta o baja plasticidad— (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2006).

Este sistema de clasificación se presenta en la Tabla 1.2 y Figura 1.3, clasifica los suelos en dos grandes categorías (Braja M Das, 2013) :

1. Suelos de grano grueso que son de grava y arena en estado natural con menos de 50% en peso que pasa a través del tamiz núm. 200 —75  $\mu\text{m}$ —. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo de G o S: G es para el suelo de grava o grava, y S para la arena o suelo arenoso.
2. Suelos de grano fino con 50% en peso o más que pasa por el tamiz núm. 200 —75  $\mu\text{m}$ —. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo de M, que es sinónimo de limo inorgánico, C para la arcilla inorgánica y O para limos orgánicos y arcillas. El símbolo Pt se utiliza para la turba, lodo y otros suelos altamente orgánicos.

Otros símbolos que también se utilizan para la clasificación son:

- W: bien clasificado
- P: mal clasificado
- L: baja plasticidad —límite líquido menor de 50—
- H: alta plasticidad —límite líquido mayor de 50—

**Tabla 1.2.** Sistema unificado de clasificación (Braja M Das, 2013). Adaptado y traducido

Criterio para la asignación de símbolos de grupo				Símbolos de grupo
Suelos de grano grueso Más de 50% retenido en el tamiz núm. 200	Gravas Más de 50% de fracción gruesa retenida en el tamiz núm. 4	Gravas limpias	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$	GW
		Menos de 5% finos <sup>a</sup>	$C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3^c$	GP
	Arenas 50% o más de la fracción gruesa pasa tamiz núm. 4	Gravas con finos	$IP < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 1.3)	GM
		Más de 12% finos <sup>a,d</sup>	$IP > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 1.3)	GC
	Arenas 50% o más de la fracción gruesa pasa tamiz núm. 4	Arenas limpias	$C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$	SW
		Menos de 5% finos <sup>b</sup>	$C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3^c$	SP
Suelos de grano fino 50% o más pasa a través del tamiz núm. 200	Limos y arcillas Límite líquido menor que 50	Inorgánico	$IP > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 1.3) <sup>e</sup> $IP < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 1.3) <sup>e</sup>	CL ML
		Orgánico	$\frac{\text{Límite líquido: secado}}{\text{Límite líquido: no secado}} < 0.75$ ; vea la figura 1.3; zona OL	OL
Limos y arcillas Límite líquido 50 o más	Inorgánico	Inorgánico	Gráficos $IP$ en o por encima de línea "A" (figura 1.3)	CH
		Orgánico	Gráficos $IP$ por debajo de "A" línea (figura 1.3)	MH
Suelos altamente orgánicos	Materia orgánica principalmente, color oscuro y orgánico	Inorgánico	$\frac{\text{Límite líquido: secado}}{\text{Límite líquido: no secado}} < 0.75$ ; vea la figura 1.3; zona OH	OH
		Orgánico		Pt

<sup>a</sup>Gravas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC.

<sup>b</sup>Arenas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC.

$$^c C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}; \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

<sup>d</sup>Si  $4 \leq IP \leq 7$  y gráficos en la zona rayada en la figura 1.3, se usa doble símbolo GC-GM o SC-SM.

<sup>e</sup>Si  $4 \leq IP \leq 7$  y gráficos en la zona rayada en la figura 1.3, se usa doble símbolo CL-ML.

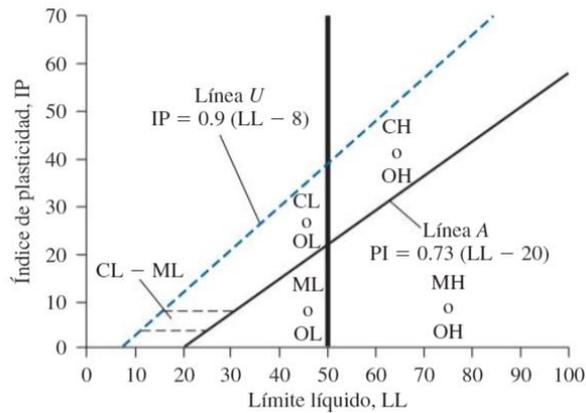


Figura 1.3. Gráfica de plasticidad (Braja M Das, 2013)

○ *Sistema de clasificación de la AASHTO*

El Sistema de clasificación de la AASHTO fue desarrollado en 1929 por la American Association of State Highway and Transportation Officials y el Committee on Classification of Materials for Subgrades and Granular Type Roads of the Highway Research Board de la ASTM. En este sistema el suelo es clasificado en 7 grupos principales: desde A-1 hasta A-7; los suelos clasificados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son suelos de grano grueso mientras que los pertenecientes a los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7 son suelos finos o materiales limosos y arcillosos. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2006).

Este sistema de clasificación se muestra en la Tabla 1.3 y se basa en los siguientes criterios (Braja M Das, 2013).

1. *Tamaño de grano:* se clasifica como grava a la fracción de material que pasa el tamiz de 75 mm y es retenida en el tamiz N° 10 —2 mm—; arena fracción que pasa el tamiz N° 10 —2 mm— y es retenida en el tamiz N° 200 —0.075 mm—. Limo y arcilla: fracción que pasa el tamiz N° 200 —0.075 mm—.
2. *Plasticidad:* el término limoso se aplica cuando las fracciones finas del suelo tienen un índice de plasticidad de 10 o menos. El término arcilloso se aplica cuando las fracciones finas tienen un índice de plasticidad de 11 o más.
3. Si se encuentran cantos y guijarros —tamaño mayor a 75 mm—, se excluyen de la porción de la muestra de suelo en el que se hizo la clasificación. Sin embargo, se registra el porcentaje de este tipo de material.
4. Para clasificar un suelo de acuerdo con la Tabla 1.3, los datos de prueba se aplican de izquierda a derecha. Por proceso de eliminación, el primer grupo de la izquierda en la que quepan los datos de prueba es la clasificación correcta.

**Tabla 1.3.** Clasificación de materiales de carreteras subrasante (Braja M Das, 2013)

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)						
	A-1			A-2			
Grupo de clasificación	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)							
Núm. 10	50 máx.						
Núm. 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.				
Núm. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Características de la fracción de paso núm. 40							
Límite líquido				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Limo o grava arcillosa y arena			
Clasificación general de la subrasante	Excelente a bueno						
Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)						
Grupo de clasificación		A-4	A-5	A-6			A-7 A-7-5* A-7-6†
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)							
Núm. 10							
Núm. 40							
Núm. 200		36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.		36 mín.
Características de la fracción de paso núm. 40							
Límite líquido		40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.		
Índice de plasticidad		10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.		
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes		Suelos limosos			Suelos arcillosos		
Clasificación general de la subrasante	Regular a malo						
*Para A-7-5, $PI \leq LL - 30$							
†Para A-7-6, $PI > LL - 30$							

Para la construcción de estructuras civiles se utilizan varios tipos de suelo; sin embargo, algunos de estos en su forma natural no son aptos para propósitos constructivos sin la realización de un tratamiento. Estos son conocidos como «suelos problemáticos» los cuales necesitan ser reemplazados o mejorados antes de soportar cargas por estructuras superiores (Hausmann, 1990). Un ejemplo, son los suelos expansivos, los cuales se pueden encontrar alrededor de todo el mundo excepto en regiones árticas (Ikeagwuani & Nwonu, 2019).

### 1.3. Suelos expansivos

Los suelos expansivos son aquellos que tienden a producir cambios de volumen cuando varía su contenido de humedad; es así que constantemente están sufriendo procesos de expansión al ser humedecidos y contracción al momento de secarse generando grietas amplias y profundas. Estos suelos presentan contenidos de arcilla mayores al 30% y su inestabilidad volumétrica responde en gran medida al comportamiento de las estructuras químicas típicas de las partículas de arcilla. Otros factores que propician la expansión y contracción del suelo son: las propiedades mineralógicas, principalmente el contenido de arcillas; las condiciones ambientales, tipo de vegetación, topografía del terreno y esfuerzos a los que es sometido (Lara Lopez, 2002).

Las arcillas están constituidas por partículas muy pequeñas, de formas laminares, planas y alargadas, de gran superficie específica, en la que su composición mineralógica y propiedades químicas influyen más en su comportamiento mecánico que la propia granulometría; en su aspecto primario las partículas de arcilla presentan una estructura molecular laminar basada en el apilamiento de capas. La primera capa está formada por arreglos regulares cuya unidad básica es el tetraedro de silicio y oxígeno: anión silicato  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ ; la segunda capa está constituida por octaedros de magnesio o alúmina, cuyos vértices están conformados por oxígenos, o a veces grupos OH (Besoin, 1985). Es decir, las dos unidades básicas de la estructura molecular de las arcillas son el tetraedro de silicio y el octaedro de aluminio o magnesio, unidades a partir de las cuales se construyen las láminas de arcilla mostradas en la Figura 1.4.

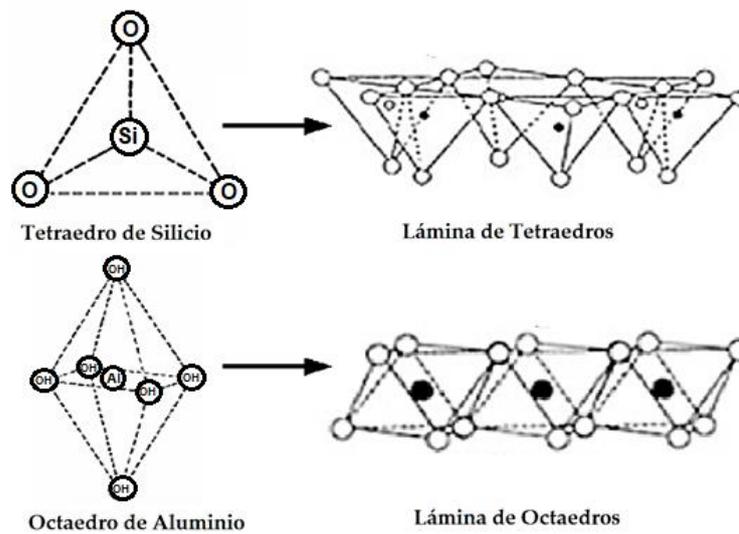


Figura 1.4. Esquema de las unidades básicas y láminas constituyentes de las arcillas

De acuerdo con la forma en la que se combinen las láminas de tetraedros y octaedros se obtienen los diferentes minerales arcillosos; de esta forma se generan dos tipos principales de arcillas silicatadas cristalinas, las de relación 1:1 o T:O conformadas por dos capas: una tetraédrica T o capa de silicio y una octaédrica O o capa de aluminio, a este grupo pertenecen minerales como la caolinita y la halloysita; y las de relación 2:1 o T:O:T conformadas por tres capas: dos capas tetraédricas T y una octaédrica O en el medio de las dos capas tetraédricas, a este grupo pertenecen minerales como la montmorillonita, la illita y la vermiculita (Franco Urquiza & Maspocho Rulduà, 2009).

La afinidad relativa de las arcillas por el agua y por los cationes presentes en ella, depende del desequilibrio de cargas eléctricas en la superficie de los minerales de arcilla, este desequilibrio hace que las láminas de arcillas presenten cargas eléctricas negativas —en su mayoría— en su superficie, esta cantidad de carga y su distribución espacial varían de unos minerales de arcilla a otros y están originados por dos fenómenos específicos (Cepeda Dovala, 2007):

### 1. Sustitución isomórfica

Es la sustitución de un ion por otro de similar tamaño —o similar número de coordinación— en un mineral, sin cambio en la estructura de éste. De esta forma, si un catión de menor valencia substituye a otro catión de valencia mayor, como el  $Mg^{+2}$  por  $Al^{+3}$  o  $Al^{+3}$  por  $Si^{+4}$  las cargas negativas de  $O^{-2}$  y  $OH^{-}$  que forman la estructura cristalina, quedan desbalanceadas, dando lugar a una carga negativa neta sobre el mineral.

### 2. Cargas de arista arcillosa

Se generan cuando por acción del aumento del pH, los hidrógenos que neutralizan las cargas de los oxígenos ubicados en los vértices de los tetraedros y octaedros son liberados en una reacción de hidrólisis, dejando los oxígenos de carga negativa expuestos en las estructuras de las capas tetraedrales y octaedrales, tal como se muestra en la Figura 1.5.

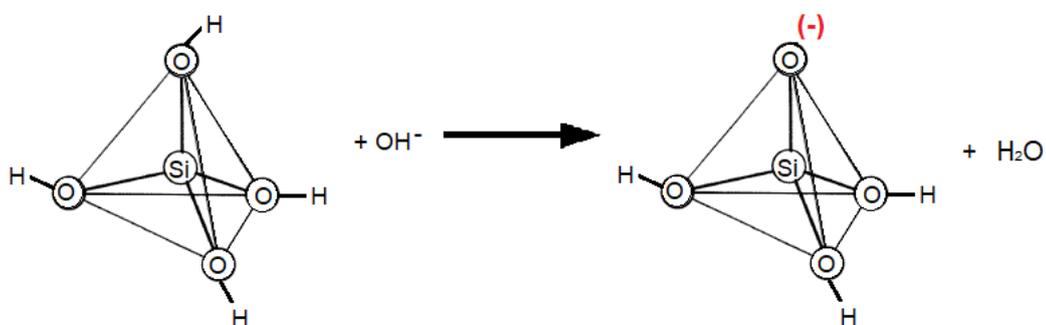


Figura 1.5. Desequilibrio eléctrico por cargas de aristas arcillosas

Como se mencionó anteriormente, las arcillas son las principales responsables de la inestabilidad volumétrica de los suelos y es que debido al desequilibrio eléctrico que presentan generan fuerzas electrostáticas entre la superficie negativa que se neutraliza con los cationes externos —Na<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>, Al<sup>+++</sup>, H<sup>+</sup>, moléculas de agua, entre otros— que se sitúan en la superficie de los minerales arcillosos o entre sus laminas generando una doble capa eléctrica, la negativa de la superficie y la positiva proporcionada por la agrupación de cationes en su proximidad (Bauzá Castelló, 2015); a esto se lo conoce como la doble capa difusa.

Debido a la doble capa difusa presente entre las láminas de los minerales arcillosos, estos presentan altos contenidos de humedad en estado natural, y por ello su resistencia al esfuerzo cortante generalmente es muy baja y la capacidad de soporte muy reducida. Adicionalmente son materiales impermeables, por eso absorben lentamente la humedad, pasando a un estado plástico con fácil moldeo de alta expansión, pero sin agrietamiento ni disgregación (Saiyouri et al., 2004), (Junco del Pino et al., 2013).

#### 1.4. Estabilización de suelos

La estabilización es el proceso mediante el cual los suelos naturales se someten a cierta manipulación o tratamiento de modo que se puedan aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose una capa de asiento del firme, estable y durable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas (Valle Arenas, 2010) y por ende asegure geotécnicamente un buen comportamiento de la explanada.

Las propiedades más importantes que se deben mejorar con una estabilización según Valle Arenas (2010) son:

- *Resistencia.* El incremento de resistencia aumenta la estabilidad y la capacidad de carga.
- *Estabilidad del volumen.* Proporciona el control de los procesos de hinchamiento-colapso causados por los cambios de humedad.
- *Durabilidad.* Una mayor durabilidad aumenta la resistencia a la erosión, responde de manera más eficaz a los cambios climáticos y al desgaste por efecto del tránsito.
- *Permeabilidad.* La reducción de la permeabilidad y por lo tanto de la circulación de agua, mejora la estabilidad.

Debe tenerse en cuenta que la gran variabilidad de los suelos hace que cada método resulte favorable solo para un determinado tipo de ellos. En muchas ocasiones, esa variabilidad se manifiesta a lo largo de algunos metros, en tanto que en otras, a lo largo de algunos kilómetros, pero en todos los casos suele ser frecuente que para aplicar un

método que sea técnica y económicamente viable se tengan que generalizar e involucrar en el mismo método de estabilización diferentes tipos de suelos a veces con grandes variaciones de alguna propiedad, renunciando correspondientemente, al empleo del procedimiento «óptimo» en cada clase (Rico Rodríguez & Castillo, 1998).

La estabilización no siempre es la mejor solución, su aplicación en los casos donde resulte conveniente no siempre presentará los mismos resultados; por consiguiente, hay que tener claramente definidas las propiedades del suelo que se quieren mejorar y la técnica que mejor se adapte a las necesidades particulares, así como una relación de costo beneficio. Balanceando cuidadosamente estos factores puede lograrse un empleo adecuado y eficiente de la estabilización de suelos (Rojas Esparza & Camargo Sánchez, 2004).

Durante los últimos años se han desarrollado múltiples técnicas de estabilización que buscan mejorar una o varias propiedades del suelo desde el punto de vista ingenieril. En la Figura 1.6 se muestra la aplicabilidad de un gran número de técnicas en función del tamaño de partícula del suelo (Mitchell, 1981).

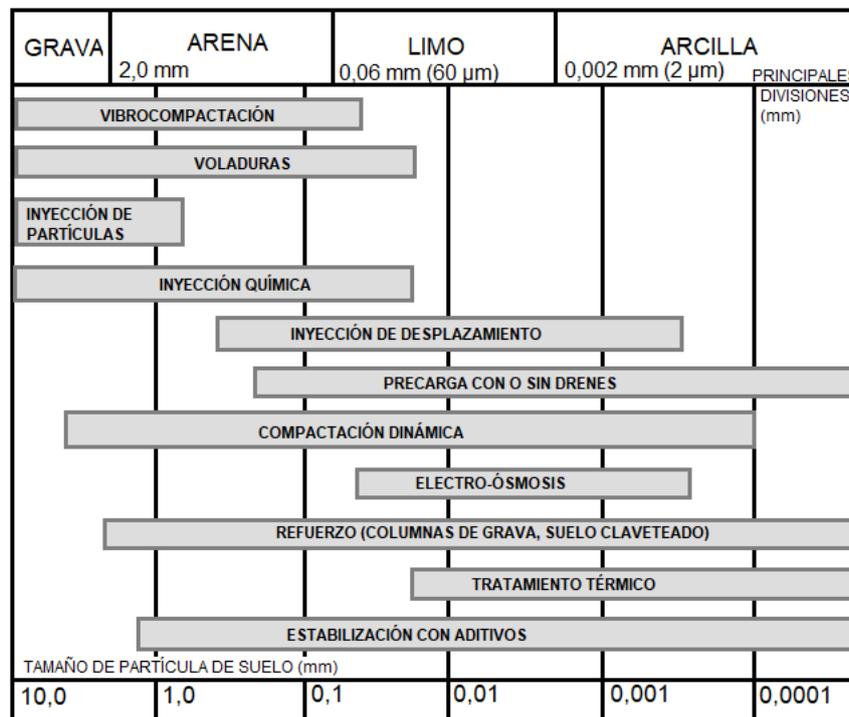


Figura 1.6. Aplicabilidad de las técnicas de mejoramiento de suelos en función del tamaño de partícula (Mitchell, 1981)

De acuerdo con Mitchell (1981), las técnicas de mejoramiento de suelos se pueden clasificar en seis grandes grupos; sin embargo, autores más recientes incluyen «el reemplazo del suelo» como un grupo más dentro de la clasificación (Terashi & Juran, 2000).

#### 1.4.1. Reemplazo

El reemplazo es la técnica de mejoramiento de suelos más simple y confiable si se emplea adecuadamente. El suelo presente, constituido principalmente por arcilla blanda o arcilla altamente orgánica, se retira y se reemplaza por materiales que presenten la calidad necesaria para mantener la estabilidad o evitar un asentamiento de la estructura (Terashi & Juran, 2000); su problema es que no logra producir los efectos deseados por sí sola, necesita siempre la compactación como complemento. Aplicar esta técnica requiere emplear grandes cantidades de material para reemplazar el material no útil, así como el uso de maquinaria pesada para retirar el material natural, transportar y compactar el material de reemplazo, lo que incrementa los costos de operación y aumenta el impacto ambiental en el sitio (Zuluaga Angel, 2005).

#### 1.4.2. Compactación

La compactación de suelos es una práctica muy común y consiste en aplicar energía mecánica a una masa de suelo para reorganizar las partículas y hacerla más densa a través de la expulsión de aire de los huecos entre los granos del suelo (Patel, 2019). Su propósito es aumentar la resistencia y reducir el asentamiento de suelos granulares sueltos (Terashi & Juran, 2000) y reducir el volumen ocupado por los espacios vacíos en el suelo, de tal forma que el material en conjunto ocupe menos espacio; de esta forma, la fracción de volumen aumenta pudiendo llegar a valores mayores, logrando una mayor compactación y resistencia del suelo. Esta técnica no es muy recomendable cuando existen grandes diferencias de tamaño en los materiales, debido a que se puede presentar el fenómeno de la segregación y, adicionalmente, este se agrava si la vibración es en sentido vertical (Hildebrand et al., 2008).

#### 1.4.3. Consolidación

Esta técnica está orientada principalmente a suelos cohesivo blandos con resistencia y permeabilidad baja; las estructuras construidas sobre ellos experimentarán el problema de inestabilidad y/o asentamientos desfavorables a largo plazo. Se ha encontrado que estos suelos aumentan la resistencia y mejoran su compresibilidad con el tiempo bajo la carga sostenida; a este proceso se le conoce como consolidación (Terashi & Juran, 2000). De esta forma se puede aplicar al terreno una carga igual o superior a la que producirá la estructura que se proyecta apoyar en él, lo que se conoce como precarga, y en el tiempo genera la consolidación del suelo, que se traduce en un aumento de la resistencia del terreno y una disminución de los asentamientos postconstructivos (Bielza Feliú, 1999).

#### 1.4.4. Inyecciones

Con la inyección de materiales introducidos a una presión y caudal relativamente regulado, se pretende rellenar huecos y grietas o fallas en el suelo, mejorando ostensiblemente las propiedades geotécnicas del terreno tratado, reduciendo su deformabilidad y/o permeabilidad (Patel, 2019). Estas inyecciones requieren la realización de perforaciones que permitan alcanzar la zona a tratar y la preparación de la mezcla que ha de ser inyectada con las características de fluidez y viscosidad adecuadas. Esta técnica requiere equipos robustos como bombas que permitan la impulsión; tuberías, equipos de control de presión y caudal, obturadores, manguitos y medios auxiliares para concentrar y dispersar la inyección en la zona deseada (Bielza Feliú, 1999), lo que se traduce en altos costos e impactos ambientales asociados a esta técnica.

#### 1.4.5. Estabilización por tratamientos térmicos

El tratamiento térmico se ha utilizado para la estabilización de suelos durante muchos años, y se refiere a la aplicación de: (1) calor típicamente mediante la combustión de combustibles fósiles para mejorar las propiedades de los suelos arcillosos y (2) congelamiento artificial para el tratamiento temporal y estabilización de suelos, así como para la fractura de rocas (Nicholson, 2015).

El mejoramiento de suelos por calentamiento incluye la quema de productos derivados del petróleo directamente en perforaciones sobre el suelo y el calentamiento de la superficie usando calentadores móviles. En general, el calentamiento es un método efectivo de tratamiento del suelo solo para suelos de grano fino —arcilloso—, debido a que las altas temperaturas provocan cambios físicos permanentes en los minerales arcillosos, así como un efecto de secado por evaporación del agua. Los altos costos e impactos ambientales asociados al uso de productos derivados del petróleo limitan la aplicación de este tipo de procesos; sin embargo, es una técnica altamente efectiva en la remediación de suelos contaminados con compuestos orgánicos, inorgánicos y radiactivos (Terashi & Juran, 2000).

El congelamiento del suelo es una técnica que proporciona un aumento temporal de la resistencia y evita la filtración de agua. Se utiliza alrededor de cortes abiertos y excavaciones del terreno, apuntalamiento de estructuras existentes y túneles. A menudo, puede ser la mejor opción para realizar excavaciones profundas y pozos que se extienden por debajo del nivel freático. Se ha encontrado que los suelos congelados son materiales casi impermeables con resistencias del orden de 1 a 10 MPa, aunque estas propiedades dependen de varios factores como: tipo de suelo, contenido de agua, velocidad de congelación, temperatura del suelo congelado (Terashi & Juran, 2000).

#### 1.4.6. Refuerzos

Este tipo de mejoramiento de suelos es tal vez la técnica que ha obtenido mayor atención y desarrollo desde el área de la ingeniería civil y la geotecnia; permite lograr el mejoramiento de diversas propiedades del suelo a través de la inclusión de elementos en forma de fibras naturales o sintéticas, tiras de metal, clavos, anclajes, y micropilotes para suelos; estos elementos actúan como refuerzo y no producen reacciones químicas de importancia. El principio básico detrás de la mejora del suelo mediante el uso de geosintéticos es que los elementos de refuerzo absorben las cargas de tensión o el esfuerzo cortante dentro de la estructura y evitan así su falla debido al corte o deformación excesiva (Patel, 2019).

La mejora en las propiedades ingenieriles ocurre debido a la fricción desarrollada en la interfaz suelo-refuerzo y la resistencia pasiva que ocurre a través del desarrollo de esfuerzos transversales a la superficie de refuerzo y en una dirección normal al movimiento relativo del suelo reforzado. La contribución del elemento de refuerzo al mejoramiento del suelo depende de varios parámetros: la rugosidad de la superficie — fricción —, el esfuerzo efectivo normal, las dimensiones del refuerzo y el nivel de interacción suelo-refuerzo basado en las características del suelo, incluida la morfología del grano, la distribución del tamaño del grano, la densidad, el contenido de agua, la cohesión y la rigidez (Patel, 2019).

Dentro de los materiales fibrosos se encuentran dos técnicas: una que emplea fibras aleatoriamente distribuidas y otra que usa telas y mallas, conocidos como materiales geosintéticos. Cuando se emplean fibras no tejidas que se mezclan con el suelo se refieren a fibras aleatoriamente distribuidas, que pueden ser fibras naturales o fibras sintéticas. El uso de estas fibras puede mejorar las propiedades de algunos suelos. El desempeño del suelo estabilizado con fibras aleatoriamente distribuidas está fuertemente influenciado por el tamaño de la fibra, su longitud y diámetro, su densidad, la cantidad de fibra empleada para la mezcla y la adhesión o anclaje de estas al suelo.

#### 1.4.7. Estabilización química

La estabilización química de suelos consiste en el empleo de sustancias químicas para mejorar las propiedades ingenieriles de los suelos, reduciendo su plasticidad y haciéndolos más resistentes, ante la acción del tráfico y condiciones ambientales. En general el uso de aditivos químicos tiene como objetivo principal incrementar en el suelo tratado, en un espesor definido, la capacidad de soportar cargas sin deformación, y mejorar o reducir la pérdida de capa de rodadura o erosión por tráfico pesado o factores climáticos (Nicholson, 2015).

De acuerdo con la literatura la estabilización química de suelos produce ventajas como las siguientes:

- Mejora la calidad de los materiales marginales
- Incrementa la resistencia y la durabilidad
- Controla el cambio de volumen
- Mejora la trabajabilidad del suelo
- Reduce los requerimientos de espesor de los pavimentos
- Provee un suelo impermeable
- Reduce el polvo

Sin embargo, estas ventajas dependen tanto del tipo de estabilizante usado como del suelo a tratar, puesto que cada tipo de suelo puede presentar una reacción química distinta y, por tanto, generar modificaciones en diferentes características del material. En este sentido, se hace importante conocer las diversas opciones que existen para la estabilización de suelos por medios químicos, teniendo en cuenta que cada una de ellas deberá responder de manera eficaz a un tipo particular de suelo, siempre y cuando este sea previamente definido y se conozcan los requerimientos que demanda para su estabilidad (Rico Rodríguez & Castillo, 1998). En particular, los procedimientos de estabilización química de suelos suelen clasificarse en dos grupos: *métodos tradicionales de estabilización química* y *métodos no tradicionales de estabilización química*.

#### 1.4.7.1. *Métodos tradicionales de estabilización química*

Los métodos tradicionales de estabilización química de suelos comúnmente emplean cemento y cal, siendo sus mecanismos de estabilización similares: mediante reacciones puzolánicas. La reacción puzolánica consiste en la solubilización de los compuestos de sílice y alúmina amorfas o débilmente cristalizadas en un medio altamente alcalino, con la consecuente formación de aluminosilicatos dicálcicos y tricálcicos hidratados (Corzo Dardón, 2013), en la Figura 1.7 se esquematizan de manera sintetizada estas reacciones.

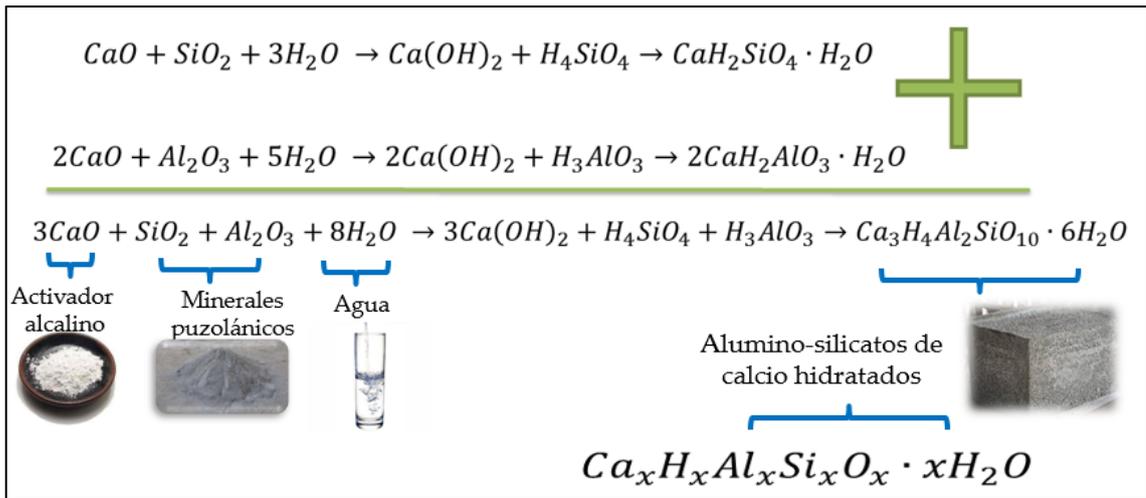
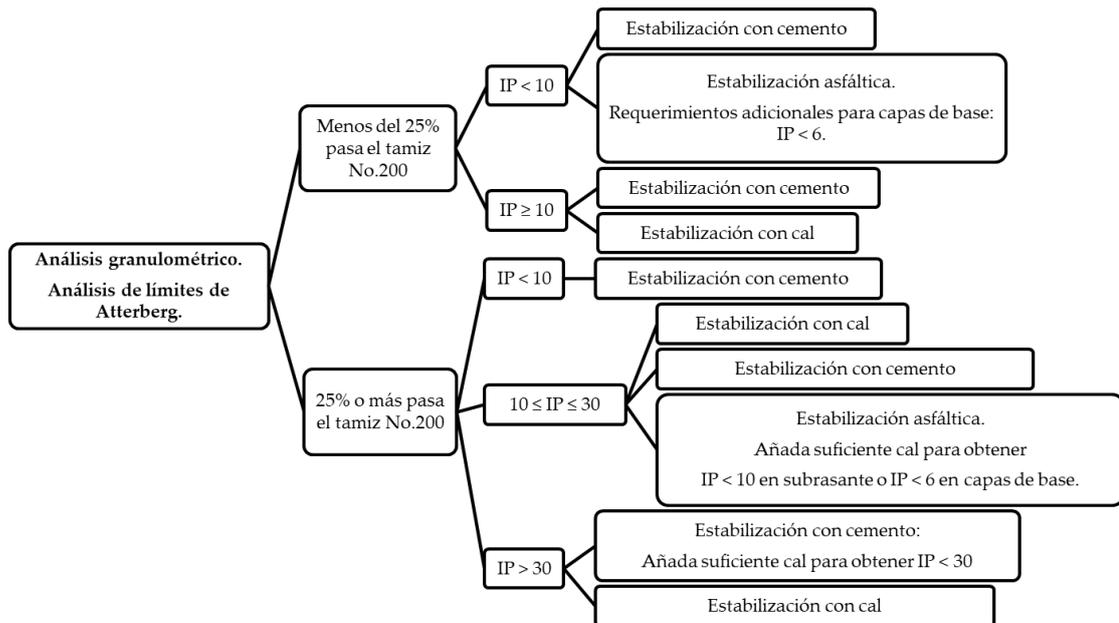


Figura 1.7. Síntesis esquemática de las reacciones puzolánicas

La manifestación o consecuencia de la reacción puzolánica en una arcilla es la formación de productos cementantes como los aluminosilicatos de calcio hidratados, los cuales presentan enlaces físicos mucho más fuertes que le transfieren a los materiales ventajas en el incremento del ángulo de rozamiento interno, en la resistencia a la penetración y en la resistencia a la compresión, logrando la transformación de suelos o materiales sueltos a conglomerados (Bauzá Castelló, 2015).

La adición de cal o cemento es efectiva en un amplio rango de tipos de suelos; sin embargo, algunos compuestos orgánicos pueden retardar o incluso inhibir las reacciones puzolánicas si se encuentran en porcentajes elevados en el suelo tratado. Además, se debe considerar que la presencia de sulfatos libres en suelos arcillosos puede ser perjudicial puesto que se favorecen otras reacciones simultáneas que dan como resultado la formación de minerales no deseados como es el caso de la etringita (Bielza Feliú, 1999).

En la Figura 1.8 se presenta un procedimiento, desarrollado por Currin et al (1976), para determinar rápidamente la viabilidad del uso de los productos tradicionales para estabilizar suelos o agregados marginales en función de las propiedades: índice de plasticidad y partículas pasantes el tamiz No. 200 —0.075 mm—. Sin embargo, esta es sola una orientación inicial sobre la cual se debe establecer un procedimiento de prueba de laboratorio más riguroso para confirmar el desempeño de cada tratamiento en un suelo específico (Mallela et al., 2004).



**Figura 1.8.** Determinación del tipo de estabilizador apropiado basado en el contenido de partículas que pasan la malla No. 200 y el índice de plasticidad del suelo (Currin et al., 1976)

Para este tipo de estabilizantes el factor más importante para lograr una alta calidad de los resultados es la realización de una buena mezcla de los aditivos con el suelo. La mejora en propiedades específicas del suelo puede variar en un amplio rango según el tipo de suelo, el curado, el tipo y la dosis del aditivo. En el caso de suelos de grano fino, plásticos y expansivos son típicos los tratamientos con cal de 3 al 8% en peso de suelo seco. El cemento portland en proporciones del 3 al 10% es particularmente útil en suelos granulares de baja plasticidad. En la Tabla 1.4 se muestran las propiedades típicas representativas obtenidas con cal y cemento como estabilizantes de suelos (Ingles & Metcalf, 1973), (Bielza Feliú, 1999) y en la Tabla 1.5 se recopila el estado del arte sobre el uso de estos materiales.

**Tabla 1.4** Propiedades representativas obtenidas con la estabilización de suelos usando cemento y cal (Bielza Feliú, 1999)

(a) PROPIEDADES TÍPICAS MEDIAS DE SUELO-CEMENTO*						
TIPO DE SUELO	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Mpa)	MÓDULO DE YOUNG, E (Mpa)	CBR (%)	PERMEABILIDAD	CONTRACCIÓN	COMENTARIOS
GW, GP, GM, GC, SW	6,5	$2 \times 10^4$	>600	Disminuye ( $\approx 2 \times 10^{-7}$ )	Despreciable	Demasiado duro, puede abrir fracturas
SM, SC	2,5	$1 \times 10^4$	600	Disminuye	Reducida	Material bueno
SP, ML, CL	1,2	$5 \times 10^3$	200	Disminuye ( $\approx 2 \times 10^{-9}$ )	Baja	Material regular
ML, CL, MH, CH	0,6	$2,5 \times 10^3$	<100	Aumenta	Moderada	Material pobre
CH, OL, OH, Pt	<0,6	$1 \times 10^3$	<50	Aumenta ( $\approx 1 \times 10^{-11}$ )	Alta	Difícil de mezclar, requiere mucho cemento

\*Valores al 10% en peso seco de contenido de cemento.

(b) PROPIEDADES TÍPICAS MEDIAS DE SUELO-CAL*							
TIPO DE SUELO	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Mpa)	MÓDULO DE YOUNG, E (Mpa)	CBR (%)	PERMEABILIDAD	CONTRACCIÓN LINEAL (%)	ÍNDICE DE PLASTICIDAD	COMENTARIOS
GW, GP, GM, GC, SW, SP	$\leq 0,3$	-	75	Aumenta ( $\geq 10^{-7}$ )	Nula	No plástico	Útil solo para reducir plasticidad
SM, SC	1,1	$< 1 \times 10^2$	50	Aumenta	Muy baja	<5	Material regular a pobre
ML, CL, MH, CH	2,5	$2 \times 10^4$	30	Aumenta	5	10	Material bueno
CL	3,5	$1 \times 10^3$	25	Aumenta ( $\leq 10^{-10}$ )	10	20	Material regular a bueno
OL, OH, Pt	$\leq 1,0$	$1 \times 10^2$	$\leq 10$	-	-	15	No es apropiado**

\*Los valores son el nivel óptimo de aditivo para los respectivos tipos de suelos

\*\*Los resultados pueden mejorarse por mezcla de cal con yeso

**Tabla 1.5.** Estado del arte sobre uso de estabilizantes tradicionales: cal y cemento

Referencia	Tipo de suelo	Dosificación (% en peso)	Observaciones
Sahoo & Pradhan, 2010	Suelo arcilloso expansivo rojizo	2%, 4%, 6%, 8% y 10% de cal	Se evaluó el desempeño del material mediante ensayos de CBR y resistencia a la compresión simple a diferentes tiempos de curado, se encontró un aumento máximo en la resistencia a los 14 días de curado y 8% de contenido de cal. Los aumentos en resistencia a la compresión y CBR en relación al suelo natural alcanzaron hasta el 600 y 170% respectivamente.

<p>Horpibulsuk et al., 2010</p>	<p>Arcilla limosa</p>	<p>3%, 5%, 7%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40% y 45% de cemento</p>	<p>Este artículo analiza la mejora en resistencia de una arcilla limosa estabilizada con cemento, se realiza además un estudio cualitativo y cuantitativo sobre la microestructura utilizando análisis SEM, medidas de distribución de tamaño de poro y análisis de gravedad térmica. Tres factores influyentes en esta investigación son el contenido de agua, el tiempo de curado y el contenido de cemento. Se encuentra que la adición de cemento no solo mejora la unión entre las partículas sino que también ha reduce el volumen de poros, haciendo del suelo un material más denso y de alta resistencia. Hasta el 10% de adición de cemento se encuentra un aumento significativo en la resistencia del suelo, para adiciones por encima del 30% se encuentra que ocurre una degradación en las propiedades geotécnicas del suelo.</p>
<p>Cuisinier et al., 2011</p>	<p>Suelo limoso de plasticidad baja-media</p>	<p>1.5%, 2 % y 3% de cal</p>	<p>El objetivo del estudio fue estudiar la influencia del tratamiento con cal sobre la microestructura y la conductividad hidráulica de un limo compactado. Mediante análisis de tamaño de poro se encontró que la cal induce la formación de poros pequeños — <math>&lt; 3 \times 10^{-3} \text{ \AA}</math> — en el suelo compactado; asimismo se encontró una disminución considerable en el peso máximo seco; se concluye que esto no está asociado a una modificación sustancial de la conductividad hidráulica del suelo la cual no presentó cambios considerables.</p>
<p>Mutaz et al., 2011</p>	<p>Suelo altamente expansivo con minerales de esmectita</p>	<p>4% y 8% de cal, 3% y 6% de cemento</p>	<p>Se evaluó la cal y el cemento como estabilizantes de un suelo altamente expansivo de Arabia Saudita. De los resultados obtenidos se puede concluir que los aditivos reducen el índice de plasticidad y la contracción lineal del suelo, con el consecuente aumento de la resistencia a la tracción, además de una disminución en la tensión volumétrica. En general, los sistemas estabilizados mejoraron las propiedades del suelo natural, siendo levemente superiores para el caso del cemento en particular la dosificación del 6%.</p>

<p>Kolay et al., 2011</p>	<p>Suelo altamente orgánico. Turba</p>	<p>5%-20% cemento, 5%-20% cal y 2%-8% de cenizas volantes</p>	<p>Este artículo describe un estudio sobre el mejoramiento de suelos tipo turba, altamente orgánico, mediante el uso de diferentes agentes estabilizadores: cemento portland ordinario OPC, cal viva QL y cenizas volantes de clase F FA. Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión no confinada UCS muestran un aumento significativo con el uso de los agentes estabilizadores utilizados y también con períodos de curado. Sin embargo, se encontró que el cemento produce un valor de resistencia más alto en comparación con los otros materiales; por tanto, se concluye que es el producto más adecuado para el tipo de suelo estudiado.</p>
<p>Kolay et al., 2013</p>	<p>Suelo altamente orgánico. Turba</p>	<p>5% de cemento, 5% de cenizas volantes, 2.6 % sulfato de aluminio y 2.6 sulfato de calcio</p>	<p>En este estudio se evaluaron las propiedades de un suelo altamente orgánico tratado cemento portland OPC, cenizas volantes FA y diferentes productos químicos como sulfato de aluminio y sulfato de calcio. Los resultados obtenidos muestran que los valores de resistencia a la compresión para el suelo tratado son mayores que para el suelo sin tratar, este resultado se presenta para todos los productos químicos evaluados. Adicionalmente, mediante análisis SEM le logró observar que el suelo natural presenta una estructura más porosa que los materiales aditivados. Finalmente, se concluye que la adición de productos cementantes con algunos productos químicos puede aumentar las propiedades físicas y de ingeniería de los suelos tropicales altamente orgánicos.</p>
<p>Al-Mukhtar et al., 2012</p>	<p>Suelo arcilloso</p>	<p>1%, 4% y 10 % de cal</p>	<p>En este estudio se encontró que las propiedades geotécnicas del suelo arcilloso cambian inmediatamente después del tratamiento con cal; se obtuvo una reducción significativa de la plasticidad y la presión de expansión seguida por un aumento en la resistencia a la compresión no confinada y la permeabilidad debido a la floculación de partículas. El análisis TEM y SEM también mostraron cambios texturales debidos a la floculación de las partículas, lo que se suma a los resultados de análisis DRX que evidenciaron la formación de productos de hidratación.</p>

<p>Dash &amp; Hussain, 2012</p>	<p>Suelo expansivo y suelo residual no expansivo</p>	<p>1%, 3%, 5%, 9% y 13% de cal</p>	<p>En este estudio se encontró un cambio significativo en propiedades como límite de líquido, límite de plástico, índice de expansión y resistencia de los suelos estudiados con las diferentes dosificaciones de cal. Estos cambios se atribuyen a la reducción de la doble capa difusa de los minerales arcillosos, el aumento del pH y cambios en la microestructura del suelo debido a la floculación de las partículas y formación de productos cementantes, estos cambios texturales se determinaron mediante análisis DRX y SEM. Adicionalmente, se encontró que para cada tipo de suelo existe un contenido óptimo de cal, más allá del cual se anulan los efectos cementantes con la consecuente degradación de las propiedades geotécnicas del suelo.</p>
<p>Negi et al., 2013</p>	<p>Suelo arcilloso</p>	<p>1%, 2%, 4% y 6% de cal</p>	<p>En este trabajo se ha estudiado el efecto de la cal en varias propiedades del suelo a diferentes tiempos, con un proceso de estabilización in situ. De acuerdo con los resultados se concluye que la cal actúa de inmediato y mejora varias propiedades del suelo, como la trabajabilidad, la capacidad de carga, la resistencia a la contracción en condiciones húmedas, reducción en el índice de plasticidad, aumento en el valor de CBR y posterior aumento en la resistencia a la compresión con el aumento del tiempo.</p>
<p>Ghobadi et al., 2013</p>	<p>Suelo arcilloso residual</p>	<p>1%, 3%, 5% y 7% de cal</p>	<p>En este trabajo se estudiaron propiedades geotécnicas y mineralógicas de un suelo arcilloso tratado con cal. De acuerdo con los resultados se encontraron mejoras en las características de compactación —densidad máxima y humedad óptima— y aumentos significativos de la resistencia a la compresión simple; los resultados de análisis DRX evidencian la formación de productos cementantes.</p>

<p>Farouk &amp; Shahien, 2013</p>	<p>Arena limosa</p>	<p>160, 200, 240, 300, 340 y 440 kg de cemento/m<sup>3</sup> de suelo seco —≈16.8%—</p>	<p>En este estudio, se evaluó el desempeño en laboratorio de dos suelos naturales tipo limo a los que se les agregó cemento y diferentes proporciones de agua; después del curado se evaluaron las muestras con ensayos de resistencia a la compresión no confinada. Los resultados obtenidos mostraron que la resistencia a la compresión de los suelos investigados no aumenta linealmente con el porcentaje de cemento: para las dosificaciones más altas de 440 y 340 kg/m<sup>3</sup> el comportamiento del material es frágil, mientras que para las dosis más bajas el comportamiento tiende a ser dúctil. Adicionalmente, se encontró que los resultados de la resistencia a la compresión no confinada presentan una disminución con el aumento de la relación agua/cemento.</p>
<p>Markou &amp; Droudakis, 2013</p>	<p>Suelo arenoso</p>	<p>Relaciones agua/cemento: 1, 2 y 3; adición de producto plastificante: 1.4% del peso seco del cemento</p>	<p>En esta investigación se estudiaron propiedades ingenieriles como la permeabilidad y la resistencia a la compresión no confinada de una arena a la cual se le agregó cemento. Los resultados obtenidos muestran un aumento significativo de la resistencia a la compresión simple de la arena con las lechadas de cemento y una reducción de la permeabilidad del material. De acuerdo con los resultados se concluye que la relación agua/cemento se debe mantener en 1:1 para evitar el sangrado de la lechada.</p>
<p>Ismail &amp; Ryden, 2014</p>	<p>Arcilla limosa</p>	<p>5%, 10% y 25% de cemento</p>	<p>En este trabajo se evaluó el efecto del cemento sobre las resistencias a la compresión y a la tracción no confinadas, los módulos de Young's y de corte de las muestras de suelo en diferentes períodos de curado; se encontró que todos los parámetros de resistencia de las muestras de suelos tratados con cemento aumentaron, obteniéndose una mayor resistencia de las muestras curadas a mayor tiempo —4 semanas—. Por otro lado, se llevaron a cabo, con fines cualitativos, análisis texturales y mineralógicos como SEM, EDX y DRX, los resultados obtenidos indicaron la formación de hidratos de sílice y alúmina junto con una estructura entretejida de la arcilla tratada con cemento.</p>

<p>Önal, 2015</p>	<p>Suelo blando orgánico</p>	<p>2%, 4%, 6%, y 8% de cal</p>	<p>El propósito de este artículo fue investigar un posible uso de cal para la estabilización de un suelo blando presente de base a los estanques de evaporación de sal. De acuerdo con los resultados de la prueba de pH y los límites de consistencia de los suelos estabilizados con cal, se determinó el 8% como contenido óptimo de cal. Mediante análisis DRX y SEM se verificó la presencia de los productos cementantes de las reacciones puzolánica a largo plazo para el contenido óptimo de cal.</p>
<p>Al-Taie et al., 2016</p>	<p>Suelo expansivo</p>	<p>2%, 3%, 4%, 6% y 8% de cal hidratada</p>	<p>El propósito de este trabajo fue evaluar el comportamiento ante ciclos de humedecimiento y secado —expansión y contracción— de un suelo expansivo compactado y tratado con diferentes dosificaciones de cal. Los resultados obtenidos indicaron que las muestras alcanzan el equilibrio después del tercer ciclo de humedecimiento y secado, además, se encontró que las muestras tratadas con cal disminuyeron significativamente la deformación máxima de la muestra respecto al suelo natural.</p>
<p>Jha &amp; Sivapullaiah, 2016</p>	<p>Suelo arcilloso con mineral montmorillonita</p>	<p>6% de cal</p>	<p>En este trabajo se estudió la influencia del contenido de yeso en el hinchamiento, la compresibilidad y la permeabilidad de un suelo montmorillonítico tratado con cal después del curado durante diferentes tiempos. Se encuentra que hay un hinchamiento inmediato en la inundación de muestras compactadas y se incrementa continuamente con el contenido de yeso. Sin embargo, los cambios en el hinchamiento son marginales con el curado. Esto se atribuye a la formación y el crecimiento de cristales de etingrita por reacciones iónicas de aluminio-calcio-sulfato en presencia de agua, lo que se confirma mediante microanálisis detallado. El mayor hinchamiento en las muestras no curadas y la reducción gradual en los períodos de curado se deben atribuyen a la formación de productos cementantes. Además, se encuentra que estos productos tienen una influencia significativa en el comportamiento de compresibilidad y permeabilidad del suelo.</p>

<p>Sharma et al., 2017</p>	<p>Arena arcillosa</p>	<p>1%, 3%, 5%, 7% y 9% de cal  1%, 3%, 5%, 7% y 9% de cemento</p>	<p>En este trabajo se evaluó el uso de la cal y el cemento como estabilizantes de un suelo de montaña clasificado como una arena arcillosa. Se evaluó el desempeño mecánico del suelo aditivado, con varias dosificaciones y diferentes tiempos de curado, mediante ensayos de resistencia a la compresión simple, límites de Atterberg y corte directo; adicionalmente, se realizó una caracterización mineralógica y textural mediante microscopía electrónica de barrido SEM, difracción de rayos x DRX y espectroscopía Infrarroja FTIR. Los resultados del estudio indicaron que los aditivos mejoran considerablemente las propiedades mecánicas del suelo, siendo mayor el efecto con el uso del cemento; por otra parte, los resultados de los análisis composicionales y texturales evidenciaron la formación de productos cementantes, resultado de las reacciones puzolánicas.</p>
<p>Harshita, 2018</p>	<p>Suelo arcilloso amarillento</p>	<p>4%, 6%, 8% y 10% de cal</p>	<p>En esta investigación se encontró que la adición de cal mejora significativamente las propiedades índice, la compactación y las características de resistencia del suelo estudiado. Los efectos del tratamiento con cal varían según la cantidad de cal que se mezcla con el suelo, en este estudio la adición de cal se realizó entre porcentajes de 0 a 10% y se obtuvo un aumento óptimo de las propiedades con un porcentaje de 8%.</p>
<p>Rudramurthy et al., 2019</p>	<p>Suelo arcilloso negro</p>	<p>4% de cal</p>	<p>Estos autores realizaron un estudio experimental para evaluar las propiedades geotécnicas de un suelo arcilloso estabilizado utilizando fibras poliméricas y cal. A partir de los resultados, se encontró que el contenido óptimo de cal y fibras de para lograr propiedades geotécnicas superiores fue de 4% y 1% respectivamente. Con esta combinación óptima, la resistencia a la compresión no confinada UCS aumentó en un 73.5%, la resistencia de la relación de soporte de California CBR en un 51.9% y la contracción lineal disminuyó en un 69% en comparación con el suelo natural.</p>

<p>Amini &amp; Ghasemi, 2019</p>	<p>Arena arcillosa</p>	<p>2%, 4% y 6% de cemento.  10%, 20%, 30% y 40% de escorias</p>	<p>En este trabajo, se investigaron los efectos de las escorias de magnesio y el cemento en los parámetros químicos, mecánicos y de microestructura del suelo. Los resultados obtenidos mostraron aumento en el pH al aumentar el contenido tanto de escoria de magnesio como de cemento, lo que indica una mejora en las condiciones del para el desarrollo de reacciones puzolánica. Además, con la adición de ambas sustancias se registró un aumento en la densidad seca máxima MDD, el contenido óptimo de humedad OMC y la resistencia a la compresión simple del material. Se concluye, para el suelo estudiado, que los contenidos óptimos de escoria y cemento son del 20% y 6% respectivamente. Al estudiar la microestructura con análisis DRX y SEM, se observó una mejora en la estructura del suelo con menos espacios entre las partículas, exhibiendo una matriz más densa y continua del material.</p>
<p>Taslimi Paein Afrakoti et al., 2020</p>	<p>Suelo arenoso</p>	<p>3% y 6% de cemento en peso seco del suelo.  5%, 10%, 15% y 20% de residuos de carbón en peso de cemento.</p>	<p>En esta investigación, se evaluó un residuo de carbón como aditivo para el tratamiento de un suelo arenoso con cemento. Para este propósito, se realizaron diferentes pruebas como Proctor estándar, resistencia a la compresión no confinada, resistencia a la tracción indirecta, pH y SEM. Los resultados de este estudio concluyen que la cantidad óptima de residuo de carbón es del 5% puesto que mejora las características mecánicas de las muestras que contienen 6% de cemento. Sin embargo, para muestras que contienen 3% de cemento, la adición del residuo reduce constantemente las propiedades mecánicas.</p>
<p>James, 2020</p>	<p>Suelo arcilloso</p>	<p>7% cal y diferentes proporciones de un lodo de prensado de la caña de azúcar</p>	<p>En este trabajo se determinó el contenido óptimo de cal — 7% en peso seco— en un suelo expansivo para producir la máxima resistencia, y se modificó con cuatro cantidades diferentes de un lodo del prensado de la caña de azúcar en pequeñas dosis —0.25% - 2%—. Los resultados demostraron que la modificación con el lodo condujo a una mejora sustancial en la resistencia a los 7 días y un aumento notable en la resistencia a los 28 días del suelo estabilizado con cal. Los análisis mineralógicos revelaron la formación de productos cementantes.</p>

Obianyo et al., 2020	Suelo laterítico	3%, 9% y 15% de cal / 5%, 10%, 15% y 20% de cenizas	Esta investigación tenía como objetivo lograr la utilización efectiva del suelo laterítico como material de construcción sostenible al mejorar su resistencia utilizando cal y cenizas. De acuerdo con los resultados la dosificación óptima fue de 9% de cal hidratada y 5% de cenizas; se evidenció un aumento significativo en la resistencia a la compresión del suelo, después de 28 días. El análisis microestructural por SEM dio una morfología con una porosidad reducida para las muestras de suelo estabilizado.
-------------------------	------------------	---	---

#### 1.4.7.2. Métodos no tradicionales de estabilización química

Los métodos tradicionales de estabilización emplean en sus procesos la inclusión de aditivos de naturaleza puzolánica; sin embargo, a nivel comercial se encuentra una amplia gama de familias químicas de estabilizantes, tal es el caso de: polímeros y resinas, organosilanos, aceites sulfonados, sales orgánicas, emulsiones enzimáticas, sales inorgánicas. El uso de estos materiales alternativos ha permitido el aprovechamiento una gran variedad de suelos que en su estado natural no cumplen con las especificaciones necesarias y son inadecuados para su uso en la construcción de infraestructura vial.

- Estabilización de suelos con aceites sulfonados

Los aceites sulfonados actúan como agentes catalizadores que promueven procesos de intercambio iónico; químicamente son compuestos orgánicos derivados de sulfuros y ácidos combinados. Dentro de su mecanismos de estabilización se ha encontrado que ionizan el agua aumentando su conductividad y facilitando el intercambio catiónico, puesto que la obliga a desprenderse de las partículas de arcilla y la convierte en agua libre, además, son capaces de intercambiar sus cargas eléctricas con los cationes adheridos a la superficie de las láminas de arcilla, a las que finalmente neutraliza y, obliga en forma permanente, a perder su aidez por el agua. De esta forma, los principales efectos que tiene el aceite sulfonado sobre los suelos de matriz arcillosa son: reduce espacios intersticiales, reduce la permeabilidad, incrementa la sedimentación, mejora la respuesta a la compactación y aumenta la densidad del suelo (Camacho Tauta et al., 2008).

En suelos de matriz arcillosa se caracteriza por reducir espacios intersticiales, reducir la permeabilidad, incrementar la sedimentación, mejorar la respuesta a la compactación y aumentar la densidad del suelo. Los estudios realizados con aceites sulfonados y la evidencia obtenida mediante ensayos realizados en campo, muestran que el sistema de estabilización electroquímica es una alternativa competitiva para disminuir el potencial

expansivo de los suelos arcillosos. No se han reportado efectos contaminantes por el uso de aceite sulfonado en las concentraciones utilizadas para esta aplicación (Camacho Tauta et al., 2010), en la Tabla 1.6 se muestra un estado del arte del uso de estos productos.

**Tabla 1.6.** Estado del arte sobre uso de estabilizantes no tradicionales: aceites sulfonados

Referencia	Tipo de suelo	Observaciones
Xiang et al., 2010	Arcillas expansivas	En esta investigación se evaluó un aditivo iónico líquido como estabilizante en suelos expansivos. Se realizan pruebas de corte directo, porcentaje de hinchamiento, potencial zeta y capacidad de intercambio catiónico. Los resultados mostraron que el aditivo disminuye los índices plásticos del suelo arcilloso lo que conlleva a un aumento de la resistencia al corte y una disminución de la contracción y el porcentaje de hinchamiento. Por lo tanto, se concluye que el aditivo es efectivo para controlar la inestabilidad de suelos arcillosos en presencia de agua.
Camacho Tauta et al., 2010	Arcillas expansivas	En este trabajo se evaluó el efecto de la radiación UV en arcillas expansivas tratadas con un aceite sulfonado; las muestras fueron preparadas con diferentes dosificaciones del aditivo y sometidas a diferentes tiempos de envejecimiento, como variable de respuesta se realizaron ensayos de límites de consistencia. Los resultados obtenidos permitieron observar que el aditivo genera una disminución en la plasticidad del material; sin embargo, esta disminución depende en gran medida del período de exposición y de la dosificación de aceite sulfonado utilizada.
Yi-min & Xiao-lan, 2011	Arcillas expansivas	En este trabajo se evaluó el uso potencial de un aditivo iónico tipo aceite sulfonado como estabilizante de suelos. De acuerdo con los resultados obtenidos se encontró que la inestabilidad volumétrica y el índice de plasticidad del suelo natural disminuyeron significativamente al ser tratados con el aditivo; además, la resistencia a la compresión y la estabilidad al agua del suelo estabilizado se mejoraron efectivamente. También se obtuvo una disminución en la capacidad de intercambio catiónico y el área de superficie BET del suelo tratado con el producto estabilizante; así mismo, se observó que el uso del aditivo generó cambios en la microestructura del suelo, la cual paso de ser una estructura en capas a una granulada.

<p>Zhao et al., 2013</p>	<p>Arcilla expansiva</p>	<p>En esta investigación se estudió el efecto de varios aditivos químicos como estabilizantes sobre una arcilla expansiva, los productos utilizados en este estudio incluyeron cal, un aditivo a base de potasio y un grupo de tres productos iónicos aceites sulfonados. Se realizaron pruebas de hinchamiento, pruebas químicas de Capacidad de Intercambio Catiónico y pruebas de succión del suelo para evaluar los efectos estabilizadores de los aditivos químicos evaluados. Los resultados de las pruebas indicaron que el estabilizador a base de potasio es un agente estabilizador efectivo para controlar el potencial de hinchamiento de la arcilla expansiva. Las pruebas químicas en la arcilla mostraron que el mecanismo estabilizador de los agentes iónicos se desarrolla a través del intercambio catiónico y el aumento de las concentraciones de cationes en el agua de los poros del suelo.</p>
<p>Zolfeghari Far et al., 2013</p>	<p>Suelos tropicales laterítico</p>	<p>El objetivo principal de este estudio fue evaluar el uso de aditivos químicos como: residuos de polímeros, cemento, cal y aceite sulfonado como estabilizantes de un suelo tropical. De acuerdo con los resultados obtenidos el suelo tratado con aceite sulfonado presentó un aumento de la resistencia a la compresión durante los tiempos evaluados. Además, se concluyó que este tipo de estabilizantes necesitan un tiempo de curado de algunos meses en condiciones secas para alcanzar su máxima resistencia; así mismo, se observó que el material tratado con aceite sulfonado presentó un mejor desempeño en suelos con mayores contenido de minerales arcillosos reactivos.</p>
<p>Onyejekwe &amp; Gurmel, 2015</p>	<p>Suelos arcillosos</p>	<p>En esta investigación se evaluó un aceite sulfonado y un polímero como estabilizantes en tres tipos de suelos con características arcillosas. Los resultados obtenidos indicaron que el rendimiento dependía tanto del tipo de suelo como de la dosis del estabilizador. En general se obtiene que el tratamiento no condujo a cambios sustanciales en los límites de Atterberg ni en la densidad máxima seca; sin embargo, si se obtuvo una reducción considerable en el contenido óptimo de humedad y en la capacidad de intercambio catiónico, así mismo se encontraron mejoras en la resistencia a la compresión simple y en el porcentaje de hinchamiento.</p>

<p>Tao et al., 2016</p>	<p>Suelo arcilloso</p>	<p>En este trabajo se evaluó el uso potencial de un aditivo iónico y su combinación con estabilizantes tradicionales cal y cemento como estabilizante de un suelo arcilloso; se realizaron pruebas de compactación, límites de Atterberg y pruebas de resistencia a la compresión no confinada en diferentes edades de curado y grados de compactación. Los resultados mostraron que el estabilizador iónico del suelo tiene un efecto significativo en la mejora de la resistencia a la compresión del suelo estabilizado.</p>
<p>Mousavi &amp; Karamvand, 2017</p>	<p>Suelo arcilloso</p>	<p>En este estudio se evalúa el uso de un aditivo iónico y arena de sílice como estabilizantes de un suelo arcilloso; para ello se realizaron ensayos de compactación Proctor, plasticidad, resistencia a la compresión no confinada, corte directo, pH, capacidad de soporte CBR y permeabilidad. Los resultados obtenidos mostraron que el aditivo químico evaluado genera un aumento en la resistencia a la compresión, la resistencia al corte y el CBR del suelo natural; asimismo, se obtuvo una reducción significativa en el índice de plasticidad, el pH y el coeficiente de permeabilidad. El diseño de mezcla óptimo encontrado para el suelo estudiado fue de 1% de aditivo iónico y 9% de arena de sílice.</p>
<p>He et al., 2018</p>	<p>Arcilla expansiva</p>	<p>En este trabajo, se evaluó un aditivo iónico líquido como estabilizante alternativo para controlar el comportamiento de hinchamiento y contracción de los suelos expansivos. Se realizaron pruebas de contracción lineal, hinchamiento unidimensional y resistencia a la compresión no confinada, antes y después del tratamiento con tres dosificaciones y cuatro períodos de curado diferentes. Los resultados de las pruebas indicaron que el aditivo es un estabilizante efectivo, que no solo reduce la hinchazón y la plasticidad del suelo, sino que también aumenta su resistencia mecánica. Adicionalmente, se realizaron análisis de microscopía electrónica de barrido con lo que se concluyó que el estabilizante funciona a través de la floculación de las partículas de arcilla ya que se observaron variaciones morfológicas significativas.</p>
<p>Soltani et al., 2019</p>	<p>Suelo arcilloso</p>	<p>En este trabajo se evaluó eficacia de un aceite sulfonado comercial en el tratamiento de un suelo altamente expansivo. De acuerdo con los resultados el aditivo evaluado modificó el comportamiento mecánico del suelo a través de mejoras logradas en las características de hinchamiento y resistencia.</p>

- Estabilización de suelos con aditivos enzimáticos

Las enzimas son productos orgánicos usados como alternativa para la estabilización de carreteras cuya formulación líquida enzimática, no tóxica y biodegradable mejora la calidad de las obras de ingeniería. Se ha encontrado que las enzimas catalizan la degradación de los materiales orgánicos en el suelo alterando favorablemente sus atributos físicos y químicos. Esto da como resultado una mejor unión química de partículas cohesivas de suelo y una estructura de suelos más estable y duradera. También debe tenerse en cuenta que las enzimas no se convierten ni forman parte del producto final sino que conservan sus características originales (Cedeño Plaza, 2013).

Es necesario acentuar que los productos enzimáticos usados para mejoramiento de suelos han sido orientados a suelos arcillosos con índices de plasticidad mayores a 10; además, en teoría y dependiendo el tipo de enzima, produce los siguientes efectos (Ravines Merino, 2010), (Hidalgo Benavides, 2016):

- Incrementa las densidades de compactación
- Mejora la capacidad portante
- Alarga la vida útil de las vías y carreteras
- Como actúa a manera de adhesivo alarga al tiempo de mantenimiento periódico y de la reposición de pérdidas del material pétreo
- La capa de rodadura tratada con enzimas puede soportar cargas superiores a las cargas normales de diseño
- Disminuye costos de procesos constructivos

En la Tabla 1.7. Se muestra un estado del arte del uso de estos productos.

**Tabla 1.7.** Estado del arte sobre uso de estabilizantes no tradicionales: enzimas

Referencia	Tipo de suelo	Observaciones
Ravines Merino, 2010	Suelo arcilloso	En este trabajo se evalúa el desempeño de un suelo arcilloso tratado con un aditivo comercial a base de enzimas orgánicas. Los resultados obtenidos demuestran que el aditivo evaluado genera mejoras significativas en las propiedades ingenieriles del suelo natural: aumento en la capacidad de soporte y resistencia; así como disminución en la absorción de agua y el hinchamiento.

<p>Peng et al., 2011</p>	<p>Diferentes tipos de suelos</p>	<p>En esta investigación se realizaron una serie de pruebas para evaluar el efecto de usar un aditivo enzimático como estabilizante de suelos y comparar su desempeño respecto al uso de cal viva como estabilizante tradicional. El análisis de los datos experimentales indicó que el tipo de suelo y las condiciones de curado influyen significativamente en el desempeño de los sistemas con aditivos. De acuerdo con los resultados obtenidos el producto enzimático presentó un mejor desempeño que la cal para las condiciones de curado al aire; sin embargo, para las condiciones de curado bajo humedad controlada los suelos tratados con cal presentaron mejores propiedades.</p>
<p>Cardoso Malko et al., 2014</p>	<p>Diferentes tipos de suelos arcillosos</p>	<p>Este estudio tiene como objetivo presentar una metodología para evaluar suelos estabilizados en laboratorio; para ello, se utilizó un simulador de tráfico portátil, de fácil manejo y común en los laboratorios de pavimento. Es un equipo estandarizado, utilizado para evaluar el efecto de la compresión y de las características de deformación de las capas de revestimiento asfáltico. A los suelos evaluados les fue adicionado productos enzimáticos; de acuerdo con los resultados el estudio concluyó que el equipo utilizado y los accesorios desarrollados son apropiados para este fin y que el uso de enzimas se mostró eficaz como estabilizante de los suelos estudiados.</p>
<p>Khan &amp; Taha, 2015</p>	<p>suelo residual clasificado como CL</p>	<p>En este estudio experimental, se utilizaron tres tipos de bioenzimas para mejorar un suelo residual clasificado como CL, para ello se evaluaron límites de Atterberg, ensayos de compactación, resistencia a la compresión no confinada, difracción de rayos X DRX, fluorescencia de rayos X XRF y microscopía electrónica de barrido de emisión de campo FESEM. En general los resultados no mostraron mejoras significativas en los límites de Atterberg, en las características de compactación ni en la resistencia a la compresión no confinada; sin embargo, las imágenes de FESEM revelaron un empaque más denso de partículas para muestras de suelo tratadas con dos de las bioenzimas.</p>

<p>Nizy Eujine et al., 2017</p>	<p>Dos minerales arcillosos: caolinita y bentonita</p>	<p>En este trabajo se evaluó el uso de cal, un aditivo enzimático y su combinación, como estabilizantes, sobre dos minerales arcillosos, representativos de suelos expansivos. Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión no confinada, límites de Atterberg y capacidad de soporte CBR. De acuerdo con los resultados obtenidos, se encontró que el sistema combinado cal-enzima presenta el mayor efecto en términos de mejora de resistencia mecánica de los materiales arcillosos; presentando mejores resultados en la arcilla caolinita.</p>
<p>Kushwaha et al., 2018</p>	<p>Limo arcilloso</p>	<p>En esta investigación se estudió el efecto de aditivo enzimático usado como estabilizante de un suelo fino; según los resultados obtenidos se encuentra que la adición de enzima —hasta 4%— al suelo aumenta la densidad seca máxima y disminuye el contenido óptimo de humedad. La dosificación óptima fue del 4%, lo que aumentó el CBR en 580.9% y la resistencia a la compresión en 578% durante un período de curado de 45 días.</p>
<p>AbouKhadra et al., 2018</p>	<p>5 tipos de suelos diferentes, arenosos y arcillosos.</p>	<p>En este estudio se evaluó el efecto de dos aditivos comerciales de naturaleza enzimática sobre la propiedades ingenieriles de cinco tipos de suelos diferentes, para ello se realizaron ensayos de compactación, permeabilidad, capacidad de soporte CBR, resistencia a la compresión no confinada UCS y fluorescencia de rayos X XRF. De los resultados se infiere que el uso de las preparaciones enzimáticas aumentó significativamente la resistencia del suelo fino, se encontró que la tasa de mejora era proporcional al contenido de arcilla en el suelo; adicionalmente el análisis XRF mostró un ligero aumento en el contenido de iones de sílice en los suelos tratados</p>

<p>Pooni et al., 2019</p>	<p>Suelo arcilloso expansivo</p>	<p>En este trabajo se estudió la durabilidad, con ciclos de humedecimiento y secado, de suelos expansivos a los cuales se les adicionó un producto estabilizante enzimático. Los resultados obtenidos mostraron que la resistencia de los suelos estabilizados aumentó considerablemente con la adición del producto enzimático, lo que revela su capacidad para mantener la rigidez del material ante la fluctuación de la humedad. Si bien las pruebas de humectación y secado tuvieron efectos perjudiciales en la resistencia, la estabilización con enzimas sirvió para mantener la resistencia del suelo de manera efectiva durante los ciclos de carga.</p>
<p>Cabezas &amp; Cataldo, 2019</p>	<p>Diferentes tipos de suelos: gravas, arenas, arcillas y limos</p>	<p>En esta investigación se evaluó el uso de tres aditivos de diferente naturaleza química — asfáltica, enzimática y polimérica— como estabilizantes en diferentes tipos de suelos. Con el fin de evaluar el desempeño de los materiales estudiados se realizaron ensayos de resistencia a la compresión no confinada, límites de Atterberg, resistencia al corte y CBR; los resultados obtenidos mostraron una alta dependencia con parámetros del suelo como índice de plasticidad, tamaño de partícula y humedad; se encontró un mayor efecto de los estabilizantes en suelos con bajo contenido de finos. Para cada aditivo estudiado se estimó una dosificación óptima, con las cuales se mejora significativamente las propiedades de los suelos estudiados.</p>

- Estabilización de suelos con polímeros y resinas

Los polímeros son materiales que presentan grandes estructuras moleculares que favorecen sus propiedades mecánicas, presentando mayor resistencia que otros compuestos de cadenas moleculares más cortas; esto se debe a las fuerzas de atracción de sus cadenas poliméricas las cuales dependen de la composición química del polímero, siendo la más común la fuerza de Van der Waals. En términos generales los polímeros son materiales de alta resistencia a la tensión, al impacto y a la fatiga (Cuipal Chávez, 2018).

En la aplicación específica para mejoramiento de suelos, los polímeros y resinas crean una unión covalente entre los centros activos del polímero y las partículas del suelo que genera una superficie hidrófoba la cual favorece la deshidratación del material; con la pérdida de humedad del suelo debido a la formación de largas cadenas de monómeros

presentes en este agente estabilizador, el polímero crea una fuerza de adhesión entre las partículas incrementando la cohesión y reduciendo la plasticidad del suelo, formando así una masa sólida y resistente.

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 permanente (Cuipal Chávez, 2018). En la Tabla 1.8 se muestra un estado del arte del uso de estos productos.

**Tabla 1.8.** Estado del arte sobre uso de estabilizantes no tradicionales: polímeros y resinas

Referencia	Tipo de suelo	Estabilizante	Observaciones
López-Lara et al., 2010	Suelo arcilloso	Emulsión acuosa de poliuretano	En esta investigación se evaluaron propiedades ingenieriles como compactación, resistencia al esfuerzo cortante, expansión propiedades índices y consolidación de un suelo arcilloso al cual se le adiciono un poliuretano. De acuerdo con los resultados obtenidos el uso del polímero estudiado reduce significativamente el índice de expansión y el coeficiente de permeabilidad del suelo natural; sin embargo no se encontraron mejoras en las propiedades de resistencia.
Fabre et al., 2010	Suelo orgánico	Resina natural 100% tanino vegetal	El objetivo de este trabajo fue evaluar la resistencia de suelos orgánicos del noreste argentino, una vez cumplido el proceso de estabilización con distintas resinas. Se realizaron ensayos de resistencia triaxial sobre probetas de suelo orgánico, natural y estabilizado. Los resultados indicaron un incremento en la resistencia mecánica del suelo estabilizado

<p>Naeini et al., 2012</p>	<p>Suelos arcillosos</p>	<p>Polímero acrílico</p>	<p>En este estudio se evaluó el efecto de adicionar polímeros sobre las propiedades de plasticidad y resistencia de suelos arcillosos. Las pruebas de laboratorio incluyeron análisis granulométrico, límites de Atterberg, pruebas de compactación y de compresión no confinada. Los resultados de las pruebas indicaron que el uso del polímero genera un aumento significativo en la resistencia de los suelos arcillosos.</p>
<p>Marto et al., 2013</p>	<p>Suelo laterítico</p>	<p>Emulsión polimérica</p>	<p>El objetivo de este trabajo fue evaluar los efectos de un aditivo polimérico en la estabilización de un suelo laterítico; para ello se realizaron pruebas de resistencia a la compresión no confinada y resistencia al cizallamiento. Los resultados obtenidos indicaron que el producto polimérico aumenta significativamente la resistencia a la compresión no confinada y la resistencia a la cizalladura del suelo estudiado.</p>
<p>Anagnostopoulos, 2015</p>	<p>Arena</p>	<p>Resina epóxica</p>	<p>El objetivo principal de esta investigación fue evaluar el uso potencial de una resina epóxica para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de un suelo arenoso. De acuerdo con los resultados se observa que el material aditivado aumenta significativamente la resistencia a la compresión simple con el tiempo y con la concentración de resina; adicionalmente la resistencia al corte de la arena tratada se multiplicó en comparación con la arena no tratada, aunque el ángulo de fricción se redujo debido a la pérdida de contacto entre los granos después del recubrimiento de resina.</p>

<p>Latifi et al., 2017</p>	<p>Arcillas</p>	<p>Goma de xantana —biopolímero de origen microbiano—</p>	<p>El objetivo de este trabajo fue determinar la viabilidad de utilizar la goma de xantana como un estabilizador ecológico para mejorar las propiedades ingenieriles de arcillas expansivas. De acuerdo con los resultados de resistencia y compresibilidad, se encontró que los contenidos de 1 y 1.5% de goma xantana eran niveles óptimos de uso del aditivos para las arcillas de montmorillonita y caolinita respectivamente. Las pruebas de análisis microestructural realizadas indicaron la formación de nuevos productos cementosos que resultan de las reacciones químicas; así mismo, se observó una disminución en la porosidad de las arcillas tratadas.</p>
<p>Georgees et al., 2017</p>	<p>Suelos arenosos y arcillosos</p>	<p>Poliacrilamida aniónica</p>	<p>El objetivo de este trabajo fue estudiar el uso potencial de la estabilización polimérica para mejorar las propiedades de ingeniería de tres tipos de suelos con aplicaciones viales; para ello se realizaron pruebas de resistencia a la compresión no confinada UCS, pruebas de conductividad hidráulica, microscopía electrónica SEM, pruebas de abrasión y erosión. Los resultados de las pruebas demostraron que tratar los suelos con el polímero estudiado se mejoran significativamente propiedades como la permeabilidad, la resistencia a la abrasión y a la erosión.</p>

<p>Rezaeimalek, Huang, et al., 2017</p>	<p>Suelo arenoso</p>	<p>Polímero de la familia genérica de los diisocianatos — poliuretanos—</p>	<p>El objetivo de este estudio fue determinar el método de curado y el diseño de la mezcla para lograr el mejor desempeño para la arena con el aditivo polimérico. De acuerdo con los resultados se sugiere que el curado de la muestra se realice durante 4 días al aire seguidos de 4 días en agua, este método de curado condujo a la máxima resistencia. Adicionalmente, se encontró que con una relación fija de polímero-agua, la resistencia de la arena estabilizada aumentó linealmente con el aumento de la cantidad de polímero agregado.</p>
<p>Soltani-Jigheh et al., 2018</p>	<p>Suelo de grano fino —limo plástico —</p>	<p>Poliacrilamida catiónica</p>	<p>En esta investigación se evaluó el desempeño de un suelo fino con un aditivo polimérico, se realizaron pruebas de compactación, resistencia a la compresión no confinada UCS, pruebas de congelación-descongelación y límites de Atterberg; adicionalmente, se realizaron análisis de microscopía electrónica de barrido FESEM, difracción de rayos X XRD, área superficial BET y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier FTIR. Los resultados mostraron un aumento rápido y significativo en la resistencia a la compresión simple del suelo tratado, la cual aumentó con la cantidad polímero adicionado; así mismo, se encontró una mejora en la durabilidad del suelo tratado sometido a ciclos de congelación-descongelación. Finalmente, los resultados de las técnicas instrumentales evidenciaron que el aditivo genera cambios en la estructura y textura del suelo natural.</p>

Zhou et al., 2019	Arcilla limosa	Polímero orgánico	En este trabajo se estudió la interacción entre un polímero orgánico y un suelo arcilloso, para ello se realizaron pruebas de infiltración, pruebas de estabilidad del agua y análisis de microscopía electrónica de barrido SEM con diferentes dosificaciones de la emulsión polimérica. Los resultados obtenidos mostraron una tasa de infiltración más lenta del material con aditivo respecto al suelo natural; así mismo, la estabilidad al agua del suelo aumentó con el contenido del aditivo. El análisis SEM mostró que la cantidad de polímero disminuyó con la profundidad de infiltración, es decir el polímero se encuentra en mayor concentración en la superficie del suelo en forma de sellante.
Liu et al., 2019	Suelo arenoso	Emulsión acuosa de poliuretano	En este trabajo se evaluó el efecto de un aditivo polimérico sobre una arena para el control de la erosión. Los resultados indicaron que el tratamiento con el polímero puede aumentar significativamente la resistencia al corte, la compresión no confinada y la resistencia a la tracción de la arena natural.
Panova et al., 2020	Suelo arenoso	Mezcla de polímeros iónicos	En esta investigación se estudió el uso de aditivos poliméricos para controlar la erosión de suelos arenosos. De acuerdo con los resultados obtenidos se concluye que el uso de polímeros iónicos permite mejorar la resistencia a la erosión de los suelos arenosos.

- Estabilización de suelos con organosilanos

Los silanos son compuestos de silicio monoméricos con cuatro grupos sustituyentes unidos al átomo de silicio. Estos grupos sustituyentes pueden ser casi cualquier combinación de grupos reactivos, inorgánicamente reactivos u orgánicamente reactivos. La reactividad inorgánica representa los enlaces covalentes formados a través de oxígeno al átomo de silicio para formar un tipo de enlace siloxano. La reactividad orgánica se produce en la porción orgánica de la molécula y no implica

directamente al átomo de silicio. Este gran número de posibles combinaciones explica la versatilidad del silicio y su capacidad de ser utilizado en una variedad de formas con los productos químicos a base de carbono (Daniels & Hourani, 2009) (Xiameter from Dow Corning, 2009).

Por consiguiente, los silanos son materiales versátiles usados en una amplia gama de aplicaciones: como promotores de adhesión, agentes de acoplamiento, agentes de reticulación, agentes dispersantes y modificadores de superficie. Este último, es el que toma mayor importancia en la aplicación específica de mejoramiento de suelos; así, la modificación superficial de minerales con silanos puede traer consigo varios beneficios como:

- Repelencia al agua
- Mejorar la durabilidad a largo plazo
- Disminuir la permeabilidad
- Mejorar la apariencia
- Mejora la resistencia química y al agua
- Incremento de las propiedades mecánicas
- Reduce daños por los ciclos de hielo y deshielo

Los minerales pueden ser tratados con el organosilano puro o una solución de este en agua y/o alcohol, es importante que el silano pueda recubrir de manera uniforme el material, para esto se suele emplear una mezcla intensiva (Xiameter from Dow Corning, 2009). Por lo general, los organosilanos deben someterse a un proceso de hidrólisis antes de realizar el tratamiento sobre la superficie; es de aclarar que en la mayoría de casos el agua necesaria para la hidrólisis del silano puede estar disponible en la humedad atmosférica o en la superficie del sustrato; sin embargo en algunos casos, puede ser necesario añadir agua para aumentar el grado de hidrólisis. Como resultado del proceso de hidrólisis se forma un grupo silanol  $\text{—Si—OH—}$  que es reactivo y tiene la capacidad de condensarse con otros grupos silanol formando enlaces siloxanos  $\text{—Si—O—Si—}$  y formando capas individuales ensambladas, las cuales permiten que se formen grupos de silanol intermedios, lo que genera una superposición de capas, estos grupos orgánicos tienen una larga cadena de alquilo, que es responsable de generar propiedades hidrofóbicas a la superficie tratada. Adicionalmente estos grupos reaccionan con grupos hidroxilo libres de la superficie, inmovilizando covalentemente el organosilano. Este proceso de fijación del organosilano sobre la superficie de un mineral se puede observar en la Figura 1.9 (Witucki, 1993), (Sadler & Vecere, 1995), (Colmenares Roldán, 2015).

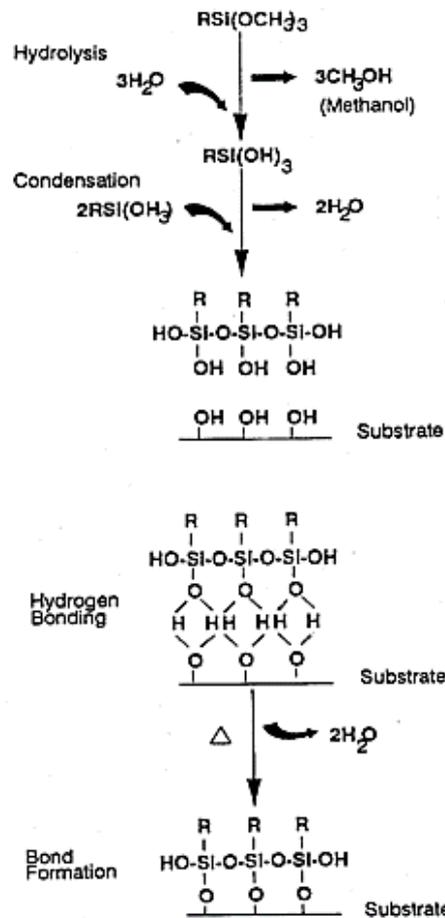


Figura 1.9 Proceso de fijación del silano sobre la superficie mineral (Colmenares Roldán, 2015)

La elección del organosilano que ha de ser utilizado en una aplicación particular está determinada por la naturaleza del silano y las propiedades deseadas en el suelo, ya que no todos los silanos tienen las mismas propiedades, ni reaccionan de la misma forma en presencia de agua. Existen distintos tipos de organosilanos que se clasifican según su uso (Rodríguez Pardo, 2017). Si el tratamiento con silano está diseñado para proporcionar hidrofobicidad a la superficie, sería adecuado emplear un silano con un grupo hidrófobo, tal como el butilo, octilo, fluorocarbono, o fenil. Si el tratamiento con silano está diseñado para proporcionar la compatibilidad del mineral con una matriz polimérica, se debe seleccionar un Silano con una terminación orgánica similar al polímero, por ejemplo, un grupo Octilo o un grupo alquilo de cadena más larga ayudará proporcionar compatibilidad y dispersabilidad del mineral en una matriz de poliolefina (Witucki, 1993), en la Tabla 1.9 se muestra un estado del arte del uso de estos productos.

**Tabla 1.9.** Estado del arte sobre uso de estabilizantes no tradicionales: organosilanos

Referencia	Tipo de suelo	Observaciones
Songt & Sandí, 2001	Suelos arcillosos	En este trabajo se evaluaron las propiedades superficiales de arcillas tratados con organosilano, para ellos realizaron análisis de difracción de rayos X DRX, análisis termogravimétrico TGA, mediciones de área superficial y espectroscopía de estructura fina de absorción de rayos X en el borde cercano NEXAFS. Los resultados evidenciaron que el producto evaluado genera una especie de encapsulamiento de las partículas arcillosas mediante la formación de un recubrimiento hidrófobo. Adicionalmente, se encontró una reducción considerable en el área superficial —en un 75-90%— para las arcillas modificadas con el organosilano, lo cual es coherente con la existencia de un recubrimiento superficial
Daniels & Hourani, 2009	Suelos residuales	En este trabajo se evaluó la influencia de un organosilano en las características de compactación, resistencia mecánica, hinchamiento, propiedades erosivas e hidráulicas de varios suelos. Los resultados obtenidos mostraron una reducción significativa en la capacidad de infiltración y de la masa erosionada de los suelos evaluados; sin embargo la fuerza y el potencial de hinchamiento no presentaron mayores cambios.
Lekha et al., 2013	Suelo laterítico —arena arcillosa—	En esta investigación se estudió la efectividad de un aditivo químico comercial —organosilano— en la estabilización de un suelo arcilloso; para ello se evaluaron propiedades ingenieriles, tanto del suelo natural como del suelo tratado, tales como propiedades de índice, pruebas de compactación, resistencia a la compresión no confinada, relación de soporte de California CBR y el comportamiento a la fatiga. Los resultados obtenidos indicaron que hay una mejora en todas las propiedades con la adición del aditivo
Jerez et al., 2018	Suelo laterítico —arena arcillosa—	En esta investigación, se determinó la mejora del comportamiento mecánico de un suelo laterítico, después de la adición de un compuesto hidrófobo —organosilano—. Se evaluaron propiedades tales como la densidad máxima seca, el CBR y el coeficiente de permeabilidad k. De acuerdo con los resultados el CBR del material con aditivos alcanzó valores 533% más altos que el suelo natural; asimismo, se obtuvo una disminución en el coeficiente de permeabilidad k del 41% con respecto al material natural.

## 1.5. Intemperismo natural y acelerado

El intemperismo natural es el proceso que provoca una transformación química, física o biológica en los materiales expuestos a las condiciones climáticas, sol, lluvia, viento, humedad, cambios de temperatura. El sol que emite radiación de onda corta desde el infrarrojo hasta el ultravioleta; la humedad y la temperatura afectan la estructura de los materiales expuestos a estos agentes, coadyudando al incremento de su degradación en el tiempo.

De otro lado, el intemperismo acelerado es el proceso que provoca una transformación química más rápida de los materiales cuando se someten a fenómenos que simulan las condiciones naturales en el laboratorio. Para llevar a cabo estos procesos de envejecimiento se han desarrollado cámaras de prueba llamadas «Cámaras de envejecimiento acelerado», como la mostrada en las fotografías de la Figura 1.10; estos equipos permiten lograr en menor tiempo los cambios que se presentan en dicho material por una exposición natural prolongada, al simular condiciones de radiación UV, temperatura y humedad relativa. De esta forma se obtiene información de la evolución de los materiales en el tiempo en un corto plazo, posibilitando el cálculo del tiempo que resiste un material expuesto a estas condiciones contra el tiempo real al que se enfrenta en condiciones de uso diario. (Orozco Esponisa, 2010).



**Figura 1.10.** Cámara de envejecimiento acelerado

En las cámaras de envejecimiento acelerado QUV es posible controlar las condiciones simuladas: radiación UV, temperatura y humedad relativa, lo que garantiza la repetitividad y evaluación a diferentes tiempos de exposición. Además, teóricamente se puede determinar el tiempo necesario de exposición en cámara que simule una cantidad de irradiación total acumulada correspondiente a la recibida en campo en un periodo de tiempo determinado. (Camacho Tauta et al., 2010).

Se debe tener en cuenta que la sinergia entre la radiación ultravioleta UV y la humedad incrementa la potencialidad de las pérdidas de propiedades mecánicas por la erosión de la superficie y el aumento de la capacidad de humectación superficial; por lo tanto, la exposición a la radiación UV y al agua es más perjudicial que solo a la radiación UV (Fuentes-Talavera et al., 2015). Para simular este proceso las cámaras QUV cuentan con lámparas fluorescentes que emiten radiación UV crítica de ondas cortas y reproducen el daño a las propiedades físicas causado por la luz; con un sistema de condensación se simula el rocío y se acelera su efecto mediante el uso de una temperatura elevada; también es posible simular procesos de evaporación y condensación del agua en las muestras.

Este método de intemperismo acelerado ha sido normalizado y estandarizado para algunos materiales de acuerdo con las siguientes normas:

- ASTM G 154-16: Práctica estándar para operar aparatos de lámpara fluorescente ultravioleta UV para la exposición de materiales no metálicos (ASTM G154, 2016)
- ASTM D4799: Práctica estándar para procedimientos y condiciones de ensayo de envejecimiento acelerado para materiales bituminoso (ASTM D4799 / D4799M, 2017)
- ASTM D5272-08: Práctica estándar para ensayo de exposición en el exterior de plásticos fotodegradables (ASTM D5272 - 08(2013) , 2013)
- ABNT NBR 15380/2015: Norma Brasileña que describe el método para simular en laboratorio el envejecimiento acelerado de pinturas y barnices (ABNT NBR 15380:2015, 2015)
- AAMA 2603: Especificación voluntaria, requisitos de desempeño y procedimientos de ensayo para recubrimientos orgánicos pigmentados en paneles y extrusiones de aluminio (AAMA 2603, 2017)
- AATCC TM111: Método para determinar resistencia a la intemperie de textiles, exposición a la luz diurna y a la intemperie (AATCC -TM 111, 2015)
- ASTM C1589: Práctica estándar para el envejecimiento en exteriores de sellos y selladores para construcción (ASTM C1589 / C1589M , 2018)
- ASTM C732: Método de ensayo estándar para los efectos de desgaste del envejecimiento artificial en selladores de látex (ASTM C732 , 2017)
- ASTM D1670: Método de ensayo estándar para el punto final de falla en el envejecimiento acelerado y en exteriores de materiales bituminosos (ASTM D1670 / D1670M - 11(2018) , 2018)
- ASTM D4329: Práctica estándar para exposición de plásticos a la luz fluorescente ultravioleta UV (ASTM D4329 , 2013)
- ASTM D4587: Práctica estándar para exposiciones a la luz fluorescente ultravioleta UV y condensación, de pintura y recubrimientos asociados (ASTM D4587 - 11(2019)e1 , 2019)

- ASTM D5010: Guía estándar para ensayos de tintas de impresión y materiales asociado (ASTM D5010 , 2008)
- ASTM D5208: Práctica estándar para exposición de plásticos fotodegradables a la luz fluorescente ultravioleta UV (ASTM D5208 , 2014)
- ASTM D5819: Guía estándar para la selección de métodos de ensayo para la evaluación experimental de la durabilidad de geosintéticos (ASTM D5819 , 2021)
- ASTM F1164: Método de ensayo estándar para la evaluación de plásticos transparentes expuestos al envejecimiento acelerado combinado con esfuerzo biaxial (ASTM F1164 , 2019)
- GM 9125P: Procedimientos para la exposición acelerada en laboratorio de materiales automotrices (GM-9125P, 2011)
- ISO 11507 (EN) (DIN): Pinturas y barnices - Exposición de recubrimientos al envejecimiento artificial - Exposición a las lámparas fluorescentes ultravioletas UV y agua (ISO 11507, 2007)

Entre los estudios encontrados se destaca el uso del intemperismo acelerado en materiales tales como:

- Polímeros: Diseño y construcción de una cámara de envejecimiento acelerado para polímeros (Orozco Esponisa, 2010); Evaluación del Comportamiento al intemperismo natural de compositos polipropileno-madera (Fuentes-Talavera et al., 2015); Evaluación de la fotodegradación de poliolefinas por exposición natural y artificial. (Fechine et al., 2006); Estudio de intemperismo acelerado de películas de polietileno extruido (Lizárraga Laborín et al., 2018); Envejecimiento de termoplásticos: comparación de exposiciones al aire libre y al arco de xenón (Kuvshinnikova et al., 2018); Caracterización de fenómenos superficiales: sondeo de la degradación en etapa temprana de películas de polietileno de baja densidad. (Garnai Hirsch et al., 2019); Parámetros de intemperismo acelerado para algunos termoplásticos (Pickett et al., 2019).
- Maderas: Evaluación de los efectos del intemperismo en el color y calidad de superficie de varios tipos de madera en Costa Rica (Valverde Otárola, 2011); Estimación de la vida útil de dos barnices para exteriores mediante intemperismo artificial en madera de aile, pino y encino (Urias et al., 2002); Efectos del intemperismo acelerado en la propiedades físico-mecánicas de compuestos plástico-bambú (Suárez Landeo et al., 2019); Efectos de intemperismo acelerado sobre el color, la biodegradabilidad y las propiedades térmicas de los compuestos híbridos de bambú reforzado con fibras (Chee et al., 2019).
- Semillas: Estudio de la germinación y longevidad de semillas usando envejecimiento acelrado (González Hernández, 2013); Determinación de la dosis

de nitrógeno y número de riesgo en el rendimiento y calidad de la semilla de algodón usando envejecimiento acelerado (Gil et al., 2003).

- Materiales metálicos y de construcción: Estudio de la resistencia al clima tropical de aceros galvanizados con y sin recubrimiento mediante ensayos de envejecimiento acelerado. (Suárez-Corrales et al., 2014); Estudio interlaboratorio de un método de envejecimiento acelerado para materiales de techado (Sleiman et al., 2015); Efectos del ensuciamiento y la intemperie en materiales de construcción (Paolini et al., 2020).
- Mezclas asfálticas: Estudio del efecto de la radiación ultravioleta en las propiedades mecánicas y dinámicas de una mezcla asfáltica (Reyes Ortiz & Camacho Tauta, 2008); Estudio y evaluación de materiales compuestos de matriz asfáltica modificado con polímeros MAP para su aplicación como recubrimientos anticorrosivos (Echeverría & Echeverría, 2007); Análisis químico de la superficie y el volumen de asfaltos envejecidos con un equipo de intemperismo acelerado y con métodos de envejecimiento estándar (Menapace et al., 2017).
- Pigmentos y recubrimientos: Evaluación del intemperismo acelerado en colorantes naturales para construcciones civiles (Faria, 2015); Degradación de la resistencia al rayado de recubrimientos transparentes por intemperismo natural (Kumano et al., 2019); Exposición al intemperismo natural e intemperismo acelerado de recubrimientos híbridos de poliuretano / polisiloxano (Gao et al., 2019); Investigación de reticulación, propiedades mecánicas y estabilidad a la intemperie del recubrimiento de poliuretano acrílico reforzado con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> obtenidas a partir de cenizas de cáscara de arroz (Mai Anh Bui et al., 2020).

Para el caso de estabilizantes químicos y sistemas de aditivos estabilizante/suelo este tipo de estudios son escasos; entre ellos cabe mencionar dos en los que se usan estas técnicas para el curado y envejecimiento de un suelo arcilloso tratado con un aditivo químico tipo aceite sulfonado (Camacho Tauta et al., 2008), (Camacho Tauta et al., 2010); y otra investigación en la que se evaluó la durabilidad por varias técnicas, entre las que se usó el envejecimiento en cámara de intemperismo acelerado QUV de un suelo arenoso tratado con un producto polimérico (Rezaeimalek et al., 2017).

## 2. CAPÍTULO II: desarrollo experimental

### 2.1. Introducción

La estabilización química se presenta como una solución técnica, económica y ambientalmente sostenible que consiste en el uso de sustancias químicas para mejorar las propiedades ingenieriles del suelo tales como resistencia y capacidad de carga, inestabilidad volumétrica, relación de vacíos, plasticidad, compresibilidad, permeabilidad, erosionabilidad y durabilidad (Nicholson, 2015), (Petry & Little, 2002). Los productos químicos empleados pueden clasificarse, según su naturaleza química, en: puzolanas, polímeros y resinas, organosilanos, aceites sulfonados, emulsiones enzimáticas, sales y emulsiones asfálticas (Kestler, 2009), (Jones & Surdahl, 2014).

Una de las propiedades que se evalúa en la selección de un determinado producto para estabilización química de suelos es la durabilidad, que está relacionada con la resistencia al intemperismo, a la erosión o a la abrasión del tránsito de aquellos suelos que constituyen la superficie de rodadura (Camacho Tauta et al., 2010). Los suelos pueden sufrir desgaste por factores 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 las propiedades del suelo. La evaluación bajo ambientes naturales de estos efectos sobre el comportamiento del suelo es un proceso que requiere de tiempos prolongados de exposición a estas condiciones climáticas, lo que contrasta con las dinámicas del sector de la construcción.

De acuerdo con lo anterior, es de gran interés desarrollar metodologías mediante las cuales sea posible acelerar el posible deterioro que sufren los suelos expuestos a las condiciones anteriormente mencionadas; que permitan predecir su estado y desempeño en el tiempo pero con una capacidad de respuesta más rápida y obtención de resultados en tiempos cortos. Las cámaras de intemperismo acelerado posibilitan simular en forma controlada condiciones de radiación UV, temperatura y humedad relativa, lo que garantiza la repetitividad y evaluación a diferentes tiempos de exposición (Tonoz et al., 2006). De esta forma, en semanas se pueda reproducir el daño que sufre el suelo al estar expuesto por períodos prolongados a condiciones de intemperismo natural.

La metodología implementada en el presente estudio tiene un enfoque cuantitativo, ya que se plantea la medición o cuantificación de las variables del estudio en función de su magnitud, extensión o cantidad; y utiliza herramientas de las matemáticas y la estadística, evaluando las sucesivas repeticiones de unidades experimentales teniendo

en cuenta la dosificación de los diferentes productos y las condiciones de intemperismo a las cuales fueron expuestas(Gigat et al., 2018).

La investigación desarrollada es de tipo comparativa, puesto que se buscó la identificación de diferencias o semejanzas con respecto a la aparición de un evento en dos o más contextos: dosificación de productos y exposición a intemperismo, y también proyectiva, dado que se plantea una propuesta o modelo de evaluación de estos materiales y se aporta a una problemática en particular.

Los métodos de estudio desarrollados son de tipo empírico-analítico y antes-después, dado que la metodología desarrollada permite interpretar y comprender el fenómeno de estudio dentro de un contexto, y también realizar las mediciones del objeto de estudio antes y después de la aplicación de un estímulo.

En síntesis el desarrollo experimental de este estudio permite abordar soluciones para la implementación, evaluación y estandarización de productos y tecnologías de estabilización fisicoquímica que brindan soluciones sostenibles para la construcción de infraestructura vial, aportando al abanico de soluciones estructurales y no estructurales de intervención sobre la red vial y a potenciar la viabilidad de la implementación de estas alternativas a mayores escalas.

## 2.2. Materiales

Para el estudio llevado a cabo se usaron los siguientes materiales:

- SUELO

Se empleó un suelo 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 las propiedades ingenieriles requeridas por una vía o carretera. Evidentemente esa condición conduce a la mala transitabilidad de este camino, tal como se puede observar en las fotografías mostradas en la Figura 2.1



Figura 2.1. Fotografías del corredor vial seleccionado para el estudio

El suelo muestreado, aproximadamente 600 kg, fue tomado del estrato superior de un apique realizado a un (1) metro de profundidad en un punto crítico de la vía sin aporte de material de préstamo. Las muestras fueron disgregadas en el laboratorio, secadas al aire durante aproximadamente 45 días y almacenadas en costales para su posterior caracterización y evaluación con los aditivos químicos, Figura 2.2.



Figura 2.2. Fotografías de la toma de suelo, preparación y secado en laboratorio

- **ADITIVOS COMERCIALES**

Para esta investigación, y teniendo en cuenta estudios anteriores desarrollados por el grupo de investigación (Gobernación de Antioquia, 2015), (Colciencias, 2018), se seleccionaron 5 productos estabilizantes comerciales de diferente naturaleza química: polímeros, aceites sulfonados, organosilanos, enzimas y puzolanas. Adicionalmente, se evaluaron la cal y el cemento como estabilizantes químicos tradicionales. A continuación se describe cada uno de los productos seleccionados con sus características fisicoquímicas básicas.

1. *Polímero*: estabilizante de suelos de naturaleza polimérica, que consiste en una emulsión acuosa de polímeros de acetato vinílicos y acrílicos. Sus principales características físicas y químicas se muestran en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1.** Propiedades fisicoquímicas del producto polimérico. *Fuente:* ficha de datos de seguridad del producto comercial

PROPIEDAD	RESULTADO
Temperatura de ebullición	100°C
Presión vapor a 20°C	17 mm Hg
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	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 7.0

2. *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 2.2.

**Tabla 2.2.** Propiedades fisicoquímicas del aceite sulfonado. *Fuente:* ficha de datos de seguridad del producto comercial

PROPIEDAD	RESULTADO
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.10
Solubilidad en agua	Soluble
Apariencia general	Líquido verde oscuro
pH	1
Viscosidad (cps)	300/386

3. *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 2.3.

**Tabla 2.3.** Propiedades fisicoquímicas del organosilano. *Fuente:* ficha de datos de seguridad del producto comercial

PROPIEDAD	RESULTADO
Punto de inflamación	>90 °C en recipiente cerrado
Punto de ebullición	200°C
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	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

4. *Enzima:* estabilizante de suelos de naturaleza enzimática, compuesto de una combinación de enzimas, electrolitos y agentes tensoactivos. Sus principales características físicas y químicas se muestran en la Tabla 2.4.

**Tabla 2.4.** Propiedades fisicoquímicas del producto enzimático. *Fuente:* ficha de datos 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

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 2.5.

**Tabla 2.5.** Propiedades fisicoquímicas del producto puzolánico. *Fuente:* ficha de datos de seguridad del producto comercial

PROPIEDAD	RESULTADO
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2 200-2 500
Solubilidad en agua	Disolución muy lenta
Apariencia general	Sólido grisáceo
pH en solución acuosa	10-12

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 2.6.

**Tabla 2.6.** Propiedades fisicoquímicas de la cal. *Fuente:* ficha de datos de seguridad del producto comercial

PROPIEDAD	RESULTADO
CaO + MgO Min.	90%
CO <sub>2</sub> Max.	5%
Reactividad ( $\Delta T$ 20min) Min.	30°C
Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	+/- 1
Pasante 25mm	100%
Residuo Max.	10%

7. *Cemento:* En este estudio se empleó cemento tradicional tipo Pórtland. Sus principales características físicas y químicas se muestran en la Tabla 2.7.

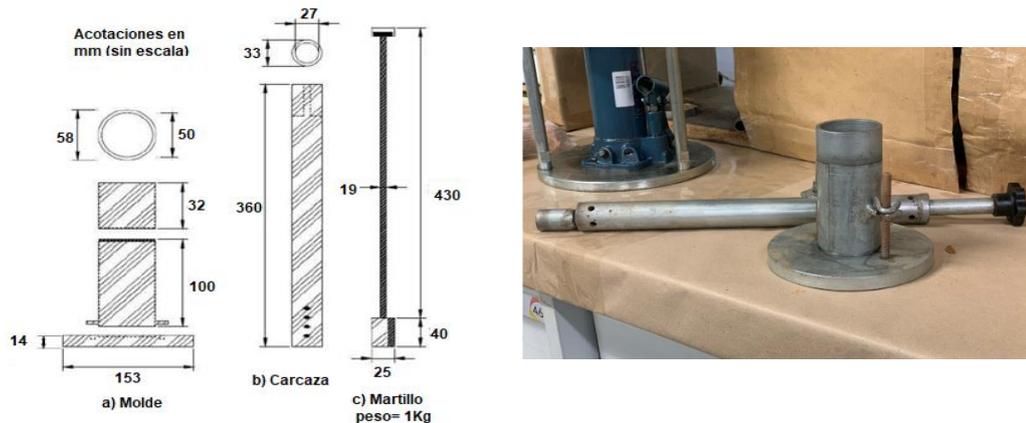
**Tabla 2.7.** Propiedades fisicoquímicas del cemento Pórtland. *Fuente:* ficha de datos de seguridad del producto comercial

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

### 2.3. Equipos y montajes diseñados y fabricados para el desarrollo experimental

#### 1. *Moldes para compactación de probetas cilíndricas*

Fabricación de molde y martillo para compactación de probetas cilíndricas de 5 cm de diámetro por 10 cm de altura, de acuerdo con las especificaciones para realizar ensayos de resistencia a la compresión simple, tal como se muestra en Figura 2.3. Todas las piezas fueron construidas en acero zincado; el molde está formado por dos mitades para permitir la extracción de la muestra sin perturbarla, con collar y fijación a la base de forma segura. Por medio de abrazaderas se garantiza la hermeticidad, la centricidad y una fuerte sujeción a la base para evitar que se abra al momento de compactar la muestra.



**Figura 2.3.** Molde y martillo para compactación de probetas cilíndricas de 5 cm x 10 cm. Acotaciones de la figura en mm (sin escala).

## 2. Molde para compactación de probetas rectangulares

Diseño y fabricación de un molde en acero para conformar probetas rectangulares, utilizando un gato hidráulico que permita alcanzar los parámetros determinados en el ensayo Proctor de los materiales, tal como se muestra en las fotografías de la Figura 2.4.

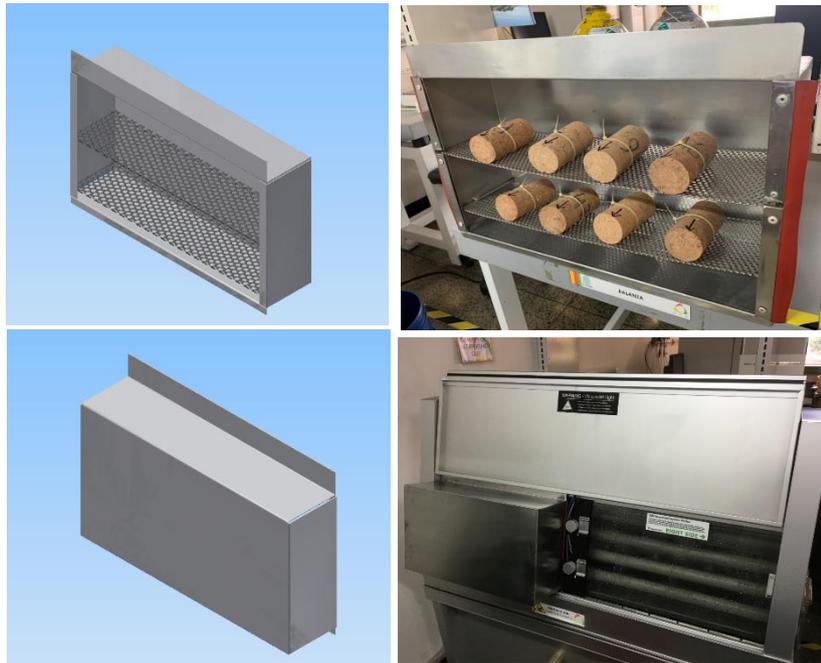


**Figura 2.4.** Molde y gato hidráulico para compactación de probetas rectangulares

## 3. Porta muestras para exposición a intemperismo acelerado de probetas cilíndricas

Diseño y fabricación de 4 porta muestras para la exposición a condiciones de intemperismo acelerado de las probetas cilíndricas de 5 cm x 10 cm. Los porta muestras fueron fabricados en lámina galvanizada calibre 16, las dimensiones se establecieron de

acuerdo con el diseño y especificaciones de la cámara de intemperismo QUV, tal como se muestra en la Figura 2. 5.



**Figura 2. 5.** Porta muestras para exposición de probetas cilíndricas en cámara intemperismo acelerado

#### 4. *Porta muestras para exposición a intemperismo acelerado de probetas rectangulares*

Diseño y fabricación de porta muestras para la exposición a condiciones de intemperismo acelerado de las probetas rectangulares. Los porta muestras fueron fabricados en lámina galvanizada, las dimensiones se establecieron de acuerdo con el diseño y especificaciones de la cámara de intemperismo QUV y las dimensiones de las probetas, tal como se muestra en las fotografías de la Figura 2.6.



**Figura 2.6.** Porta muestras para exposición de probetas rectangulares en la cámara intemperismo acelerado

### 5. Montaje para exposición de probetas a intemperismo natural

Acondicionamiento de mesa metálica para exposición de muestras a intemperismo natural, Figura 2.7, con dimensiones de 1 m x 2 m, altura de 1.50 m y base en lámina perforada de acero inoxidable 304 calibre 16 con perforaciones de 5mm de diámetro; cubierta en la parte superior con lámina de metacrilato para proteger las muestras de la lluvia.



Figura 2.7. Montaje para exposición de probetas a intemperismo natural

### 6. Diseño de cámara de lixiviación para pruebas ambientales de los suelos estabilizados

Diseño y fabricación de cámara de lixiviación para pruebas ambientales de acuerdo con la norma ASTM D3987 «Standard Practice for Shake Extraction of Solid Waste with Water» (ASTM D3987, 2012) tal como se muestra en la Figura 2.8.

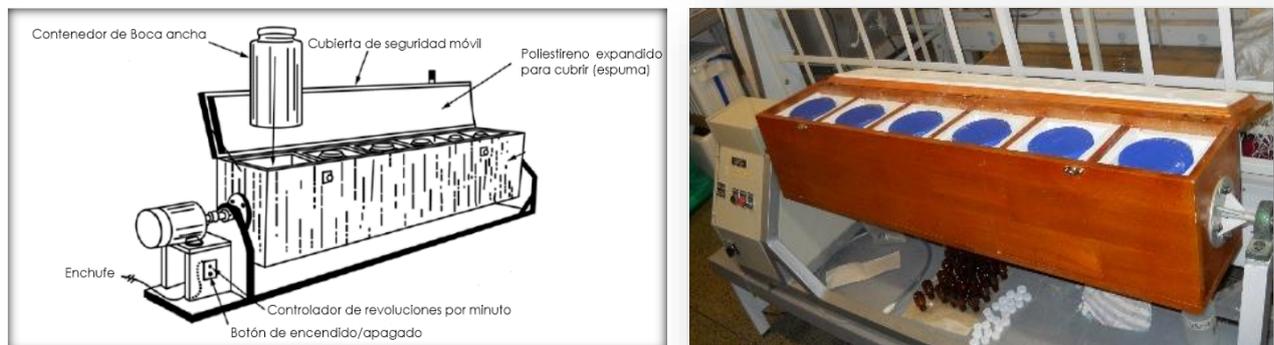
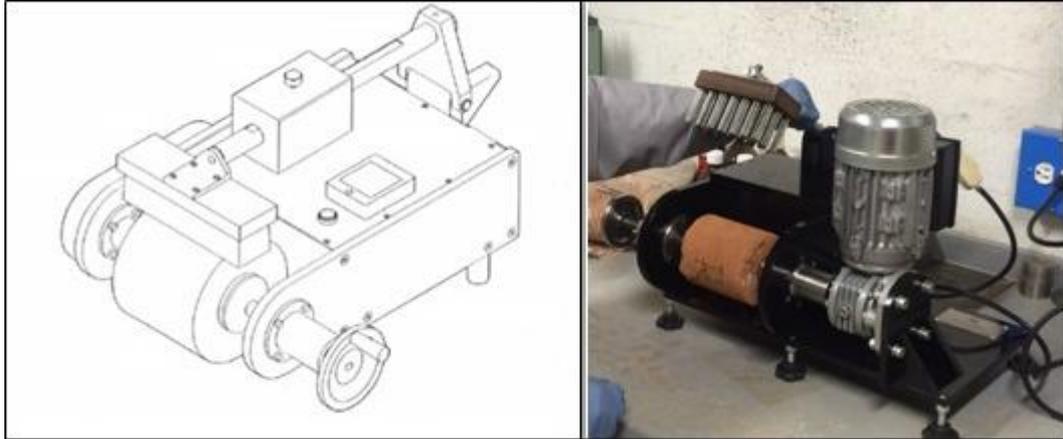


Figura 2.8. Cámara de lixiviación para pruebas ambientales de los suelos estabilizados

### 7. *Diseño de cepillo de desgaste para pruebas de material particulado*

Diseño y fabricación de cepillo para pruebas de desgaste y medición de material particulado de los suelos estabilizados, tomando como referencia la norma ASTM D 559 «Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures» (ASTM D559, 2015) Tal como se muestra en la Figura 2.9.



**Figura 2.9.** Cepillo de desgaste para pruebas de material particulado de las muestras de suelo

## 2.4. Caracterización fisicoquímica y mecánica del suelo

Con el fin de conocer a profundidad las características del suelo seleccionado, se caracterizó de acuerdo con las siguientes técnicas:

- Clasificación del suelo por sistema AASHTO: basado en la norma ASTM D3282 «Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes» (ASTM D3282, 2015).
- Clasificación del suelo por sistema USCS: basado en la norma ASTM D2487 «Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes — Unified Soil Classification System—» (ASTM D2487, 2017).

Mediante estos procedimientos se clasifica el suelo en unos grupos predeterminados que se identifican por unos símbolos en función de sus características específicas. Estas clasificaciones se basan en la determinación del tamaño de partículas, límite líquido e índice de plasticidad del suelo.

- Límites de Atterberg: basado en la Norma ASTM D4318 «Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity index of soils» (ASTM D4318, 2005).

El objetivo de estas pruebas es conocer la consistencia del suelo en función del contenido de humedad. El límite plástico es el contenido de humedad en el punto de

transición del estado semisólido al estado plástico, por su lado el límite líquido es un índice correspondiente al contenido de humedad, al cual el suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido. La diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico representa el índice de plasticidad de un suelo.

- Determinación del tamaño de partículas por tamizado e hidrómetro: basado en la norma ASTM D422 «Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils» (ASTM D422, 2007).

Este ensayo tiene como objetivo determinar de forma cuantitativa la distribución de tamaño de partículas de un sólido, generando como resultado una curva granulométrica donde se logra observar la distribución por tamaño de la muestra. La distribución de las partículas mayores a 0.075 mm —Tamiz N° 200— se determina por tamizado, mientras que la distribución de los tamaños de partículas menores a 0.075 mm se determina por un proceso de sedimentación empleando un hidrómetro.

- Análisis de tamaño de partícula por difracción láser: basado en la norma ISO 13320 «Particle size analysis — Laser diffraction methods» (ISO 13320, 2009), realizada en equipo Malvern Mastersizer 2000 particle size analyzer con accesorio Malvern HYDRO 2000 MU.

La difracción láser mide las distribuciones de tamaño de partícula mediante la variación angular de la intensidad de la luz dispersada cuando un rayo láser pasa a través de una muestra de partículas sólidas contenidas en un medio líquido, en el caso del suelo se realizó para la fracción pasante malla 200 —menor a 75  $\mu\text{m}$ —.

- Densidad real: basada en la norma ASTM D5550 «Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer», realizada en equipo AccuPyc II 1340 marca Micromeritics. (ASTM D5550, 2014)

En este ensayo se obtiene la densidad real del suelo haciendo uso de un picnómetro automático, que utiliza desplazamiento de un gas —helio—, para determinar el volumen ocupado por el sólido y con ello calcular la densidad real del material.

- Determinación de las relaciones densidad – humedad en suelos Proctor basado en la norma ASTM D698: «Standard Test Methods for Laboratory Compaction of Soil —Using Standard Effort—» (ASTM D698, 2012).

Este ensayo tiene por objetivo determinar la dependencia del grado de compactación alcanzado por los suelos, con el contenido de humedad y la magnitud del trabajo mecánico aplicado. A través de este ensayo se determina la densidad máxima seca modificada, es el máximo valor definido por la curva de compactación para un ensayo que usa el esfuerzo modificado y la humedad óptima modificada, es el contenido de

agua al cual el suelo puede ser compactado para alcanzar la densidad máxima seca modificada.

- Contenido de materia orgánica: basado en la norma AASHTO T 267-86: «Standard Method of Test for Determination of Organic Content in Soils by Loss of Ignition» (AASHTO T 267-86, 2008).

Este método determina el contenido total de materia orgánica que posee el suelo, generalmente esta materia orgánica total se compone de una fracción macroorgánica o de materiales orgánicos frescos y de humus.

- Área superficial específica método BET: este análisis se realizó en un equipo Micromeritics Gemini VII con adsorción de N<sub>2</sub>, mediante la aplicación del método BET.

Este análisis tiene por objetivo determinar propiedades texturales: porosidad, área superficial, tamaño y volumen de poro; de materiales sólidos mediante la adsorción de gases. En el caso del suelo estudiado la muestra fue desgasificada aplicando vacío a una temperatura de 350°C durante 25 horas.

- Potencial de Hidrógeno, pH: basado en la norma NTC 5264 «Calidad de suelo. Determinación del pH» (NTC 5264, 2018).

Este ensayo brinda una medida de la reactividad que tiene el suelo, estableciendo su grado de acidez o de alcalinidad, lo cual tiene una gran influencia en sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

- Conductividad: basada en la norma NTC 5596 «Calidad de suelo. Determinación de la conductividad eléctrica. Resultados y análisis» (NTC 5596, 2008).

Con este ensayo se mide el contenido de electrolitos presentes en el suelo que son solubles en el agua, es un indicador de la salinidad del suelo. A través de las mediciones de la conductividad eléctrica se obtiene de forma rápida y precisa información sobre la concentración total de componentes ionizados en la solución de suelo.

- Contenido de sulfatos por espectrometría: basado en la norma ASTM D516 «Standard Test Method for Sulfate Ion in Water» (ASTM D516, 2016), usando el espectrofotómetro UV-Vis Evolution 600 marca ThermoScientific, y se usa el software VISION pro™ UV-Visible Spectrophotometer.

Con este ensayo se determina el contenido de sulfatos solubles presentes en el suelo.

- Capacidad de intercambio catiónico: Basada en la norma NTC 5268 «Calidad de suelo. Determinación de la capacidad de intercambio catiónico» (NTC 5268, 2014).

La capacidad de intercambio catiónico CIC es una medida de la cantidad total de cargas negativas del suelo a un pH específico. Esta carga es neutralizada por cationes que pueden ser reversiblemente reemplazados por cationes que provienen de soluciones salinas o ácidas. La capacidad de intercambio catiónico es la propiedad que define la cantidad de sitios disponibles para almacenar los cationes en el suelo.

- CBR remoldeado: basado en la norma ASTM D1883 «Standard test method for CBR —California Bearing Ratio— of laboratory-compacted soils» (ASTM D1883, 2016)

Este ensayo tiene como propósito evaluar la calidad relativa de suelos y agregados para subrasante, subbase y base de pavimentos. El índice de CBR se obtiene mediante la relación del valor de carga unitaria necesario para que un pistón penetre una muestra compactada, bajo condiciones de densidad, humedad controladas y sometida posteriormente a un periodo de inmersión, con la carga unitaria obtenida en el mismo ensayo realizado a una muestra estándar o patrón de un material triturado.

- Resistencia a la compresión simple: basado en la norma ASTM D2166 «Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil» (ASTM D2166, 2016).

Este ensayo tiene como objetivo conocer la resistencia a la compresión no confinada de suelos cohesivos, mediante la aplicación de una carga axial con control de las deformaciones. Se puede ejecutar la metodología a muestras inalteradas, remoldeadas o compactadas. En este caso determina el esfuerzo mínimo compresivo al cual fallan muestras cilíndricas compactadas en laboratorio, tanto del suelo como de los sistemas con los aditivos químicos.

- Permeabilidad: Ensayo realizado de acuerdo con la norma ASTM D5084 «Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter» (ASTM D5084-16a, 2016).

Este método de prueba permite realizar la medición en laboratorio de la conductividad hidráulica o también conocida como coeficiente de permeabilidad de materiales porosos saturados de agua.

- Microscopía Electrónica de Barrido, SEM. Este ensayo se realizó empleando un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 6940 LV, con una resolución de 3nm en alto vacío y magnificación de hasta 300,000X y con detector de Energy Dispersive Spectrometer EDS incorporado.

Este ensayo permite obtener imágenes a escala micro y nanométrica de las partículas del material lo cual permite evaluar superficies para estudiar la composición y la morfología de los materiales. Adicionalmente, el equipo tiene incorporado un detector de rayos X del tipo "dispersivo" en energía (Energy Dispersive Spectrometer, EDS) que permite identificar cuáles son las energías de los rayos X emitidos por la muestra y, por lo tanto, saber qué elementos químicos están presentes en la muestra.

- Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X, XRF: Análisis elemental semicuantitativo (Software Uniquant) por espectrometría de fluorescencia de rayos X por dispersión de energía, equipo Thermo ARL Optim'X WDXRF. Condiciones del análisis: 37% de humedad y 22.4°C.

Con este análisis se determina la composición atómica del material analizado en varios elementos químicos. Consiste en emisión de rayos X secundarios característicos de un material que ha sido excitado con rayos X de alta energía o rayos gamma. Este fenómeno es muy utilizado para análisis elemental y análisis químico, particularmente en la investigación de metales, vidrios, cerámicos y materiales de construcción.

- Difractometría de Rayos X, DRX: realizada en Equipo XPert PANalytical Empyrean Series II con Detector PIXcel 3D, Modelo 2012. Filtro de níquel para eliminar radiación K $\beta$ 1. Longitud de onda 1.54 Å. Tubo de Cobre.

Esta técnica de análisis instrumental es utilizada en la caracterización de materiales que tienen una estructura cristalina definida. La información obtenida de la interacción entre los rayos X y los cristales se basa en la difracción producida por un conjunto de átomos en un arreglo ordenado. Con esta técnica es posible identificar las estructuras cristalinas presentes en las muestras, y a través de éstas, la composición mineralógica del material.

- Análisis termogravimétrico y Térmico Diferencial, TGA/DTA: realizado en equipo marca TA Instruments. Modelo Hi-Res TGA 2950. El análisis se realiza en atmósfera controlada de un gas inerte: N<sub>2</sub>. Velocidad de calentamiento de 10°C/minuto y temperatura máxima de calentamiento de 900 °C.

Las técnicas de análisis térmico permiten medir las transiciones endotérmicas y exotérmicas de un material en función de la temperatura y correlacionarlas con cambios en alguna propiedad fisicoquímica. En el caso de los minerales de arcilla, estos contienen hidroxilos y moléculas de agua unidos a la red cristalina con diferente energía, la temperatura requerida para eliminar estas moléculas, la pérdida de peso o la energía requerida, son características y se usan con propósitos diagnósticos. Estos fenómenos de deshidratación implican además cambios en la estructura de los minerales de arcilla, cambios que deben considerarse simultáneamente a la deshidratación; además existen otras transformaciones, como la formación de nuevas fases minerales, que no están asociadas a fenómenos de deshidratación. La dependencia de estas reacciones con la

temperatura posibilita una caracterización cualitativa de los minerales mediante estas técnicas.(Besoain, 1985)

- Espectrometría Infrarroja por Transformada de Fourier y Reflectancia Total Atenuada, FTIR/ATR: los espectros de composición de las muestras se obtuvieron en un Espectrómetro IR Prestige-21 /FTIR-8400S, rango entre 4000-500 cm<sup>-1</sup> equipado con accesorio de Reflectancia Total Atenuada, ATR.

Este análisis consiste en la identificación de la composición de un analito mediante la emisión de ondas en el espectro infrarrojo. Designa el estudio de la absorción de la radiación de longitudes de onda comprendidas entre 1 y 1000 micras.

## 2.5.Caracterización fisicoquímica de los aditivos

Los aditivos alternativos evaluados fueron caracterizados fisicoquímicamente mediante las siguientes mediciones en laboratorio:

- Apariencia general del aditivo
- Olor
- pH
- Densidad real
- Solubilidad en agua
- Espectrometría infrarroja por Transformada de Fourier y Reflectancia Total Atenuada, FTIR/ATR

Adicionalmente para la zeolita, como aditivo alternativo en estado sólido se realizaron los siguientes ensayos composicionales y mineralógicos.

- Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X, XRF
- Difractometría de Rayos X, DRX
- Microscopía Electrónica de Barrido, SEM

## 2.6. Evaluación inicial del desempeño de los sistemas mixtos de suelo con los aditivos químicos

Como evaluación inicial de los sistemas suelo/aditivo y con el fin de determinar el efecto que tienen los aditivos evaluados en las propiedades del suelo natural, se midieron las siguientes propiedades:

- Determinación de las relaciones densidad – humedad en suelos Proctor: basado en la norma ASTM D698: «Standard Test Methods for Laboratory Compaction of Soil Using Standard Effort)»
- CBR remodelado: basado en la norma ASTM D1883 «Standard test method for CBR —California Bearing Ratio— of laboratory-compacted soils»

- Resistencia a la compresión simple: basado en la norma ASTM D2166 «Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil»
- Resistencia al corte. Método de corte directo no consolidado no drenado (UU): basado en la norma ASTM D3080 «Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils»
- Límites de Atterberg: basado en la Norma ASTM D4318 «Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity index of soils»
- Velocidad de ascenso capilar y tiempo de saturación: de acuerdo con protocolo desarrollado en el grupo de investigación
- 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»
- Capacidad de intercambio catiónico: basada en la norma NTC 5268 «Calidad de suelo. Determinación de la capacidad de intercambio catiónico»
- Permeabilidad: Ensayo realizado de acuerdo con la norma ASTM D5084 «Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter»
- Espectrometría infrarroja por Transformada de Fourier y Reflectancia Total Atenuada, FTIR/ATR en Espectrómetro IR Prestige-21 /FTIR-8400S, rango entre 4000-500 cm<sup>-1</sup> equipado con accesorio de Reflectancia Total Atenuada, ATR
- Área superficial específica método BET: en equipo Micromeritics Gemini VII con adsorción de N<sub>2</sub>
- Difractometría de Rayos X, DRX: realizada en Equipo XPert PANalytical Empyrean Series II con Detector PIXcel 3D, Modelo 2012. Filtro de níquel para eliminar radiación Kβ1. Longitud de onda 1.54 Å. Tubo de Cobre
- Microscopía Electrónica de Barrido, SEM. Este ensayo se realizó empleando un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 6940 LV, con una resolución de 3nm en alto vacío y magnificación de hasta 300,000X

## 2.7. Evaluación ambiental de los sistemas mixtos de suelo con los aditivos químicos

La evaluación ambiental de los sistemas suelo/aditivo se realizó o se llevó a cabo desde dos perspectivas:

- Posibles afectaciones del medio ambiente por lixiviación del material

Se realizó un proceso de lixiviación de los materiales de acuerdo con la normal ASTM D3987 «Standard Practice for Shake Extraction of Solid Waste with Water» y sobre los lixiviados recuperados se realizaron las siguientes pruebas ambientales:

- pH
- Carbono Orgánico Total COT: basado en la norma Standard method 5310B «Determinación de Carbono Orgánico Total»
- Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO: basado en la norma DIN EN 1899-1-H51 «Demanda Biológica de Oxígeno»
- Demanda Química de Oxígeno DQO: basado en la norma NTC 3629 «Demanda química de oxígeno»
- Biodegradabilidad

- Posibles afectaciones del medio ambiente por desprendimiento de material particulado

Se realizó prueba de desgaste con cepillo y al material recuperado se le realizó la siguiente caracterización:

- Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X, XRF
- Análisis de tamaño de partícula, ATP

## 2.8. Preparación de los especímenes para pruebas de intemperismo

Para la preparación de los especímenes se siguieron los pasos que se describen a continuación:

1. Se calculó la cantidad de agua a agregar al suelo para alcanzar el contenido de humedad óptimo de acuerdo con la Ecuación 2.1. Asimismo se obtuvo la cantidad de material a compactar en el molde para que la muestra adquiriera el peso volumétrico seco máximo de acuerdo con la Ecuación 2.2 y la Ecuación 2.3. Para controlar la fabricación de los especímenes, las variaciones permitidas fueron  $\pm 1\%$  en el contenido de agua respecto a la humedad óptima y  $\pm 48 \text{ kg-f / m}^3$  con respecto a peso volumétrico seco de acuerdo con la norma ASTM D559 «Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures» (ASTM D559, 2015).

$$A_m = \left( \frac{W_{opt} - W_{ini}}{100} \right) (W_{seco}) \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$\gamma_{muestra} = \gamma_{m\acute{a}x} \left( 1 + \frac{W_{opt}}{100} \right) \quad \text{Ecuación 2.2}$$

$$W_m = \gamma_{muestra} * V \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

$A_m$ : cantidad de agua a adicionar a la mezcla

$w_{opt}$ : humedad óptima del material obtenido en el ensayo de compactación estándar

$w_{ini}$ : humedad inicial del suelo

$W_{seco}$ : total, de peso seco de la muestra, para el caso de los estabilizantes sólidos: cal, cemento y zeolita, se debe sumar el peso del estabilizante

$\gamma_{muestra}$ : peso específico de la muestra a la humedad óptima

$\gamma_{m\acute{a}x}$ : peso específico seco del material obtenido en el ensayo de compactación estándar

$W_m$ : peso total de la muestra compactada a los parámetros óptimos obtenidos en el ensayo de compactación estándar

$V$ : volumen de la muestra compactada, para el caso de las muestras cilíndricas:  $V = \pi * r^2$  y para el caso de las muestras rectangulares:  $V = a * b * c$

- Se calculó la cantidad de los estabilizantes a adicionar al suelo natural teniendo en cuenta las dosificaciones mostradas en la Tabla 2.8, que fueron fijadas teniendo en cuenta el tipo de suelo objeto de estudio, así como los resultados de desempeño obtenidos en proyectos anteriormente desarrollados por el grupo de investigación (Gobernación de Antioquia, 2015). En particular se aclara que para obtener la dosificación óptima de la cal, en proyectos anteriores se ha realizado la prueba Eades y Grim que se basa en el pH.

**Tabla 2.8.** Dosificaciones establecidas para evaluación de estabilizantes

ESTABILIZANTE	DOSIFICACIÓN
Polímero	7330 ml/m <sup>3</sup> ssc
Silano	1882.5 ml/m <sup>3</sup> ssc
Enzima	33 ml/m <sup>3</sup> ssc
Aceite sulfonado	233 ml/m <sup>3</sup> ssc
Zeolita/Cemento	1.8 Kg/m <sup>3</sup> ssc/180 Kg/m <sup>3</sup> ssc
Cal	6% peso seco
Cemento	180 Kg/m <sup>3</sup> ssc

3. A continuación se pesaron muestras de 650 g de suelo seco, cantidad suficiente para remoldear especímenes cilíndricos y rectangulares; estas muestras fueron dosificadas con los diferentes productos y se les agregó la cantidad de agua calculada y se mezclaron completamente para garantizar muestras homogéneas, tal como se muestra en las fotografías de la Figura 2.10.



Figura 2.10. Preparación de las mezclas

Para el caso de los suelos aditivados con cal, aceite sulfonado y silano, una vez mezclados completamente, las muestras se almacenaron en una bolsa hermética durante 24 horas para permitir que el agua y el estabilizante químico se distribuyeran de forma homogénea en todo el suelo.

4. Posteriormente se ensambló el molde cilíndrico y se compactaron probetas. Para compactar el material se utilizó un molde tipo Proctor a escala, que fue diseñado en el proyecto, con un martillo de 1 kg de masa y altura de caída de 30.5 cm. La compactación se realizó en 5 capas aplicando en cada una el número de impactos necesarios para lograr el peso volumétrico requerido. La cantidad de suelo y el número de golpes por capa fue calculado con la Ecuación 2.4 y la Ecuación 2.5.

$$w_{capa} = \frac{W_m}{n_{capa}} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

$$n_{golpes \text{ por capa}} = \frac{E_{compactación} * V}{n_{capa} * w_{pizón} * H_{caída}} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Donde:

$W_{capa}$ : peso de material para compactar cada capa de las probetas cilíndrica

$W_m$ : peso total de la muestra compactada a los parámetros óptimos obtenidos en el ensayo de compactación estándar

$n_{capa}$ : número de capas para compactar probeta cilíndrica

$E_{compactación}$ : Energía de compactación del Proctor estándar

$w_{pizón}$ : peso del martillo de compactación

$H_{caída}$ : altura de caída del martillo de compactación

Cabe señalar que después de aplicar el número de golpes en cada capa, la superficie se escarificó y se siguió compactando la siguiente capa. Este proceso se repitió para las capas restantes.

- Al finalizar la compactación de la última capa, se retiró el collarín del molde y se procedió a enrasar la superficie de la muestra. Una vez enrasado, el espécimen se extrajo del molde y se registraron las dimensiones y peso, como se muestra en las fotografías de la Figura 2.11.

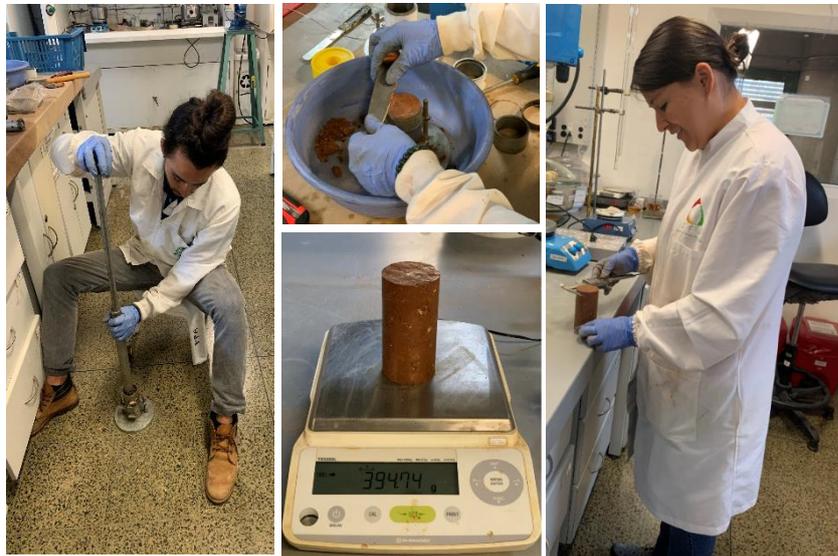


Figura 2.11. Compactación de probetas cilíndricas

- A continuación se compactaron las probetas rectangulares empleando un gato hidráulico y un molde rectangular diseñado en el proyecto como se muestra en las fotos de la Figura 2.12, posterior a la compactación el espécimen se extrajo del molde y se registraron las dimensiones y el peso.

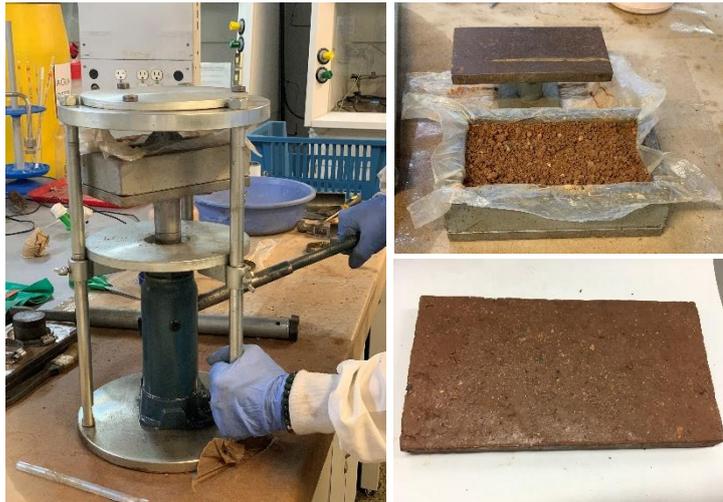


Figura 2.12. Compactación probetas rectangulares

7. Posteriormente todos los especímenes fabricados se identificaron y se sometieron a un ciclo de curado por 7 días en bolsas herméticas para preservar su humedad Figura 2.13.



Figura 2.13. Proceso de curado de probetas moldeadas

8. Con el material restante de la compactación se tomaron dos muestras para la determinación del contenido de humedad. Una vez calculado el contenido de agua se verificó que éste estuviera dentro del rango especificado. También se verificó que el peso volumétrico seco cumpliera con lo requerido. Las muestras se desecharon si no cumplían con ambas características.
9. Finalmente, tal como se muestra Figura 2.14, después del tiempo de curado, los especímenes se sometieron a los diferentes tipos de intemperismo de acuerdo con el diseño de experimentos planteado:

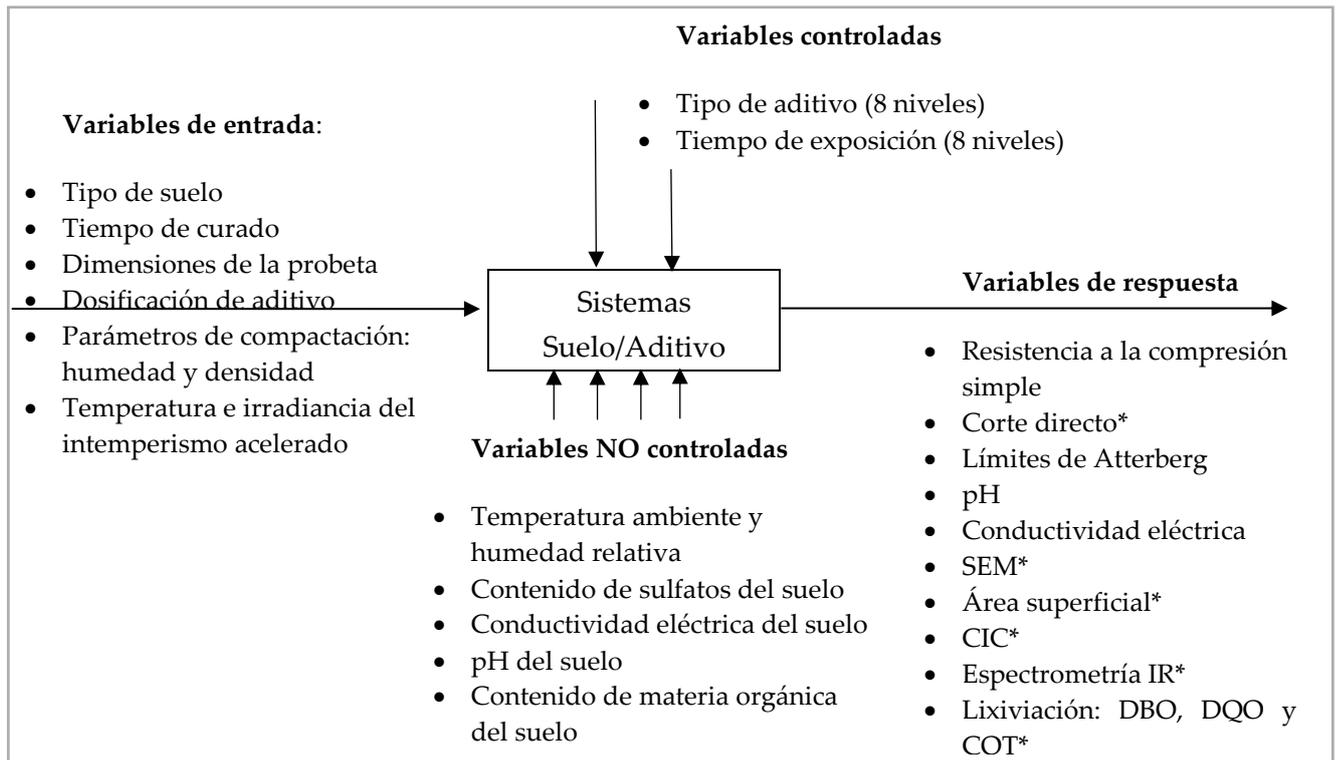
- Envejecimiento artificial por exposiciones a ciclos alternados de luz ultravioleta y humedad en cámara QUV: de acuerdo con la norma ASTM G154 «Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Non metallic Materials» (ASTM G154, 2016), se programaron ciclos de exposición alternados de 8 horas de luz UVA a una irradiancia de  $1.55 \text{ W/m}^2/\text{nm}$  y temperatura de  $60^\circ\text{C}$  con 4 horas de condensación a una temperatura de  $50^\circ\text{C}$ , dichos ciclos fueron repetidos continuamente hasta alcanzar los tiempos de exposición establecidos en el diseño experimental.
- Envejecimiento natural: las muestras fueron expuestas a condiciones de intemperie natural: radiación solar, humedad y temperatura; sin embargo, fueron protegidas de la lluvia directa con una placa de metacrilato para evitar que perdieran su forma. Fueron sometidas a diferentes tiempos de envejecimiento de acuerdo con el diseño experimental.
- Condiciones resguardadas: muestras expuestas a condiciones controladas de laboratorio en un ambiente resguardado de la intemperie, a diferentes tiempos de acuerdo con el diseño experimental.



Figura 2.14. Probetas sometidas a la diferentes condiciones de intemperismo

## 2.9. Diseño de experimentos pruebas de intemperismo

Los diseños de experimentos que se llevaron a cabo para la elaboración y evaluación de las probetas en las diferentes condiciones de intemperismo: intemperismo acelerado, intemperismo natural y condiciones resguardadas, fueron diseños factoriales para medir una evolución de propiedades en el tiempo; la Figura 2.15 presenta un esquema del diseño de experimentos que se llevó a cabo para los materiales estudiados en condiciones de intemperismo acelerado.



\*estas variables de respuesta se midieron solo en algunas unidades experimentales seleccionadas del intemperismo acelerado

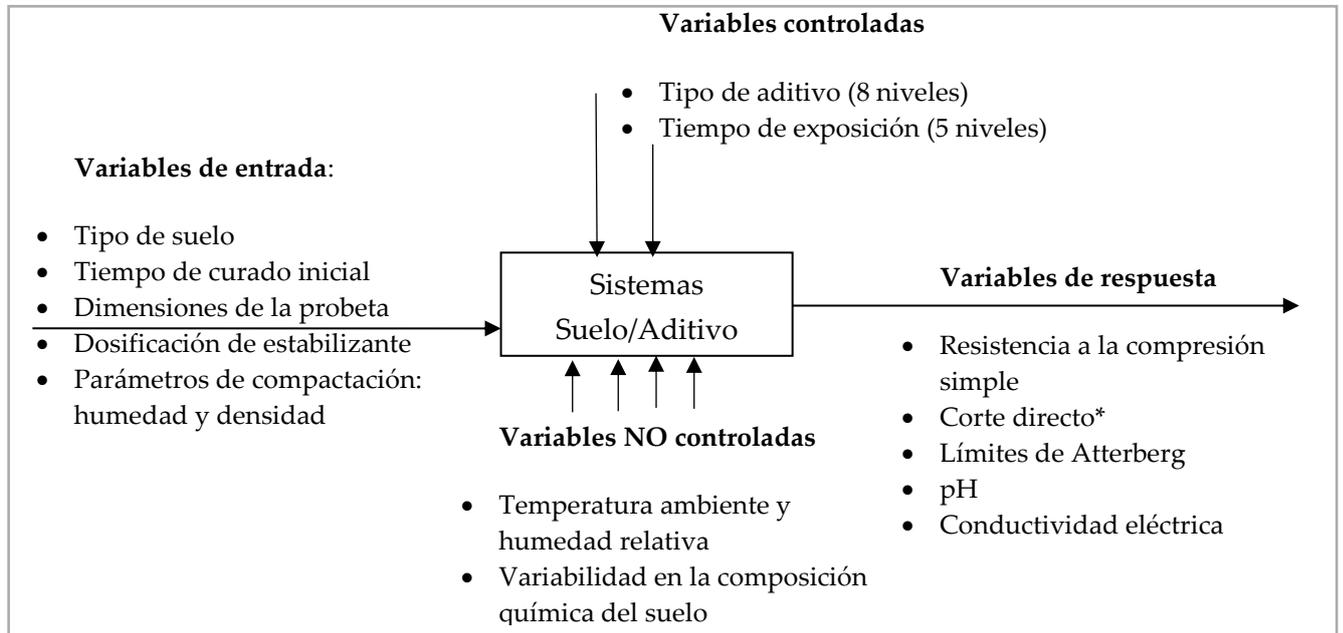
Figura 2.15. Esquema de diseño de experimentos intemperismo acelerado

La matriz genera un total de 128 unidades experimentales teniendo en cuenta que todos los experimentos se hicieron por duplicado; adicionalmente, los ensayos se realizaron de manera aleatoria. En la Tabla 2.9 se muestra un desglose de las unidades experimentales evaluadas.

Tabla 2.9. Desglose de las unidades experimentales sometidas a intemperismo acelerado

Tiempo de exposición (horas)	Suelo Natural	Suelo-Aceite sulfonado	Suelo-Polímero	Suelo-Enzima	Suelo-Organosilano	Suelo-Cal	Suelo-Cemento	Suelo-Zeolita/Cemento
24	RCS, Plasticidad, pH y Conductividad							
48								
72								
108								
216	RCS, Plasticidad, pH, Conductividad, Corte directo UU y Pruebas ambientales							
324	RCS, Plasticidad, pH y Conductividad							
432								
540	RCS, Plasticidad, pH, Conductividad, Corte directo UU, Pruebas ambientales, CIC, Área Superficial, IR y SEM							

La Figura 2.16 presenta un esquema del diseño de experimentos que se llevó a cabo para cada uno de los estabilizantes estudiados en condiciones tanto de intemperismo natural como de condiciones resguardadas.



\*estas variables de respuesta se midieron solo en algunas unidades experimentales seleccionadas del diseño de experimentos

Figura 2.16. Esquema de diseño de experimentos intemperismo natural y condiciones resguardadas

La matriz genera un total de 80 unidades experimentales teniendo en cuenta que todos los experimentos se hicieron por duplicado; asimismo, los ensayos se realizaron de manera aleatoria. En la Tabla 2.10 se muestra un desglose de las unidades experimentales evaluadas.

Tabla 2.10. Desglose de las unidades experimentales sometidas a intemperismo natural y condiciones resguardadas

Tiempo de exposición (horas)	Suelo Natural	Suelo-Aceite sulfonado	Suelo-Polímero	Suelo-Enzima	Suelo-Organosilano	Suelo-Cal	Suelo-Cemento	Suelo-Zeolita/Cemento
240	RCS, Plasticidad, pH y Conductividad							
480	RCS, Plasticidad, pH, Conductividad y Corte directo UU							
720	RCS, Plasticidad, pH y Conductividad							
960								
1200	RCS, Plasticidad, pH, Conductividad y Corte directo UU							

### Identificación de los elementos de los diseños de experimentos planteados:

• *Unidad experimental*: la unidad experimental de estos diseños experimentales la constituyen las probetas de suelo y suelo con los diferentes aditivos evaluados, que

fueron compactadas en laboratorio de acuerdo con los parámetros obtenidos en el ensayo de Proctor estándar: densidad máxima seca y humedad óptima.

- *Factores o variables de control:* corresponde a los factores: tipo de estabilizante y tiempo de exposición, tal como se identifican en la Tabla 2.11.

**Tabla 2.11.** Identificación factores de control del diseño de experimentos

Variable control	Niveles propuestos	Precisión/ instrumento	Efecto previsto
Tipo de estabilizante	8 niveles: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Suelo Natural</li> <li>○ Aceite Sulfonado</li> <li>○ Polímero</li> <li>○ Enzima</li> <li>○ Organosilano</li> <li>○ Zeolita/Cemento</li> <li>○ Cal</li> <li>○ Cemento</li> </ul>	-	Que el efecto de cada estabilizante sobre el suelo sea diferencial respecto a su desempeño y propiedades físicoquímicas. Teóricamente todos los aditivos deben mejorar el desempeño del suelo.
Tiempo de Intemperismo acelerado	8 niveles: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 24 h</li> <li>○ 48 h</li> <li>○ 72h</li> <li>○ 108 h</li> <li>○ 216 h</li> <li>○ 324 h</li> <li>○ 432 h</li> <li>○ 540 h</li> </ul>	0,1 h/Controlador cámara QUV	Que en los primeros puntos aumente la resistencia de los suelos con los aditivos químicos, alcanzando un máximo y luego descendiendo por envejecimiento del material
Tiempo de Intemperismo acelerado	5 niveles: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 240 h</li> <li>○ 480 h</li> <li>○ 720 h</li> <li>○ 960 h</li> <li>○ 1200 h</li> </ul>	1 h/reloj	Que en los primeros puntos aumente la resistencia de los suelos con los aditivos químicos, alcanzando un máximo y luego descendiendo por envejecimiento del material

- *Variables de entrada constantes:* las constantes del diseño de experimentos fueron: el tipo de suelo, las dimensiones de las probetas, tiempo de curado inicial, dosificación de cada estabilizante, parámetros de compactación: humedad y densidad, temperatura e irradiancia del intemperismo acelerado. En la Tabla 2.12 se realiza una identificación más completa de estas variables.

Tabla 2.12. Identificación de las variables de entrada del diseño de experimentos

Factor constante	Nivel deseado	Cómo controlar	Efecto previsto
Tipo de suelo	Suelo previamente caracterizado	Tomar muestras de suelos similares en peso y forma	Alto, cambios en el tipo de suelo pueden afectar los resultados de las variables de respuesta
Tamaño y forma de las probetas de suelo con los aditivos	Cilíndricas de 5 cm x 10 cm	Aplicar la misma presión para compactar las muestras de los sistemas suelo/aditivo y usar el mismo molde con el fin de que todas las probetas queden con las mismas dimensiones	Medio, cambios en el tamaño y geometría de la probeta pueden afectar la lectura de resistencia
Tiempo, temperatura y humedad durante el tiempo de curado	23°C y humedad de saturación	Mantener las probetas en atmósferas controladas de temperatura y humedad durante el tiempo de curado	Alto, diferentes temperaturas y humedades pueden afectar la resistencia de las muestras de suelo con los aditivos químicos evaluados
Dosificación de cada aditivo	Dosificaciones establecidas	Medir las cantidades de aditivos siempre con el mismo instrumento de medida: balanza calibrada	Alto, diferencias en las dosificaciones establecidas pueden llevar a grandes cambios en los valores de las variables de respuesta
Parámetros de compactación: humedad y densidad	Densidad máxima y humedad óptima determinadas para cada sistema	Realizando mediciones de densidad y humedad de cada probeta para contrastar que estén dentro de las tolerancias aceptadas	Alto, diferencias en los parámetros de humedad y densidad pueden afectar en gran medida las variables de respuesta
Temperatura e irradiancia del intemperismo acelerado	Las programadas de acuerdo al ciclo que se esté ejecutando	La cámara de intemperismo acelerado tiene sus propios controladores de estas condiciones	Medio, diferencias en los parámetros de irradiancia y temperatura puede afectar las variables de respuesta

• *Factores ruido*: los factores ruido considerados fueron la posible variabilidad en la composición química del suelo y las condiciones de temperatura ambiente y humedad relativa en el momento de preparar las muestras, tal como se identifican en la Tabla 2.13.

**Tabla 2.13.** Identificación de los factores de ruido del diseño de experimentos

Interferencia	Estrategia	Efectos previstos
Variabilidad en la composición química del suelo	Homogeneizar bien el suelo hasta obtener una masa de que no difiera en apariencia	Alto, la composición química, especialmente la materia orgánica y el contenido de sulfatos, pueden interferir en las reacciones cementantes entre el aditivo y el suelo
Temperatura ambiente y humedad relativa en el momento de preparar las muestras	Fabricar las probetas siempre en el mismo espacio de laboratorio	Medio, las condiciones de temperatura y humedad pueden afectar el contenido de agua del material para la fabricación de las probetas

• *Variables respuesta* — $Y_{ij}$ —: en el diseño de experimentos se evaluaron como variables respuesta la resistencia a la compresión simple, el pH y la conductividad. Adicionalmente para algunos puntos seleccionados del diseño se evaluaron: resistencia al corte, IR, SEM, área superficial y pruebas de lixiviación con medidas de DBO, DQO y COT. En la Tabla 2.14 se identifican cada una de las variables de respuesta.

**Tabla 2.14.** Identificación de las variables de respuesta del diseño de experimentos

Variable respuesta	Instrumento	Relación con el objetivo
Resistencia a la compresión simple RCS	Máquina Multiensayos Humboldt	Indica la resistencia que ha ganado el suelo producto de las reacciones químicas con el estabilizante y su evolución en el tiempo
Ensayo de resistencia al corte directo	Equipo de Corte Humboldt	
Limite líquido, Limite plástico	Cazuelas Casagrande y horno	Indica las variaciones en plasticidad que han generado los productos evaluados respecto al suelo natural y
pH	pHmetro	Indica las variaciones que han generado los productos evaluados respecto al suelo natural y su evolución en el tiempo en relación a características ácidas, básicas, reacciones químicas, movilidad iónica
Conductividad	Equipo Multiparámetro	

IR	Espectrómetro IR Prestige-21 /FTIR-8400S con accesorio de	Identifican cambios composicionales, morfológicos y texturales de los materiales evaluados y su evolución en el tiempo
SEM	Microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 6940 LV	
DRX	Equipo XPert PANalytical Empyrean	
Área Superficial	Equipo Micromeritics Gemini VII	
Pruebas ambientales: lixiviación, DBO, DQO, COT y pH	Métodos analíticos	Indican la evolución en el tiempo de las variables ambientales asociadas a los materiales evaluados

### 2.10. Prueba complementaria. Construcción de tramos piloto

Dos de los productos evaluados en este estudio: la enzima y la zeolita/cemento, se construyeron dos tramos de prueba de un 1 km de longitud en una vía terciaria del municipio de Valencia en el departamento de Córdoba, Colombia. Las actividades asociadas a esta etapa fueron:

1. Exploración, sondeos y toma de muestras
2. Caracterización fisicoquímica y clasificación de suelos
3. Evaluación fisicoquímica y mecánica de los sistemas estabilizante-suelo en laboratorio
4. Construcción de los tramos de prueba
5. Seguimiento y monitoreo de los productos aplicados

Estas actividades se describen más detalladamente en el CAPÍTULO IV: prueba complementaria. Construcción de tramos piloto.

### 2.11. Diagrama resumen metodológico

En el diagrama de la Figura 2.17 se muestra esquemáticamente un resumen de la metodología descrita en este capítulo

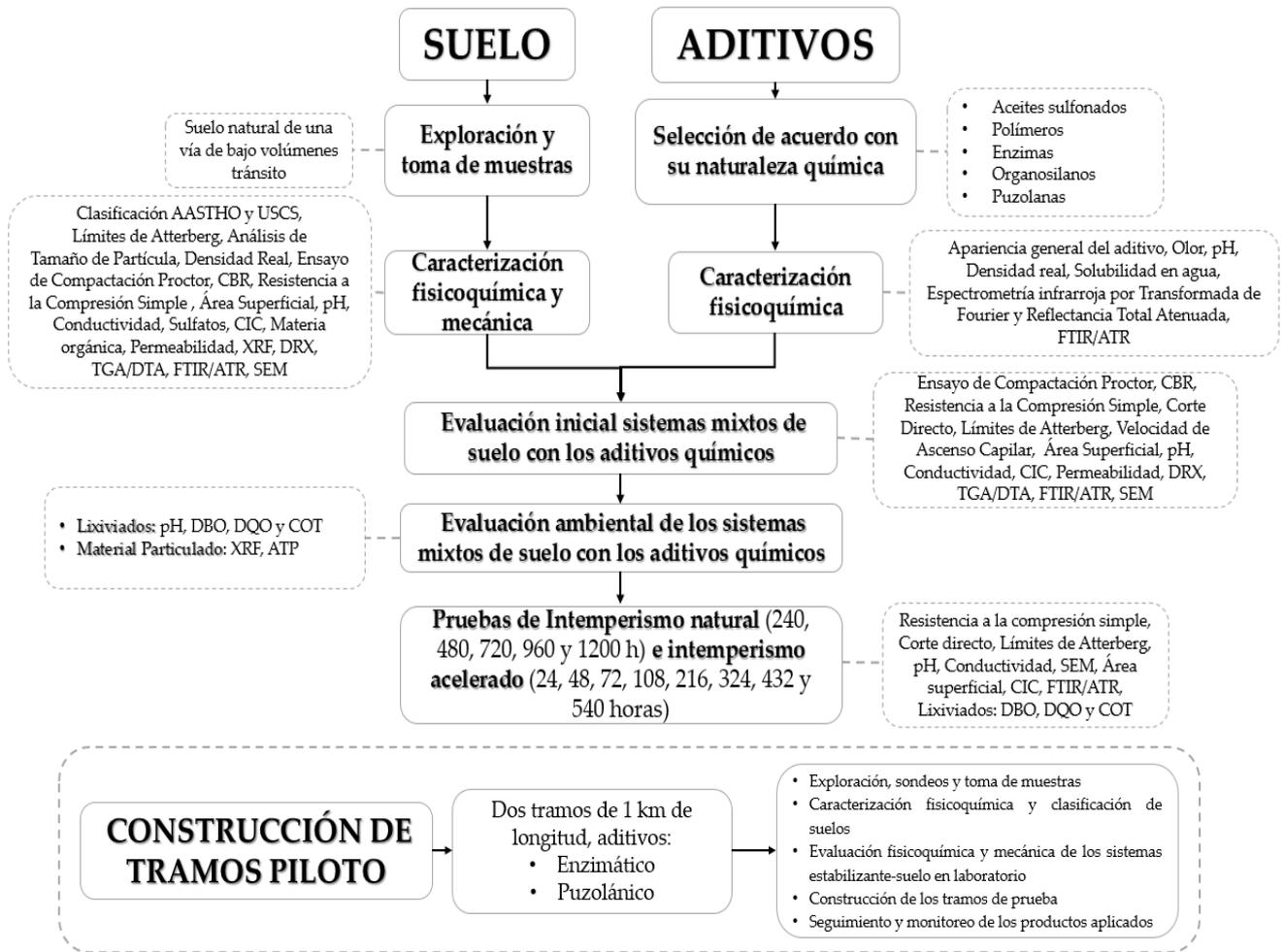


Figura 2.17. Diagrama resumen metodológico

### 3. CAPÍTULO III: Resultados y análisis

#### 3.1. Introducción

El desarrollo de un país está asociado al estado de su infraestructura vial, la cual es un componente de la integración interregional, factor potenciador de la conectividad nacional y diferenciador de la competitividad en bienes y servicios de los distintos sectores que integran su dinámica socio-económica. La construcción de infraestructura vial, como gran consumidora de materiales, explota un sin fin de recursos naturales para responder a los estándares requeridos en los distintos procesos constructivos, tanto desde la propuesta estructural como el de los mismos materiales, los cuales dan forma, soporte, resistencia al deterioro y son los que finalmente deberán garantizar la durabilidad y una respuesta mecánica apropiada.

Una de las limitaciones que enfrenta el desarrollo de la infraestructura vial es el constante deterioro de los recursos naturales que son la principal fuente de materias primas para este sector; su explotación y uso irracional han provocado un agotamiento progresivo y la generación de legislaciones más estrictas tendientes a proteger y mantener estos recursos. Por ello, toman importancia soluciones alternativas como la estabilización química de suelos, que mediante la transformación fisicoquímica, puede mejorar propiedades de resistencia mecánica y de desempeño de materiales haciendo que sean eficientes ante condiciones climáticas y de tránsito propias de vías de bajos volúmenes de tránsito.

Los resultados obtenidos a través de la propuesta metodológica desarrollada en este trabajo, aportan información relevante sobre los productos evaluados como estabilizantes de suelos y contribuyen a la solución de uno de los retos más importantes que tiene el país en materia de infraestructura vial: el desarrollo, implementación y estandarización de nuevos materiales para ser usados en la estabilización de suelos como alternativa a la pavimentación, garantizando el adecuado comportamiento fisicoquímico y mecánico de los materiales; además, de plantear nuevas metodologías para la evaluación de estas tecnologías que permitan orientarlas de acuerdo con las condiciones climáticas y materiales disponibles en las diferentes regiones para procesos alternativos de mejoramiento de suelos viales.

### 3.2. Caracterización físicoquímica y mecánica del suelo

#### Perfil estratigráfico

Los perfiles de suelos constituyen una pieza fundamental en el conocimiento y estudio de estos materiales, estos perfiles muestran a través de sus capas u horizontes el desarrollo que ha tenido el suelo, la diferenciación entre estas capas se debe a procesos formadores tales como aportes de materiales, pérdidas por erosión o lavado, cambios de lugar de las partículas o sustancias, alteraciones orgánicas y minerales (Buol et al., 2011)

En el caso de aplicaciones para infraestructura vial, la forma como se suelen estudiar los suelos in situ consiste en hacer un apique de 1 metro de profundidad y observar las capas que lo componen haciendo una descripción visual/manual de los materiales identificados. Los resultados de la caracterización del suelo in situ obtenidos en el corredor vial Valencia-Villa Nueva se presenta en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Perfil estratigráfico del suelo objeto de estudio

Longitud del Estrato (m)	Descripción Visual / Manual	Fotos
0.00-0.27	Color en húmedo rojo amarillento (5YR 5/8), textura arcillosa, plástico pegajoso, estructura en bloques subangulares de consistencia dura	
0.27-0.36	Color en húmedo Amarillo rojizo con moteo de color negro (5YR 6/8), textura arcillosa, plástico pegajoso, estructura en bloques subangulares de consistencia dura	

0.36-1.00	Color en húmedo amarillo rojizo (5YR 6/8), textura arcillosa, plástico pegajoso, estructura en bloques subangulares de consistencia dura	
-----------	--	--

A partir del perfil estratigráfico se tiene una identificación inicial y caracterización básica del tipo de suelo presente; de acuerdo con los resultados obtenidos, el suelo objeto de estudio no presenta discontinuidades abruptas ni cambios morfológicos significativos en la profundidad estudiada, por lo cual se considera que es un suelo natural homogéneo: con el mismo origen geológico y geomorfológico; se constata que este tramo del corredor vial está constituido por el suelo natural y no ha tenido aporte de material de cantera o afirmado. De otra parte, por la textura arcillosa y los rasgos plásticos pegajosos identificados en el proceso de descripción visual/manual, es posible estimar que las características geotécnicas de este suelo son muy desfavorables en relación a las propiedades ingenieriles que se requieren para que sea apto en obras de tierra o aplicaciones de infraestructura vial.

Tal como se describe en el desarrollo metodológico, posterior al muestreo el material fue disgregado en el laboratorio, secado al aire durante aproximadamente 45 días y almacenado en costales para su posterior caracterización y evaluación con los aditivos químicos.

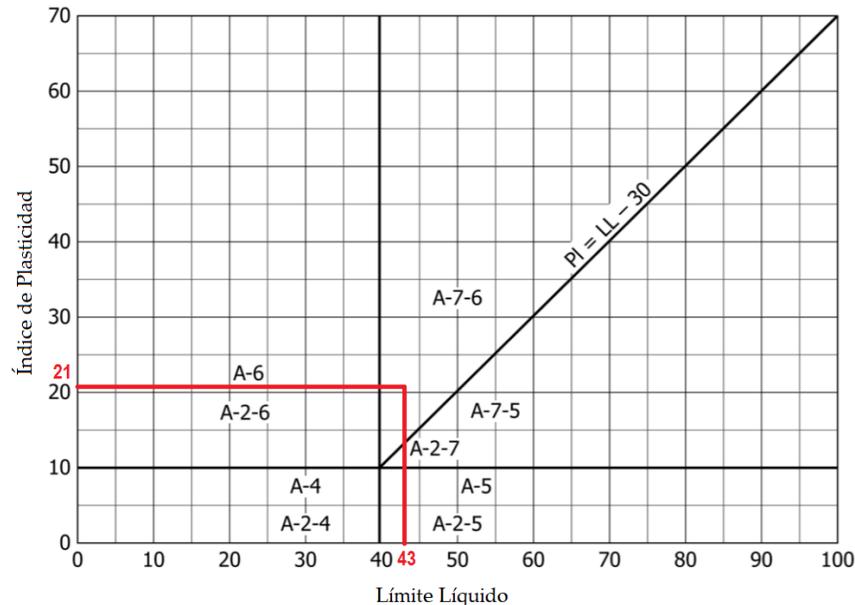
#### Clasificación y caracterización del suelo en laboratorio

La clasificación del suelo se realizó de acuerdo con los sistemas AASTHO y USCS, tal como se muestra en la Tabla 3.2

**Tabla 3.2.** Clasificación del suelo de acuerdo con los sistemas AASTHO y USCS

CLASIFICACIÓN DEL SUELO	
Descripción	Suelo arcilloso color pardo rojizo
Clasificación AASTHO	A-7-6 (13)
Clasificación USCS	CL
% en peso pasante malla 4	99.16
% en peso pasante malla 40	85.85
% en peso pasante malla 200	72.62
Límite Líquido	43
Límite Plástico	22
Índice de Plasticidad	21
Densidad real (g/cm <sup>3</sup> ) con densímetro Accupyc	2.55

Según el sistema de clasificación ASSTHO el suelo se ubica en el grupo A-7-6, como se muestra en la Figura 3.1. Este grupo se refiere a suelos arcillosos con malas propiedades ingenieriles; adicionalmente, el índice de grupo es 13 con lo cual, de acuerdo con este sistema de clasificación, se puede deducir que el suelo estudiado presenta una baja calidad como suelo subrasante de una vía. Sin embargo, hay que tener en cuenta que al tratarse de un suelo tropical, el sistema de clasificación ASSTHO puede presentar limitaciones y por tanto es necesario evaluar otras propiedades para determinar la calidad del suelo evaluado.



**Figura 3.1.** Rango del límite líquido y del índice de plasticidad según el sistema de clasificación AASTHO (Braja M Das, 2013)

Por otro lado, de acuerdo con el sistema de clasificación USCS el suelo puede denominarse como CL: *arcilla magra con arena*; así mismo, en la carta de plasticidad el suelo se ubica en la región de arcillas inorgánicas de plasticidad media tal como se ilustra en la Figura 3.2.

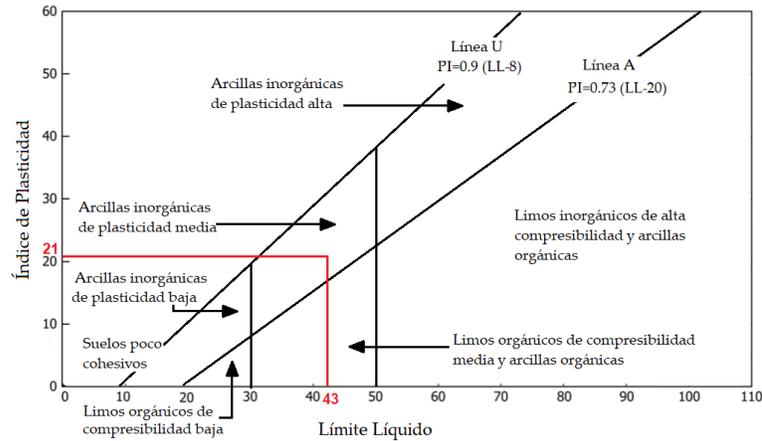


Figura 3.2. Carta de plasticidad sistema USCS (Braja M Das, 2013)

Como parte de la caracterización inicial del suelo se realizó el análisis de distribución granulométrica por tamizado hasta la malla N° 200 —apertura de 75  $\mu\text{m}$ — y con la fracción pasante de esta malla se realizó un análisis de tamaño de partícula por sedimentación usando un hidrómetro, los resultados se muestran en la Figura 3.3.

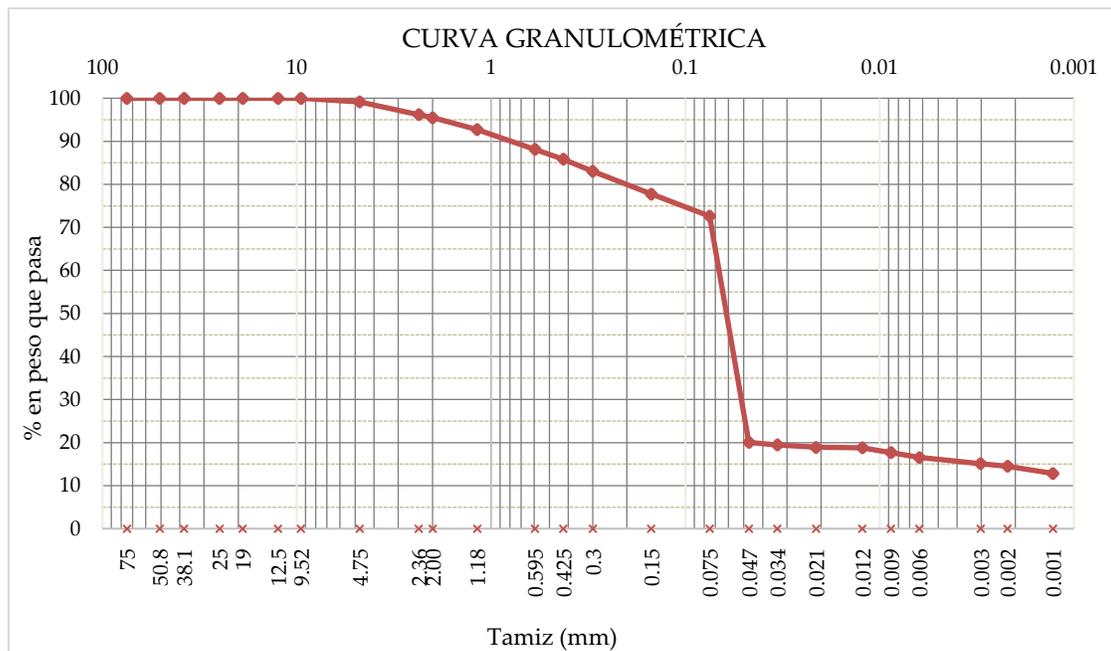


Figura 3.3. Curva granulométrica del suelo estudiado

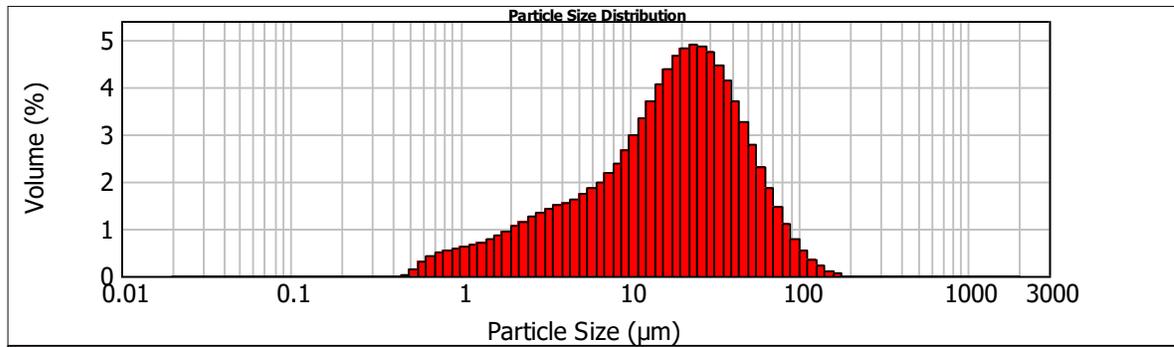
Estos análisis de tamaño de partícula permiten la identificación de la textura del suelo y dan una idea del grado de inestabilidad de éste, entendiendo que en principio los tamaños de partícula más pequeños tienden a presentar mayor actividad química que los tamaños más grandes. De acuerdo con la norma ASTM D422 las respectivas fracciones calculadas según el tamaño de partícula se muestran en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3.** Clasificación de fracciones del suelo según la distribución de tamaños de partícula

Clase	Rango diámetro de partícula (mm)	% en peso suelo objeto de estudio
Grava	>4.75	0.8 %
Arena gruesa	4.75-2.00	3.7 %
Arena media	2.0-0.425	9.7 %
Arena fina	0.425-0.075	13.2 %
Limo	0.075-0.005	57.1 %
Arcilla	<0.005	15.5 %

Adicionalmente, a la fracción pasante de la malla 200 —75  $\mu\text{m}$ — se le realizó un análisis de tamaño de partícula por difracción láser; este ensayo fue realizado en un equipo Malvern Mastersizer 2000 particle size analyzer, el cual mide la distribución de tamaño de partícula mediante la variación angular de la intensidad de la luz dispersada cuando un rayo láser pasa a través de una muestra de partículas sólidas contenidas en un medio líquido. Las partículas finas del suelo fueron dispersadas en un medio acuoso y se consideró un índice de refracción de 1.62, característico de los minerales compuestos por sílice y alúmina.

El resultado de la distribución de tamaños de partícula arrojado por el equipo se muestra en la Figura 3.4, en esta también se muestran los percentiles del 10, 50 y 90% de la distribución. En la Figura 3.5 se muestra la curva granulométrica de la fracción fina construida a partir de los resultados obtenidos por difracción láser. En la curva se puede observar que el porcentaje (%) en volumen menor a 5 $\mu\text{m}$  —fracción arcillosa— en la muestra analizada es de 18%.



Percentiles al 10, 50 y 90% de la distribución de tamaños		
$D_{10} = 2.706 \mu\text{m}$	$D_{50} = 18.279 \mu\text{m}$	$D_{90} = 53.412 \mu\text{m}$

Figura 3.4. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la fracción fina del suelo estudiado obtenido por difracción láser

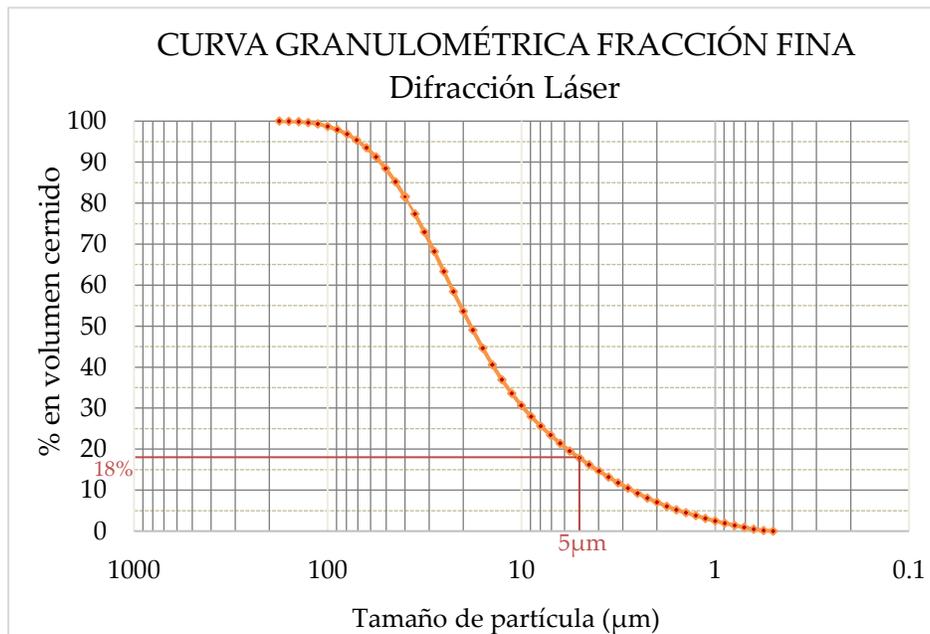


Figura 3.5. Curva granulométrica fracción fina obtenida por difracción láser

Dado que los resultados obtenidos en el análisis de tamaño de partícula por difracción láser se encuentran en porcentaje de volumen, se realizaron mediciones de densidad real por Accupyc para diferentes fracciones del suelo. Los resultados se muestran en la Figura 3.6 y se puede concluir que para tamaños de partículas menores a  $1000 \mu\text{m}$ , la densidad tiende a ser muy homogénea, con lo cual se puede concluir que los porcentajes en volumen obtenidos en el análisis pueden ser tomados como porcentajes en masa, para completar así el análisis granulométrico por tamizado.

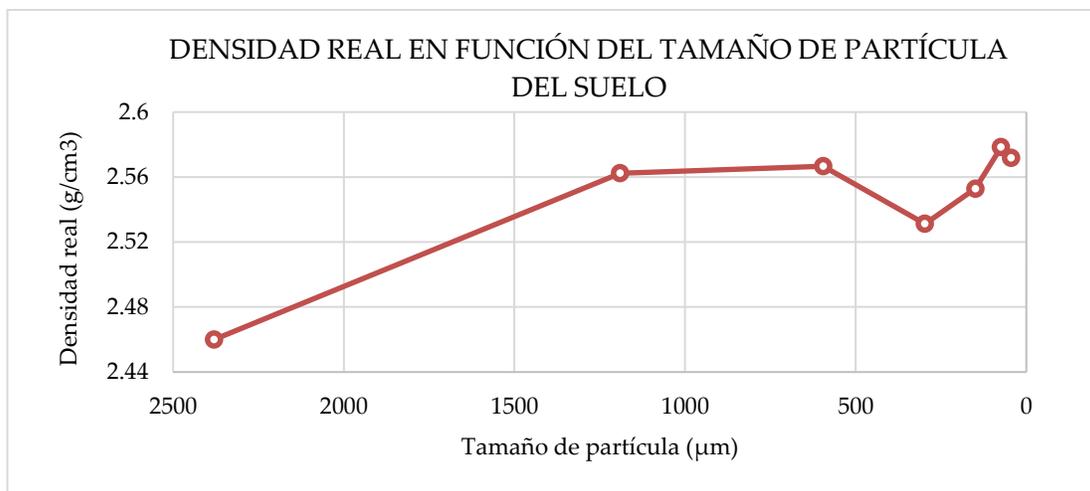


Figura 3.6. Resultados de densidad para diferentes fracciones del suelo.

Teniendo en cuenta los resultados del análisis de tamaño de partícula por difracción láser de la fracción fina del suelo pasante mala 200, y de acuerdo con la clasificación establecida en la norma ASTM D422 se calculan las respectivas fracciones finas del suelo según el tamaño de partícula, la Tabla 3.4. En este caso el porcentaje (%) en peso de limos y arcillas en el suelo es de 55.92% y 13.07% respectivamente, valores cercanos a los resultados obtenido en el ensayo de hidrómetro del 57.1% en peso de limos y 15.5 % en peso de arcillas. Con estos resultados se valida el uso del análisis de tamaño de partícula por difracción láser para completar la curva granulométrica por debajo de la malla 200. Es importante señalar y resaltar que el ATP por difracción láser es un ensayo mucho más rápido y sencillo experimentalmente que el ensayo por hidrómetro.

Tabla 3.4. Criterios de clasificación de la fracción fina de suelos

Clase	Rango diámetro de partícula (mm)	% en peso suelo objeto de estudio
Arena fina	0.425-0.075	3.63 %
Limo	0.075-0.005	55.92 %
Arcilla	<0.005	13.07%

De igual modo, el suelo objeto de estudio fue caracterizado en función de sus propiedades fisicoquímicas, tal como se muestra en la Tabla 3.5. Estas propiedades fisicoquímicas se relacionan directamente con la composición mineralógica del suelo y dan indicios de sus propiedades ingenieriles. El contenido de materia orgánica es un parámetro importante en este tipo de aplicaciones, puesto que altos contenidos afectan los procesos de hidratación y las reacciones puzolánicas necesarias para que el suelo alcance la resistencia mecánica apropiada cuando es tratado con productos cementantes (Tremblay et al., 2002). Varios estudios han demostrado que la resistencia a la compresión de suelos con alto

contenido de materia orgánica tratados con productos cementantes a base de calcio, disminuye a medida que el ácido húmico aumenta por la descomposición de la materia orgánica (Ma et al., 2016) (Chen & Wang, 2006). Algunas investigaciones señalan que no se deben usar productos cementantes para estabilizar suelos con más del 2 % en peso de materia orgánica (Rivera et al., 2020). Shao et al (2013) han encontrado que la resistencia de los materiales se ve comprometida cuando el contenido de materia orgánica supera un 6% en peso. En Colombia la normativa establece que el máximo contenido de materia orgánica aceptado para el tratamiento de un suelo con cemento es del 1% en peso (Instituto Nacional de Vías INVÍAS, 2013). Para el suelo objeto de estudio en este trabajo se obtuvo un contenido de materia orgánica menor al 4% y por las dosificaciones fijadas de los productos cementantes evaluados, es de esperar que las propiedades mecánicas de los sistemas mixtos de suelo con los aditivos puzolánicos no se afecten en forma significativa.

Según el resultado obtenido para el pH y de acuerdo con los criterios de la Soil Survey Staff (SSDS 1993) el suelo objeto de estudio se puede clasificar como fuertemente ácido; la acidez de este tipo de suelos puede deberse en gran medida a las formas de aluminio intercambiable  $Al(OH)^{2+}$  y  $Al^{3+}$ , los grupos ácidos de la materia orgánica y la hidrólisis del  $CO_2$  (Zapata Hernández, 2004). Hay que mencionar además que los suelos ácidos son predominantes en Colombia y que según datos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC más del 85% del área del país está ocupada por suelos de este grupo de reacción (Jaramillo, 2011)

El resultado obtenido para la conductividad eléctrica es bajo y se encuentra en un rango típico para un suelo natural de características arcillosas, con este resultado se puede concluir que el suelo objeto de estudio no presenta una alta salinidad (Salimi & Ghorbani, 2019), (Jaramillo, 2014). Dentro de las sales que están presentes en el suelo, el contenido de sulfatos es una medida importante en los suelos que van a ser tratados con productos cementantes a base de calcio, puesto que en determinadas concentraciones se ha encontrado que puede afectar las reacciones puzolánicas y reaccionar con el calcio para generar minerales expansivos como la etringita y la taumasita (M. Zhang et al., 2015). El resultado obtenido para el suelo estudiado está por debajo de 0.2%, que es el límite de seguridad recomendado por el Departamento de Transporte de Texas TxDOT, es decir este contenido de sulfatos no representa riesgo para la estabilización del suelo con productos cementantes (Little & Nair, 2009).

De acuerdo con el resultado obtenido para la capacidad de intercambio catiónico, y según datos reportados en la literatura para diferentes minerales —caolinita en el rango de 5 - 15 meq/100g suelo seco e illita entre 20 - 50 meq/100g suelo seco— (Besoain, 1985) se puede

inferir que el suelo estudiado puede contener caolinita y/o illita dentro de su composición como mineral arcilloso.

Por otro lado, el resultado obtenido para el área superficial se encuentra en un valor intermedio entre los valores que la literatura reporta para la caolinita y la illita, de 15 y 80 m<sup>2</sup>/g respectivamente (Braja M Das, 2013); lo cual podría indicar que estos son los minerales arcillosos presentes en el suelo que va a ser tratado.

**Tabla 3.5.** Caracterización fisicoquímica del suelo estudiado

CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DEL SUELO	
Contenido de Materia Orgánica por Ignición (%)	3.49
pH @ 22°C	5.2
Contenido de Sulfatos (ppm)	480
Conductividad (mS/cm) @ 21.6 °C	0.151
Capacidad de intercambio catiónico (meq/100g suelo seco)	20.88
Área superficial de la fracción fina (m <sup>2</sup> /g)	44.215

Se realizaron ensayos para determinar las propiedades mecánicas del suelo, Tabla 3.6. Los resultados obtenidos para el CBR de 5.5% y la resistencia a la compresión no confinada de 224 kPa son valores que se asocian a características geotécnicas desfavorables en relación a las propiedades ingenieriles de un material que va a ser usado en aplicaciones para infraestructura vial. La literatura consultada coincide en indicar que materiales con valores de CBR por debajo del 6% se consideran pobres y deben ser mejorados o reemplazados (Carrero & Ramirez, 2020), (García Gonzales, 2016). Además, la normativa colombiana exige un CBR>15% para materiales que se van a usar como afirmados en la conformación de vías (Instituto Nacional de Vías INVÍAS, 2013). Por su parte, del ensayo de permeabilidad se obtuvo la conductividad hidráulica  $k$  del suelo natural, la cual está relacionada estrechamente con el tamaño de grano; el valor obtenido es característico de un suelo fino con características arcillosas, entre  $10^{-8}$  y  $10^{-10}$ , de acuerdo con la literatura (Verruijt, 2018).

**Tabla 3.6.** Resultados de la caracterización mecánica del suelo natural

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL SUELO	
Peso Unitario Seco Máximo (kN/m <sup>3</sup> )	15.95
Densidad Máxima Seca (g/cm <sup>3</sup> )	1.626
Humedad Óptima (%)	22
CBR Corregido (%) al 100 % de Compactación	5.0
Porcentaje de Expansión (%)	1.1
Resistencia a la Compresión no Confinada (kPa)	224
Módulo Elástico E50 (KPa)	151.0
Conductividad Hidráulica $k$ (m/s)	$1.36 \times 10^{-9}$

Para determinar la composición química del suelo se realizó Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X, XRF. Los resultados obtenidos, mostrados en la Tabla 3.7 son típicos de la composición química de un suelo natural que está compuesto principalmente por sílice  $\text{SiO}_2$  y alúmina  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; se encuentran además otros elementos como el Ti, Fe y Mg probablemente como sustituciones isomórficas; en tanto que los iones Ca, Na y K están presentes como cationes de intercambio entre las capas de la fracción arcillosa del suelo.

Tabla 3.7. Resultados análisis XRF del suelo

ÓXIDOS*	RESULTADO % p/p
$\text{SiO}_2$	53.56
$\text{Al}_2\text{O}_3$	25.57
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	9.09
MgO	1.21
$\text{TiO}_2$	1.04
$\text{K}_2\text{O}$	0.89
$\text{Na}_2\text{O}$	0.41
CaO	0.38
LOI	7.49

\*Elementos identificados < 0.1 % p/p: P, V, Ba, Mn, Cr, Zr, Cu, Ni, Zn, Sr, Sc.

Para determinar la composición mineralógica del suelo se realizó Difractometría de Rayos X, DRX. Para realizar este análisis se utilizó una muestra en su estado natural tamizada por la malla 200  $-75 \mu\text{m}-$ , se considera que con esta muestra en estado natural es posible identificar las fases arcillosas del suelo en tanto que el porcentaje de materia orgánica es relativamente bajo y al realizar la prueba de reactividad con HCl se descartó el contenido de carbonatos en el suelo. Por otra parte, el análisis de composición química XRF realizado muestra un contenido de calcio por debajo del 1%. El difractograma con la identificación de fases, analizado con el PANalytical X'Pert HighScore Plus, se muestra en la Figura 3.7. El fondo alto al inicio del difractograma  $-$ ángulos bajos $-$ es un aspecto instrumental, propio del equipo donde se realizó el ensayo y no interfiere en el análisis de la muestra.

Posterior a la identificación cualitativa de fases presentes en la muestra, con el fin de cuantificar dichas fases el difractograma fue refinado mediante el método Rietveld. Como parámetros de calidad para el refinado se estableció un weighted R profile  $R_{wp} < 10$  y un goodness of fit  $< 4$ , Tabla 3.8. Los resultados obtenidos muestran que un gran porcentaje de la muestra es cuarzo- $\alpha$ ; se evidencia la presencia de caolinita e illita como minerales arcillosos en el suelo objeto de estudio, obteniéndose un 21.9 % en peso de la fracción fina del suelo, pasante malla 200, lo cual equivale a un 15.9% en peso de todo el suelo, estos valores son similares a los estimados teniendo en cuenta la distribución granulométrica.

El porcentaje de 36.2% en peso de amorfos obtenido en el análisis DRX equivale aproximadamente al 25% en peso del suelo, en este porcentaje está incluido el 3.49% de materia orgánica, los óxidos amorfos y demás fases amorfas de la sílice y la alúmina asociadas a procesos de meteorización tales como el alofán (Besoain, 1985) (Silva-Yumi et al., 2021).

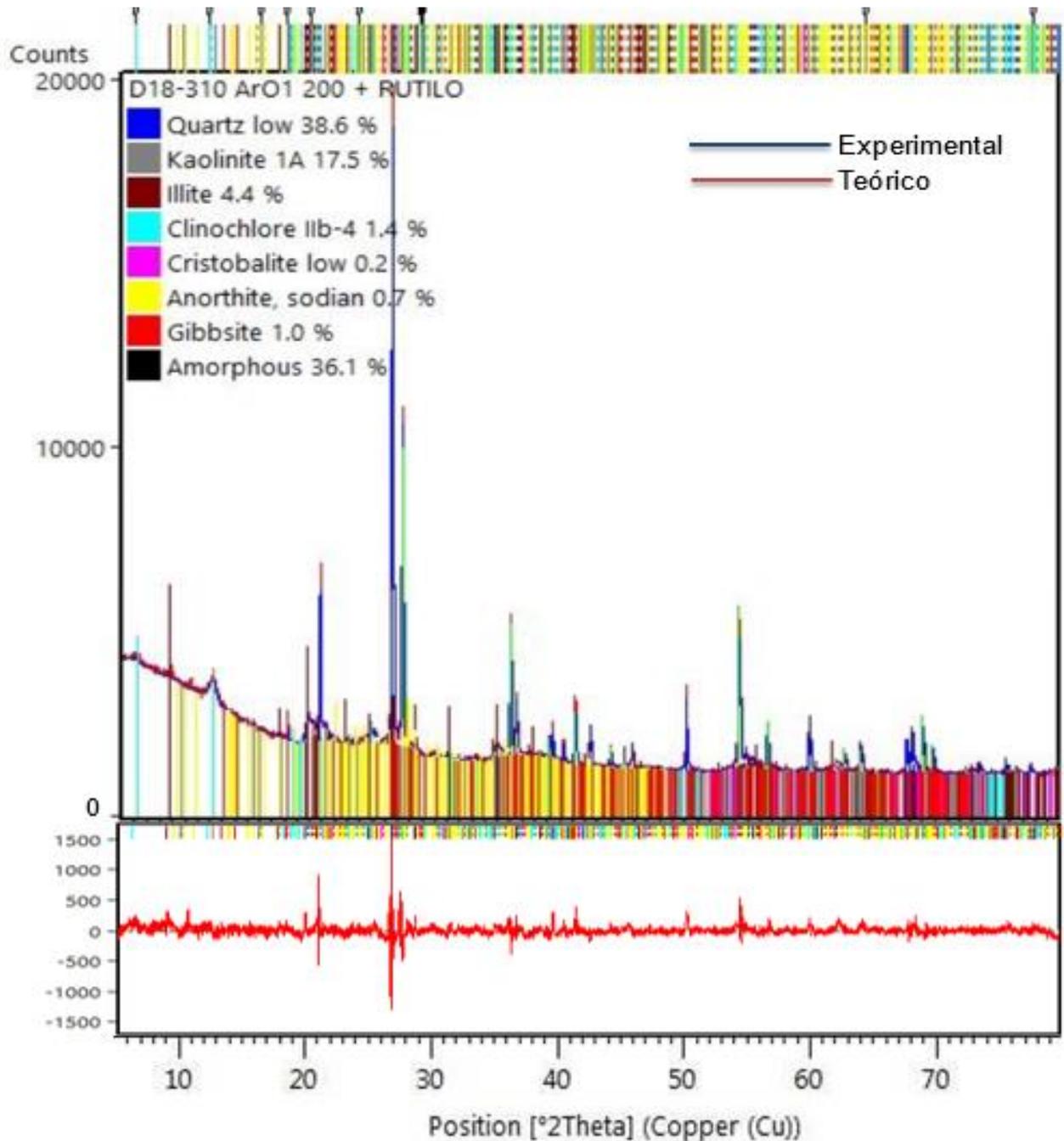


Figura 3.7. Difractograma de rayos X del suelo, con identificación de fases obtenido mediante refinado por el método Rietveld

**Tabla 3.8.** Resultados análisis DRX del suelo estudiado

RESULTADOS DEL ANÁLISIS CUANTITATIVO			
Weighted R Profile		3.5620	
Goodness of Fit		2.4613	
Fase	PDF*	Fases Cristalinas	% en Peso
Cuarzo	ICSD 98-008-3849	SiO <sub>2</sub>	38.6
Caolinita	ICSD 98-006-8698	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	17.5
Cristobalita	ICSD 98-007-5300	SiO <sub>2</sub>	0.2
Illita	ICSD 98-016-6963	H <sub>2</sub> Al <sub>2.59</sub> Ca <sub>0.01</sub> Fe <sub>0.04</sub> K <sub>0.71</sub> Mg <sub>0.15</sub> Na <sub>0.01</sub> O <sub>12</sub> Si <sub>3.27</sub>	4.4
Anortita sódica	ICSD 98-020-1648	Al <sub>1.66</sub> Ca <sub>0.66</sub> Na <sub>0.34</sub> Si <sub>2.34</sub> O <sub>8</sub>	0.7
Gibbsita	ICSD 98-024-5301	Al(OH) <sub>3</sub>	1.0
Clinocloro (Iib-4)	ICSD 98-010-0230	H <sub>16</sub> Al <sub>2.884</sub> Fe <sub>0.874</sub> Mg <sub>11.126</sub> O <sub>36</sub> Si <sub>5.116</sub>	1.4
Amorfos	-	-	36.1

\* PDF: Powder Diffraction File, ICSD: The Inorganic Crystal Structure Database

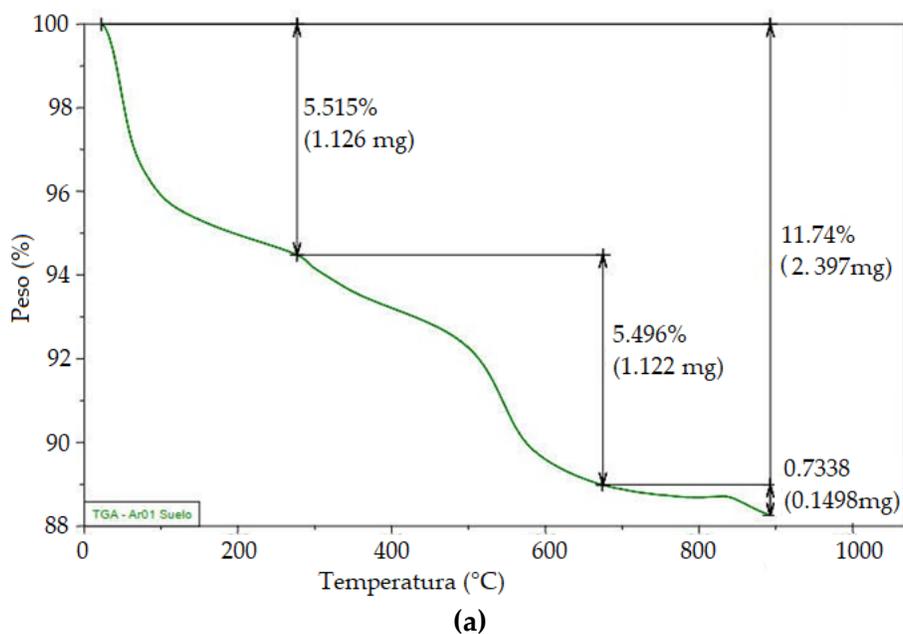
Adicionalmente se realizaron Análisis Termogravimétrico –TGA– y Análisis Térmico Diferencial –DTA– al suelo, para ello se empleó una velocidad de calentamiento de 10°C/min y una atmósfera inerte de nitrógeno para evitar la posible oxidación de los compuestos intermedios que se van formando por acción de la temperatura. Los resultados correspondientes al análisis termogravimétrico se muestran en la Figura 3.8 (a) y (b), el termograma presenta la mayor variación en la pérdida de masa en el rango de temperatura comprendido entre 30 °C y 650 °C esto es debido a la deshidratación y deshidroxilación de los silicatos presentes en el suelo.

Los resultados del Análisis Térmico Diferencial, Figura 3.9 (a) y (b), muestran eventos endotérmicos y exotérmicos del material que permiten identificar transformaciones físicoquímicas asociadas a ciertos compuestos en función de la temperatura. El proceso endotérmico identificado a una temperatura menor de 100°C se asocia a la evaporación de agua de adsorción contenida en el suelo; el segundo proceso endotérmico identificado alrededor de 270°C se asocia a la pérdida de las moléculas de agua presentes en los hidratos de óxido de hierro contenidos en el suelo.

Alrededor de los 500°C se identifica un proceso endotérmico asociado al fenómeno de deshidroxilación de los minerales arcillosos presentes en el material: caolinita e illita. Este proceso de deshidroxilación no afecta la estructura de la illita que se mantiene en su forma anhidra hasta una temperatura aproximada de 900°C, luego de la cual y mediante un proceso exotérmico aparece una estructura espinela que se mantiene hasta 1100°C, temperatura a la cual se forma la fase mullita. Por su parte, la caolinita mediante un proceso endotérmico alrededor de 500°C, pierde iones hidroxilo de su estructura transformándose en metacaolin, fase que se mantiene hasta una temperatura aproximada de 950°C. En este punto, los procesos exotérmicos favorecen la formación

de una estructura tipo espinela con liberación de sílica amorfa SiO<sub>2</sub>. A mayores temperaturas la fase espinela se transforma en mullita y la sílica amorfa en cristobalita (Capel Martínez et al., 2013).

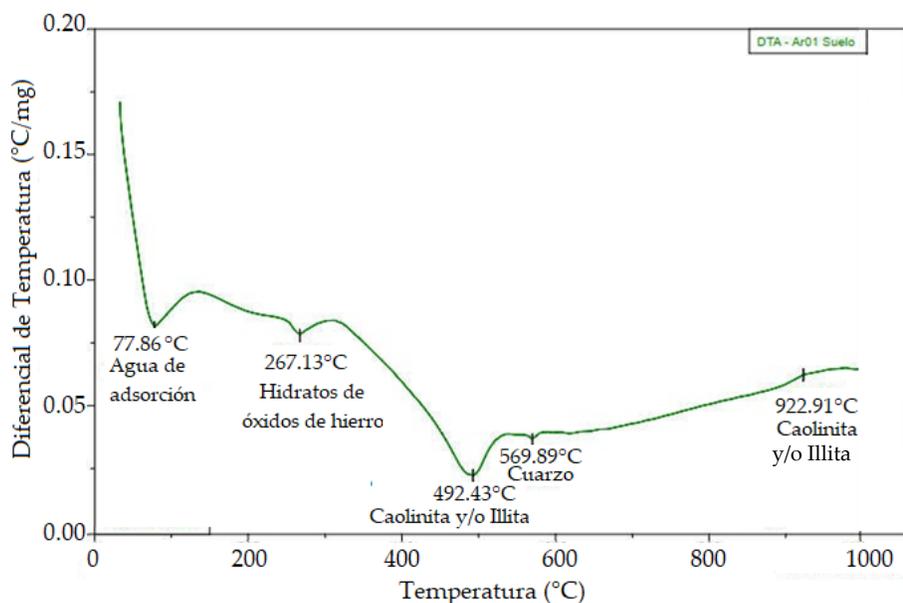
Adicionalmente, alrededor de 570°C se evidencia una transición endotérmica que se asocia al cambio de fase cristalina de cuarzo- $\alpha$  —cuarzo de baja, simetría trigonal— a cuarzo- $\beta$  —cuarzo de alta, simetría hexagonal—, transición de tipo desplazativo que indica que el volumen de la muestra aumenta debido al cambio en las dimensiones de la red cristalina sin que se presente ruptura de los enlaces (Hoyos Palacio et al., 2015).



RESULTADOS DEL ANÁLISIS TGA		
Pérdidas	Porcentaje (%)	Masa (mg)
1	5.515	1.126
2	5.496	1.122
3	0.7338	0.1498
Total	11.74	2.397

(b)

Figura 3.8. (a) Gráfica obtenida por TGA de la muestra de suelo. (b) Resultados cuantitativos de TGA de la muestra de suelo



(a)

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DTA		
Temperatura °C	Tipo de Reacción	Compuestos asociados
77.86	Endotérmica de evaporación de agua	Agua de adsorción
267.13	Endotérmica de deshidratación	Hidratos de óxidos de Fe
492.43	Endotérmica de deshidroxilación	Caolinita y/o illita
569.89	Endotérmica, transformación de cuarzo- $\alpha$ a cuarzo- $\beta$	Cuarzo
922.91	Exotérmica de nucleación, formación de fases espinela	Caolinita/Illita

(b)

**Figura 3.9.** (a) Gráfica obtenida por DTA de la muestra de suelo. (b) Resultados de DTA de la muestra de suelo y compuestos asociados.

En la Figura 3.10 se muestra el espectro infrarrojo del suelo estudiado. La muestra analizada corresponde al suelo secado al aire durante aproximadamente 45 días después del muestreo. Las bandas que se observan en el espectro a 3697 y 3616  $\text{cm}^{-1}$  corresponden a grupos OH asociados al mineral arcilloso como la caolinita y illita; de acuerdo con la literatura las bandas típicas de los OH asociados a la colinita que están entre 3695, 3070 y 3650  $\text{cm}^{-1}$  corresponden a los grupos hidroxilos que están en la superficie de las láminas del material y se consideran OH libres; ahora bien, la banda cercana a 3620  $\text{cm}^{-1}$  se atribuye a

los OH internos del mineral arcilloso. Adicionalmente, la banda infrarroja observada en  $1645\text{ cm}^{-1}$  se asigna al modo de flexión de las moléculas de agua en estado líquido que están unidas con menor fuerza a las estructuras arcillosas (Besoain, 1985), (Alazigha et al., 2018).

El doblete obtenido en las bandas a  $1026$  y  $1001\text{ cm}^{-1}$  se atribuyen a la extensión de los enlace Si-O presente en los tetraedros de sílice, que se encuentran en varios de los compuestos identificados en el suelo tales como el cuarzo, la anortita, la cristobalita y los minerales arcillosos como la caolinita y la illita (Sharma et al., 2017). De acuerdo con la literatura, los silicatos presentan dos regiones principales de absorción fuerte, cerca de los  $1000\text{ cm}^{-1}$  debido a la extensión del enlace Si-O y otras señales alrededor de los  $500\text{ cm}^{-1}$  debido a la deformación de este enlace, a menudo asociada a vibraciones de los enlaces de otros cationes con el oxígeno.

Por otro lado la señal obtenida en  $910\text{ cm}^{-1}$  se atribuye a las vibraciones generadas en los enlaces Al-OH de la capa de alúmina y la banda observada en  $744\text{ cm}^{-1}$  puede atribuirse al estiramiento del enlace Al-O (Fasihnikoutalab et al., 2017); así mismo la banda obtenida en  $827\text{ cm}^{-1}$  corresponde a vibraciones O-Fe-Al y se presenta cuando se da la sustitución isomórfica del Al por Fe en la capa octaédrica.

Las bandas observadas en  $794$  y  $779\text{ cm}^{-1}$  indican la presencia de cuarzo en la muestra (Latifi et al., 2016). El resto de bandas obtenidas en el rango de  $600\text{ cm}^{-1}$  pueden atribuirse a la sustitución del Si por Al en la red de sílice, estas son características de las vibraciones Si-O-Al (Besoain, 1985)

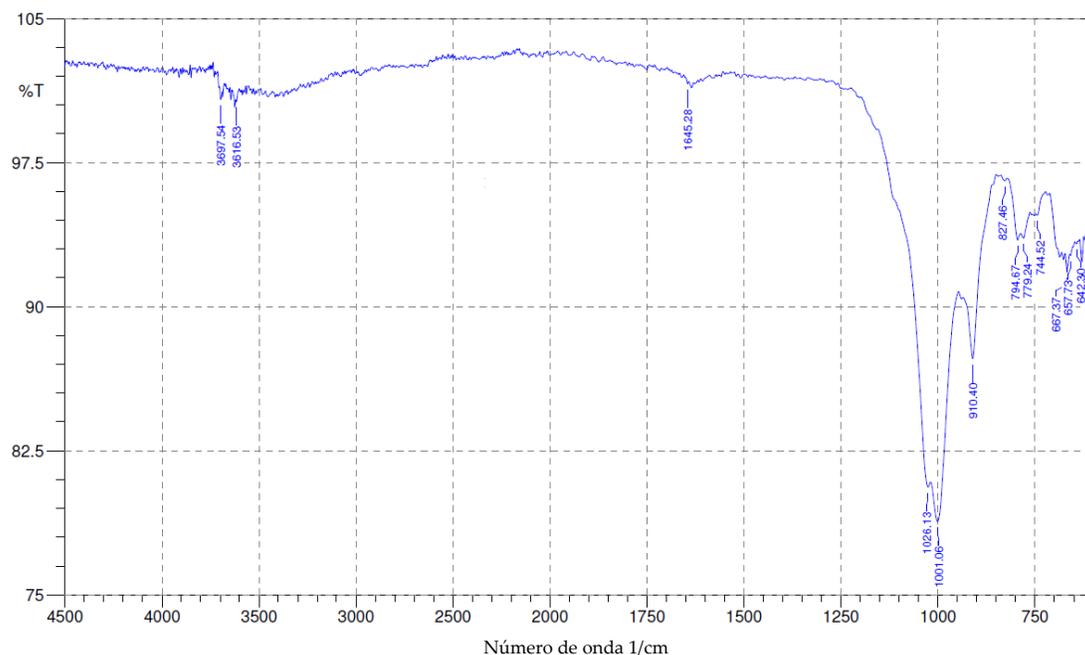


Figura 3.10. Espectro FTIR del suelo estudiado

### Resumen de los resultados de clasificación y caracterización del suelo en laboratorio

En el esquema mostrado en la Figura 3.11 se resumen los principales resultados obtenidos de la clasificación y caracterización del suelo estudiado.

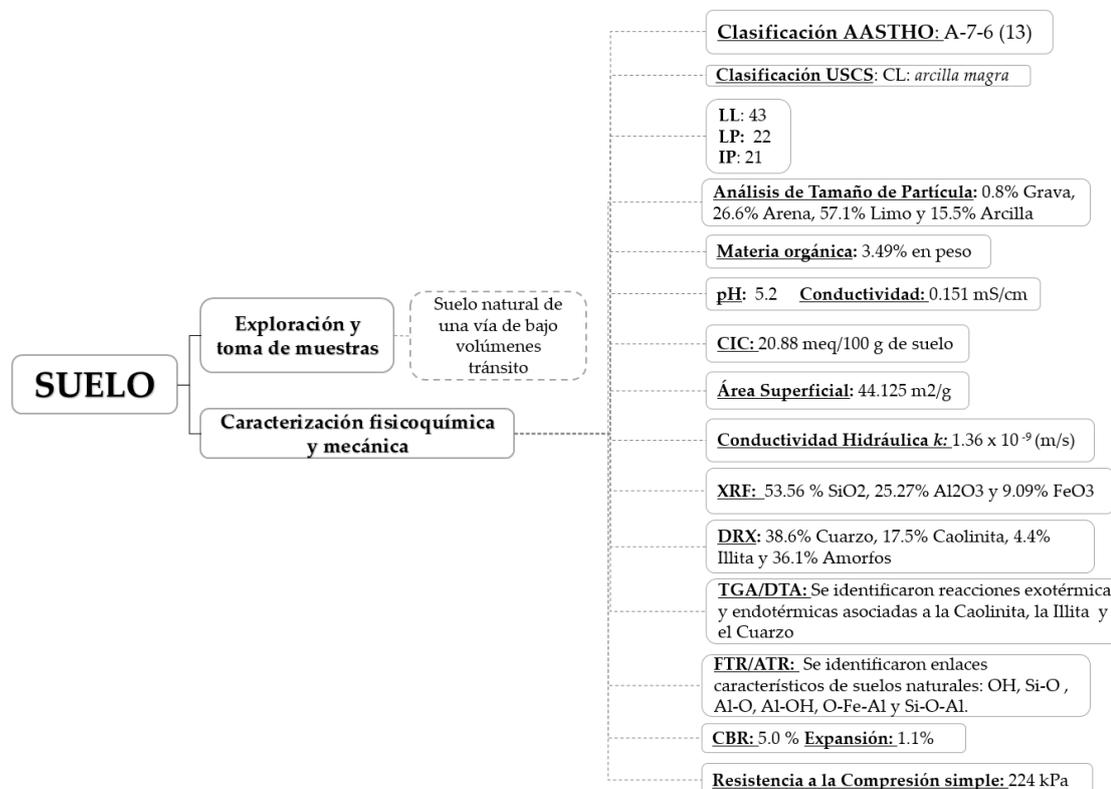


Figura 3.11. Resumen de los resultados de clasificación y caracterización del suelo en laboratorio

### 3.3. Caracterización fisicoquímica de los aditivos

Con el fin de profundizar en el conocimiento sobre los aditivos evaluados como estabilizantes de suelos, se realizó una caracterización fisicoquímica básica de estos productos, los resultados se muestran en la Tabla 3.9 y en general son acordes con lo reportado en las fichas técnicas de los productos.

Tabla 3.9. Resultados de caracterización fisicoquímica de los aditivos evaluados

PROPIEDAD	Aceite Sulfonado	Polímero	Enzima	Organosilano	Zeolita
Apariencia general	Líquido amarillo verdoso	Líquido color blanco lechoso	Líquido viscoso color café oscuro	Líquido color naranja rojizo	Sólido blanco grisáceo
Olor	Leve olor a hidrocarburo	Olor acrílico	Olor a hierba fermentada	Olor dulce	Inodoro
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.19	1.06	1.08	1.06	-
Solubilidad	Soluble en agua	Soluble en agua	Soluble en agua	Soluble en agua	-
pH @ 22.7°C	1.1	7.1	5.4	6.3	-

El producto zeolítico también fue caracterizado, mediante análisis de Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X, XRF, Tabla 3.10 y Difractometría de Rayos X, DRX, Figura 3.12. Los resultados indican que los componentes principales de este material son las sales de metales alcalinos, entre los cuales se identificó la halita NaCl y la silvina KCl; también se encontró la presencia de silicatos de metales alcalinotérreos, como la cordierita; adicionalmente, se identifica cuarzo y calcita dentro de los componentes. Finalmente, el mineral zeolítico identificado corresponde a la gismondina y representa el 8.4% en peso del material.

Tabla 3.10. Resultados análisis XRF del producto puzolánico

Elemento	% Peso
Cl	39.08
CaO	21.98
Na <sub>2</sub> O	16.06
K <sub>2</sub> O	8.95
MgO	6.16
SiO <sub>2</sub>	3.74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.17
SO <sub>3</sub>	1.21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.37
Br	0.09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06
TiO <sub>2</sub>	0.03
Total	99.9

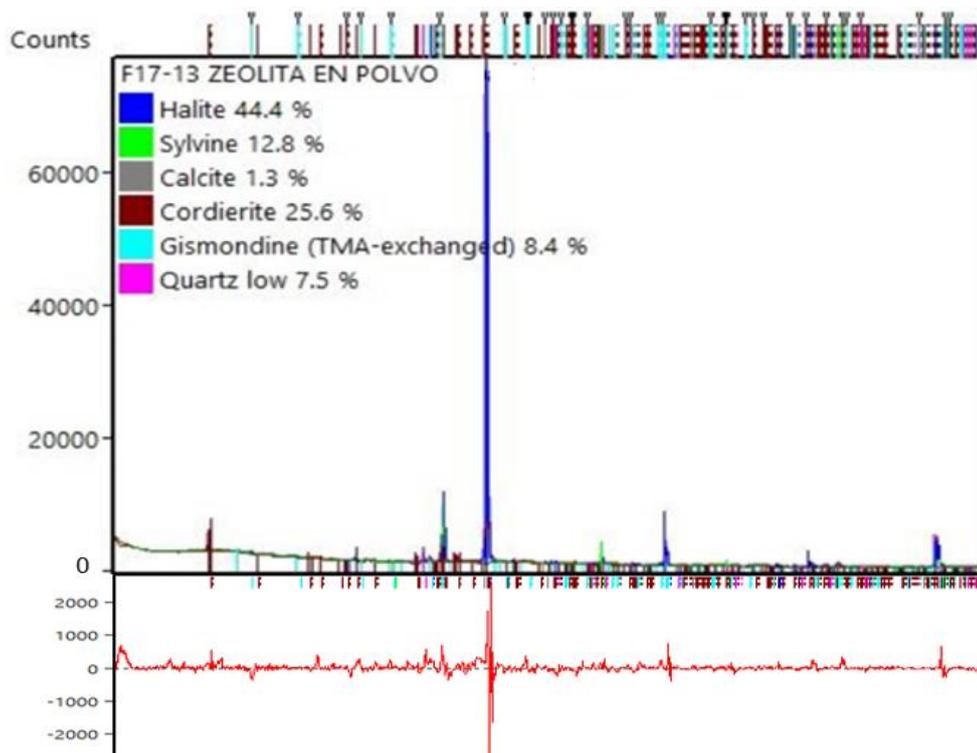


Figura 3.12. Difractograma de rayos X con identificación de fases del producto puzolánico

### Resumen de los resultados de caracterización fisicoquímica de los aditivos

En la Figura 3.13 se muestra esquemáticamente un resumen de los resultados obtenidos en la caracterización de los aditivos evaluados.



Figura 3.13. Resumen de los resultados de caracterización fisicoquímica de los aditivos evaluados

### 3.4. Evaluación inicial del desempeño de los sistemas mixtos de suelo con los aditivos químicos

#### Ensayo Proctor Estándar

Los resultados obtenidos en el ensayo de compactación Proctor, mostrados en las Figura 3.14, Figura 3.15 y Tabla 3.11. Para analizar estos resultados se debe tener en cuenta que los estimativos de desviación estándar aceptados por la norma del ensayo según el tipo de suelo evaluado son: 0.5% para el contenido de humedad óptima y 0.11 kN/m<sup>3</sup> –0.7 lb-f/ft<sup>3</sup>— para el peso unitario seco. Así, se encuentra un aumento en el peso unitario seco y por ende en la densidad máxima seca de los materiales aditivados con el aceite sulfonado y con la enzima. Estos productos tienen la capacidad de expulsar el agua que hay entre las partículas arcillosas del suelo, lo cual hace que los espacios intersticiales sean menores y las partículas del suelo se puedan recomodar en un espacio menor al ser compactadas. Para el suelo aditivado con el organosilano y el polímero se observa que esta propiedad se mantiene relativamente constante, resultado

que puede ser un indicador de que la acción de estos productos en el suelo no se manifiesta de manera inmediata.

Para el caso de los productos cementantes se evidencia que el sistema mixto de suelo con cal presenta una disminución de la densidad máxima seca respecto al suelo natural; este comportamiento ha sido encontrada por otros investigadores y es atribuible a las reacciones de deshidratación y floculación que ocurren en los suelos tratados con estos productos (T. Zhang et al., 2018). Para el caso del sistema mixto suelo-cemento no se encuentra una diferencia significativa de este parámetro, aunque sí hay una leve disminución. Es de anotar que en el desarrollo experimental con estos aditivos se evidenció un cambio significativo en la textura del suelo aditivado que pasó de un estado plástico y pegajoso a un estado aparente más granular, en el que se observa la generación de gránulos de mayor tamaño en el suelo y una menor densidad con respecto al suelo sin aditivar. No obstante, se espera que la disminución en la densidad de compactación no comprometa la mejora de otras propiedades tales como la resistencia mecánica, la capacidad portante, la plasticidad, la resistencia al corte, entre otras.

Por otro lado, los sistemas aditivados presentaron una disminución de la humedad óptima respecto al suelo natural, excepto para el suelo aditivado con polímero y con cal que no presentaron diferencias significativas; esta disminución en el contenido óptimo de humedad se debe a que los aditivos disminuyen los espacios intersticiales de la arcilla, lo que conduce a una menor cantidad de poros en el suelo y por tanto se requiere una menor cantidad de agua para lograr un mayor peso en seco (Taslimi Paein Afrakoti et al., 2020). Es importante tener en cuenta que la disminución en el contenido de humedad óptimo es un aporte favorable de los aditivos, aunque a escala de laboratorio no parezca ser muy significativa una reducción entre el 1% y 2%, esto se traduce a mayor escala en un ahorro del recurso hídrico durante el proceso constructivo y de acuerdo con la intervención puede alcanzar grandes magnitudes.

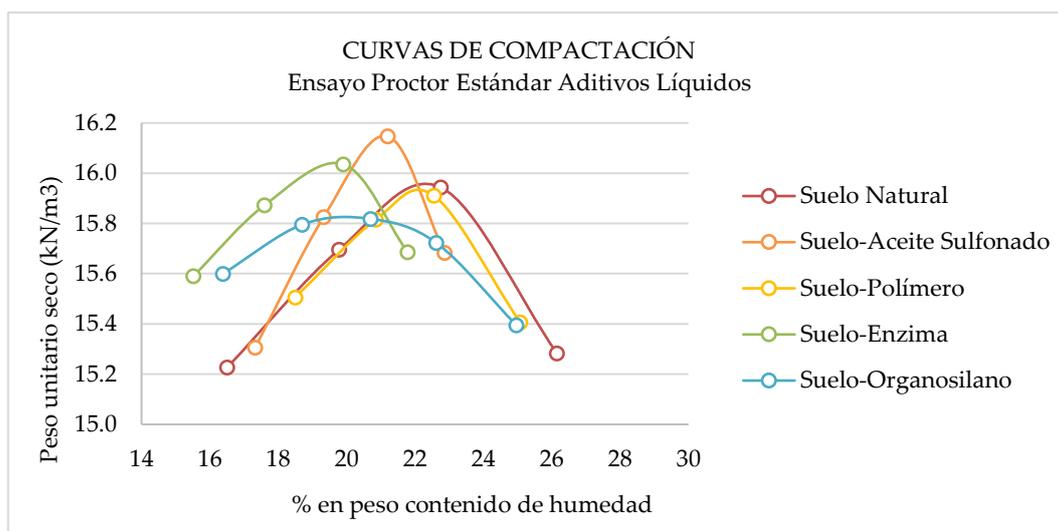


Figura 3.14. Curvas de compactación para sistemas de suelo con aditivos líquidos

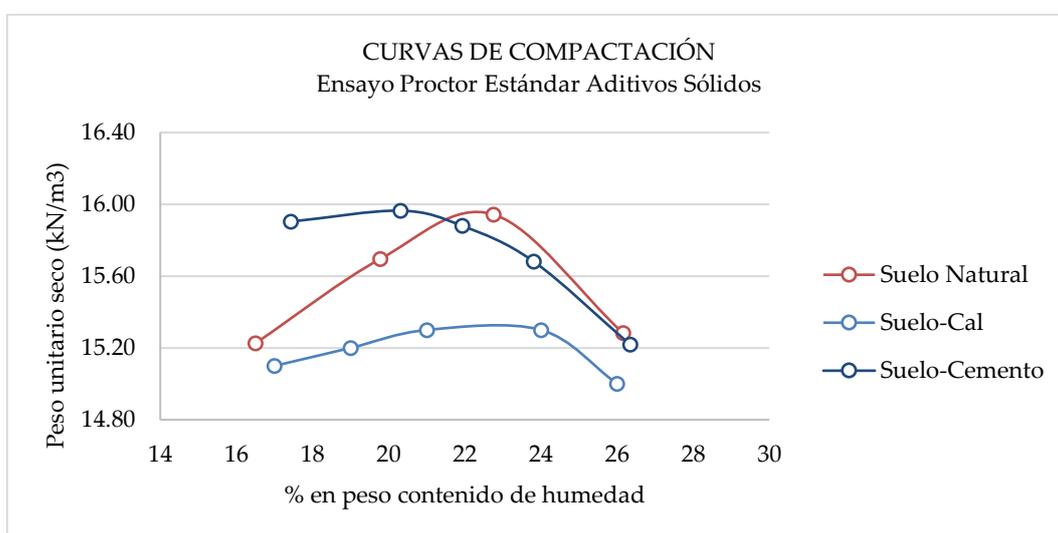


Figura 3.15. Curvas de compactación para sistemas de suelo con aditivos sólidos

Tabla 3.11. Resultados óptimos obtenidos de las curvas de compactación

Proctor Estándar			
Material	Peso Unitario Seco (kN/m³)	Densidad seca máxima (Kg/m³)	Humedad óptima (%)
Suelo Natural	15.95	1626.5	22.0
Suelo-Aceite sulfonado	16.15	1646.9	21.0
Suelo-Polímero	15.93	1624.4	22.1
Suelo-Enzima	16.04	1635.6	19.5
Suelo-Organosilano	15.83	1614.2	20.0
Suelo-Cal	15.37	1567.3	22.4
Suelo-Cemento	15.93	1624.4	20.2

Capacidad de soporte de california CBR

Los resultados obtenidos en el ensayo de capacidad de soporte CBR, mostrados en las Figura 3.16, Figura 3.17 y Tabla 3.12, evidencian que la mayoría de los aditivos evaluados aumentan la capacidad de soporte y disminuyen la expansión; estos efectos resultaron ser más significativos en los productos de naturaleza puzolánica, puesto que por su mecanismo de reacción son los que más aportan a la resistencia mecánica de los suelos (Bauzá Castelló, 2015). Para el caso del aceite sulfonado y la enzima, los resultados de capacidad de soporte estuvieron levemente por debajo respecto al del suelo sin aditivar, lo que indica que el uso de estos aditivos no representa una contribución significativa a la capacidad portante del tipo de suelo evaluado. Es importante señalar que los resultados de este parámetro en los materiales evaluados, se reportan solo como referencia y no se deben usar para realizar el diseño de un sistema estabilizado.

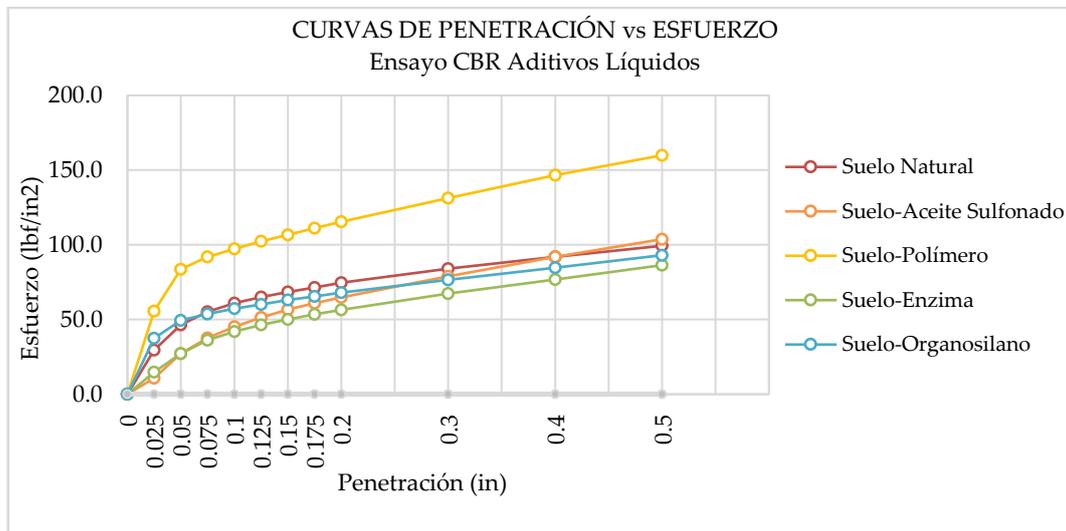


Figura 3.16. Curvas de Penetración para sistemas de suelo con aditivos líquidos

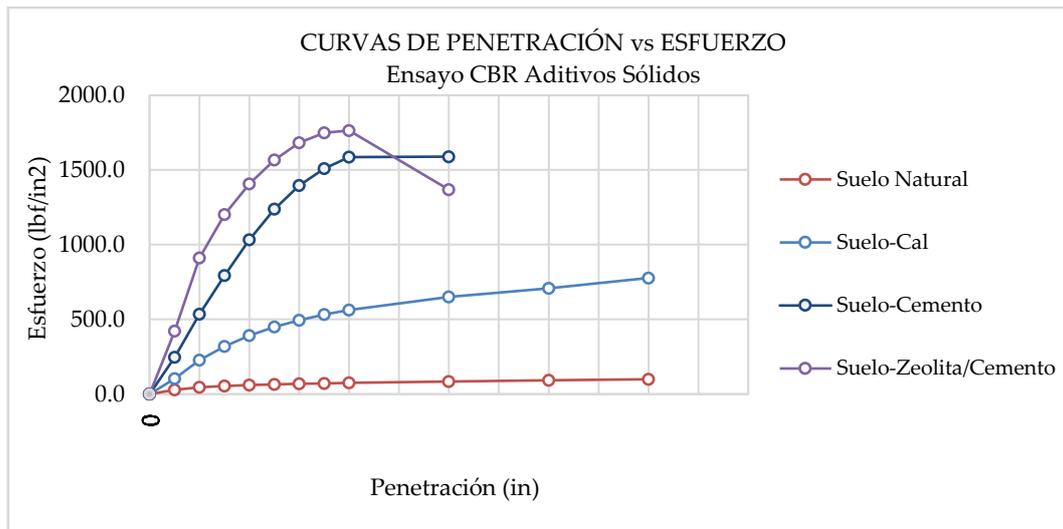


Figura 3.17. Curvas de Penetración para sistemas de suelo con aditivos sólidos

Tabla 3.12. Resultados ensayos CBR

Material	CBR (%)	Expansión (%)
Suelo Natural	5.0	1.1
Suelo-Aceite Sulfonado	4.5	2.6
Suelo-Polímero	9.7	1.1
Suelo-Enzima	4.2	0.5
Suelo-Organosilano	5.7	1.1
Suelo-Cal	39.2	0.3
Suelo-Cemento	105.7	0.02
Suelo-Zeolita/Cemento	140.6	0.1

### Resistencia a la compresión no confinada

Los resultados obtenidos para la resistencia a la compresión simple, mostrados en la Figura 3.18, evidencian que en general hay una mayor resistencia a la compresión en los suelos estabilizados, comparados con los resultados obtenidos para el suelo sin aditivar. Este aumento de resistencia es una respuesta muy favorable del suelo ante la presencia de los productos químicos evaluados; y se traduce en un mejor desempeño mecánico del material. Este comportamiento muestra la viabilidad técnica de usar aditivos químicos como soluciones sostenibles para el mejoramiento del suelo (Jayanthi & Singh, 2016). Igualmente se destaca el aumento del esfuerzo soportado a los 7 días de curado; aumento que es más notorio para los suelos aditivados con los productos de naturaleza puzolánica: cal, cemento y zeolita/cemento, corroborándose así la importancia que tiene el período de curado (Sharma et al., 2017).

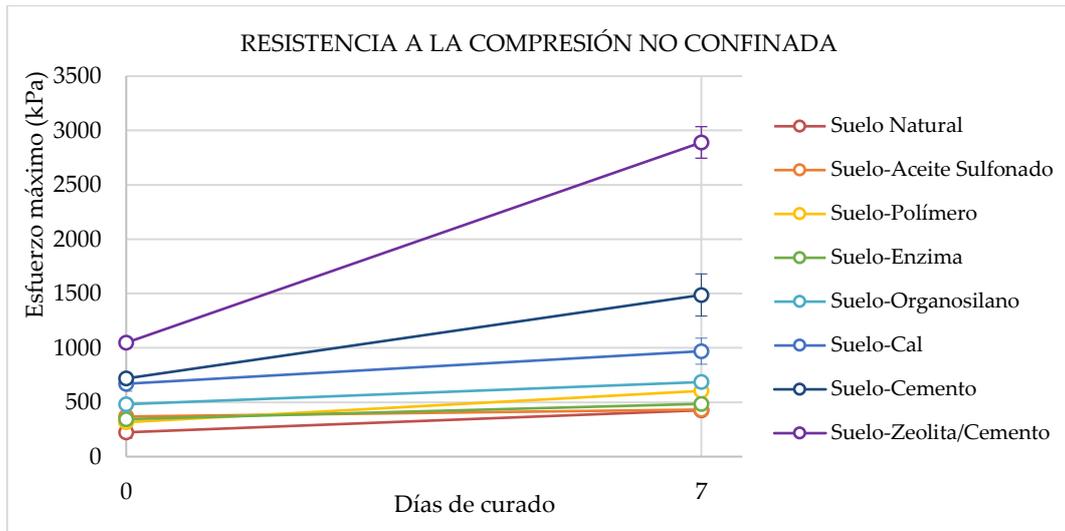


Figura 3.18. Resultados de resistencia a la compresión no confinada para los sistemas de suelo aditivado

### Modulo elástico E50

Con base en las curvas de esfuerzo-deformación de los materiales obtenidas en el ensayo de resistencia a la compresión no confinada, es posible calcular el módulo de Young. Este parámetro es usado por Plaxis como un módulo de rigidez; dado el comportamiento no lineal típico de los suelos normalmente consolidados, no es conveniente usar el módulo de rigidez tangente a la parte inicial de la curva esfuerzo deformación correspondiente a la zona elástica, sino que se recomienda usar el módulo de rigidez correspondiente a la pendiente de la recta entre el origen y el punto correspondiente al 50% de la resistencia máxima como se presenta en la Figura 3.19. Este módulo de Young es denotado como  $E_{50}$  y es el más indicado para representar esta respuesta. El valor de este parámetro se determinó gráficamente a partir de la información experimental obtenida de las pruebas de resistencia a la compresión simple de los materiales estudiados (Brinkgereve, 2004),(Nieto Leal et al., 2009).

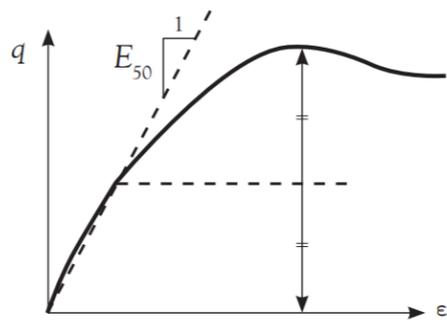


Figura 3.19. Definición del módulo de rigidez  $E_{50}$ . (Brinkgereve, 2004)

Los resultados obtenidos para el cálculo del módulo elástico E50 mostrados en la Figura 3.20, indican que en general los suelos tratados con estabilizantes químicos presentan un mayor módulo elástico comparados con los resultados obtenidos para el suelo natural, incluso sin curado, lo cual demuestra que los aditivos evaluados modifican las propiedades ingenieriles del suelo natural.

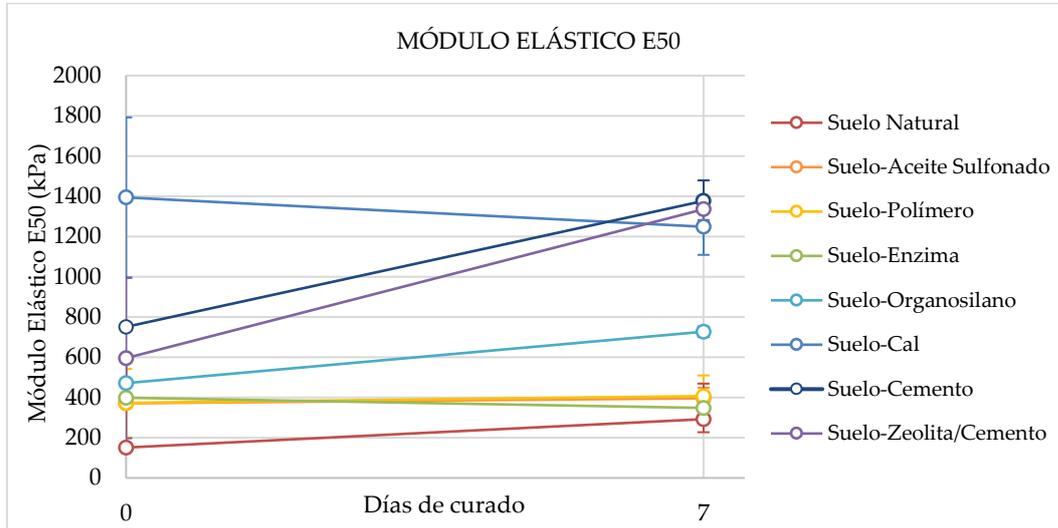


Figura 3.20 Resultados de módulo elástico E50 para los sistemas de suelo aditivado

Dado que el sistema mixto suelo-cal presentó un comportamiento atípico en tanto que la resistencia a la compresión simple incrementó con el curado pero el módulo elástico disminuyó, en la Figura 3.21 se muestran las curvas de esfuerzo-deformación de las probetas ensayadas a 0 y 7 días de curado, en estas curvas se puede observar que para el material recién compactado —0 días de curado— se presentan una mayor pendiente en los primeros puntos, esto indica que el material tiene un comportamiento más rígido antes del proceso de curado.

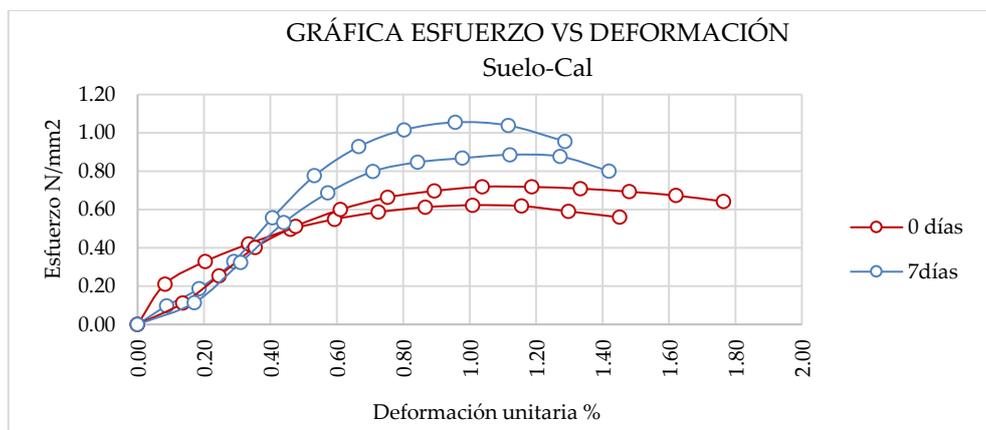


Figura 3.21. Curvas de esfuerzo deformación del sistema mixto suelo-cal a 0 y 7 días de curado

### Capacidad de carga

La capacidad de carga de los materiales evaluados fue calculada inicialmente a partir de los resultados en el ensayo de compresión no confinada, asumiendo un comportamiento completamente cohesivo de los materiales (ángulo de fricción interna,  $\phi=0$ ), es de aclarar que este parámetro se calculó con el fin de comparar los resultados obtenidos con los resultados del ensayo de corte directo que permite obtener los ángulos de fricción interna de los materiales. Con esta consideración y según lo sugerido por Terzaghi para una cimentación continua o de franja, se utilizó la Ecuación 3.1 (Braja M Das, 2013).

$$q_u = cN_c + qN_q$$

Ecuación 3.1

Donde:

$c$  = cohesión del suelo

$q = \gamma \cdot D_f$

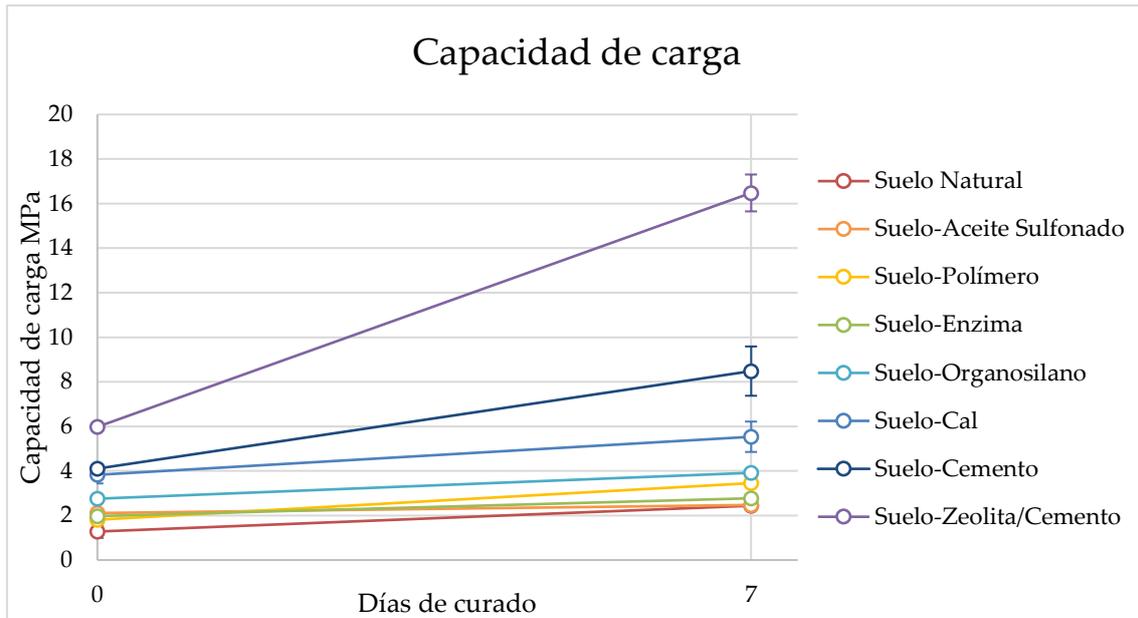
$\gamma$  = peso unitario del suelo

$\phi$  = ángulo de fricción interna

$D_f$  = profundidad, en este caso se asumen 20 cm por ser el espesor que se ha considerado en las pruebas de campo

$N_c, N_q$  = factores de capacidad de carga adimensionales y que solo son función del ángulo de fricción, para  $\phi=0$ :  $N_c=5.70$  y  $N_q=1.00$

En los resultados obtenidos mostrados en la Figura 3.22, se observa que en general los suelos aditivados con estabilizantes químicos presentan una mayor capacidad de carga comparados con los resultados obtenidos para el suelo natural; ello demuestra que los aditivos evaluados aportan al mejoramiento de las propiedades ingenieriles del suelo.



**Figura 3.22.** Resultados de los cálculos de capacidad de carga considerando suelos cohesivos para los sistemas de suelo aditivado

Resistencia el corte. Método de corte directo no consolidado no drenado (UU)

Con el ensayo de corte directo se calculó la resistencia por cohesión, definida como la medida de las fuerzas que cementan las partículas de suelo; el ángulo de fricción interna hace referencia a la medida de la resistencia cortante debida a la fricción mecánica directa entre las partículas de suelo. Como se puede observar en la Tabla 3.13, el ángulo de fricción interna no presenta una tendencia definida en los materiales evaluados y su comportamiento es propio de cada aditivo; para el caso de la cohesión se observa que todos los aditivos presentan mejoras respecto al suelo natural.

Se calculó además la capacidad de carga de los materiales teniendo en cuenta sus propiedades friccionantes, según lo sugerido por Terzaghi para una cimentación continua o de franja, se utilizó la Ecuación 3.2 (Braja M Das, 2013). De manera general, los resultados de este parámetro evidencian que los aditivos evaluados mejoran la respuesta mecánica del suelo natural; adicionalmente, se observa que la capacidad de carga calculada a partir del ensayo de corte directo es mayor que la calculada asumiendo un comportamiento completamente cohesivo, esto es coherente puesto que en el ensayo corte directo se tienen encuentra las propiedades friccionantes de los materiales.

$$q_u = cN_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma B N_\gamma \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde:

$c$  = cohesión del suelo

$q = \gamma \cdot D_f$

$\gamma$  = peso unitario del suelo

$D_f$  = profundidad, en este caso se asumen 20 cm por ser el espesor que se ha considerado en las pruebas de campo

$B$  = ancho de la cimentación, en este caso se asume 5 m por ser el ancho promedio de las vías no pavimentadas.

$N_c, N_q, N_\gamma$  = factores de capacidad de carga adimensionales y que solo son función del ángulo de fricción

**Tabla 3.13.** Resultados ensayos de corte directo para los sistemas de suelo aditivado

Material	Angulo de fricción interno ( $\phi$ )	Cohesión (kPa)	Capacidad de carga (MPa)
Suelo Natural	28.8	160.9	5.38
Suelo-Aceite Sulfonado	26.5	272.1	7.00
Suelo-Polímero	29	161.9	5.51
Suelo-Enzima	30.1	190.7	6.96
Suelo-Organosilano	31.6	277.1	10.98
Suelo-Cal	24.1	321.8	6.74
Suelo-Cemento	42.2	409.2	47.35
Suelo-Zeolita/Cemento	43.5	416.1	55.63

### Límites de Atterberg

Los resultados obtenidos muestran en general que el límite líquido y el límite de plasticidad no tienen una tendencia definida y su comportamiento es propio de cada aditivo, Tabla 3.14. Sin embargo, cabe resaltar que para el índice de plasticidad sí se observa que los sistemas aditivados, excepto el organosilano, presentan valores menores respecto a los resultados obtenidos para el suelo sin aditivar. Este comportamiento es destacable en los productos cementantes; en particular para la zeolita/cemento este índice se anula, incluso desde los 0 días de tratamiento. Esta disminución puede atribuirse a la floculación de la arcilla causada por las reacciones de intercambio catiónico y la fijación de iones de  $Ca^{2+}$  presentes en los productos cementantes.

**Tabla 3.14.** Resultados de límites de Atterberg e índice de plasticidad para los sistemas de suelo aditivado

Material	Límite Líquido		Límite Plástico		Índice de Plasticidad	
	0 días	7 días	0 días	7 días	0 días	7 días
Suelo Natural	48	47	27	22	21	25
Suelo-Aceite Sulfonado	44	46	23	25	21	21
Suelo-Polímero	49	45	28	22	21	23
Suelo-Enzima	45	49	24	23	21	26
Suelo-Organosilano	52	54	28	24	24	30
Suelo-Cal	46	43	33	32	13	11
Suelo-Cemento	51	41	35	33	16	8
Suelo-Zeolita/Cemento	NP	NP	NP	NP	NP	NP

### Velocidad de ascenso capilar y tiempo de saturación

En la Figura 3.23 se presentan los resultados de ascenso capilar obtenidos para cada producto evaluado. Se destaca en esta prueba el suelo aditivado con el organosilano, al presentar un elevado tiempo de saturación y una velocidad de ascenso capilar mucho menor respecto a los otros productos, Figura 3.23 (a) y Figura 3.23 (b). Este comportamiento es atribuible a que los organosilanos contienen una larga cadena de alquilos, que serían los responsables de generar propiedades hidrofóbicas en las superficies tratadas (Barbieri et al., 2019).

Por otro lado, las probetas aditivadas con cal, cemento y zeolita/cemento presentan similitudes, mostrando para este caso una gran facilidad para absorber agua en cortos periodos de tiempo. Esto sugiere que los productos cementantes hacen que la distribución de los poros y su tamaño aparente en el suelo se modifiquen, de modo que la estructura capilar presenta favorabilidad a la absorción de agua por ascenso capilar. Esta capacidad de absorción no es favorable en muchos casos, principalmente cuando el suelo tratado está expuesto a la intemperie o es susceptible al ascenso capilar de aguas subterráneas, como podría acontecer naturalmente en la infraestructura vial. Para el resto de materiales evaluados estos parámetros presentaron poca variación con respecto a las características del suelo sin aditivar.

Durante el desarrollo de la prueba de ascenso capilar también se registró la cantidad de suelo desprendido durante el ensayo, Figura 3.23 (c). La cal, el cemento y la zeolita/cemento presentaron los valores más bajos debido a sus propiedades y reacciones cementantes. El suelo tratado con enzima fue el sistema que presentó mayor desprendimiento, alcanzándose una cantidad desprendida total dos veces mayor que la del suelo sin aditivar. Este comportamiento puede ser atribuido a la naturaleza química de las enzimas y las energías superficiales existentes en la interface enzima-partícula en presencia de agua, basadas en fenómenos como tensión superficial, capilaridad, adhesión y cohesión.

Respecto al parámetro de hinchamiento, Figura 3.23 (d), en las arcillas se da por la absorción de agua entre los espacios laminares de las partículas de suelo, lo cual genera separación de las láminas y consecuentemente hinchamiento de la probeta. Los cationes que más favorecen el hinchamiento son los de sodio  $\text{Na}^+$ , mientras que los que mejor controlan esta propiedad son los cationes de calcio:  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  que se fijan con mayor fuerza a la superficie del suelo. En este comportamiento influye la carga y el tamaño del radio cristalográfico— y por tanto hay menos susceptibilidad de la entrada de moléculas de agua que aumenten el espesor de la doble capa difusa generando el hinchamiento. En consecuencia, los suelos que menor porcentaje de hinchamiento presentaron fueron los aditivados con cemento, cal y zeolita/cemento, favorecidos por la presencia de los cationes  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . Por otro lado, el suelo aditivado que mayor porcentaje de hinchamiento presentó fue el tratado con polímero; comportamiento atribuible a sus características de compactación. Para el producto polimérico evaluado se obtuvo la misma humedad óptima del suelo pero menor densidad máxima seca en el ensayo del Proctor estándar; por tanto, las probetas de este sistema pueden ser más susceptible de absorber agua. El resto de muestras tuvieron un porcentaje de hinchamiento levemente por debajo respecto al suelo sin aditivo.

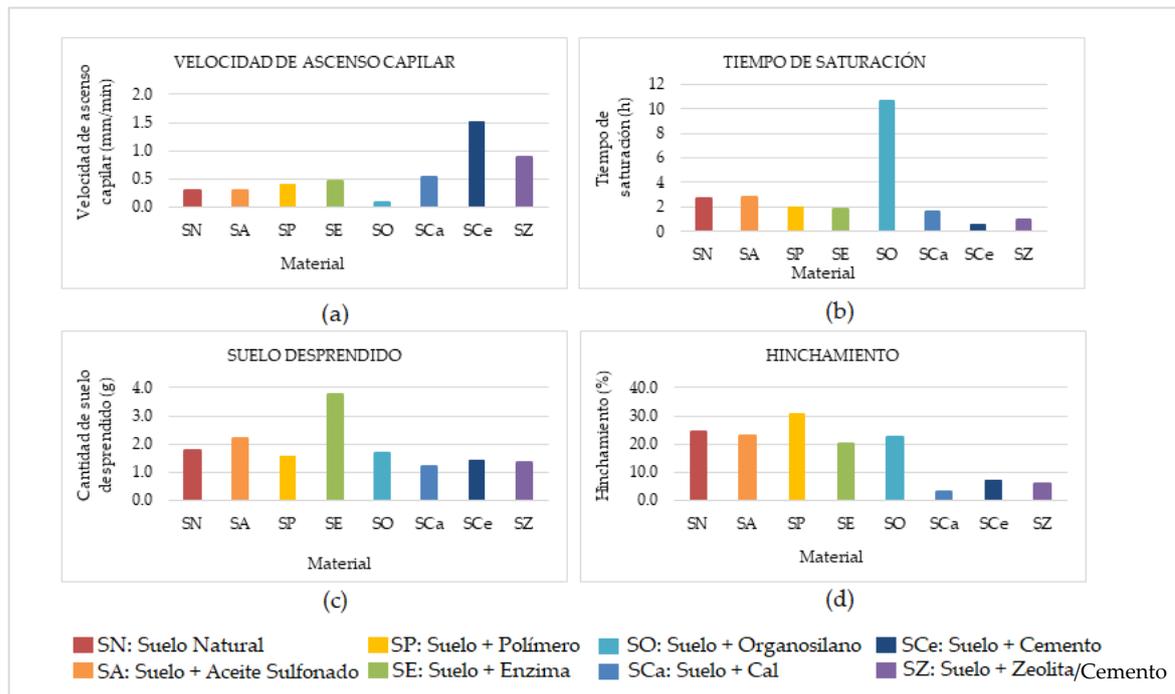


Figura 3.23. Resultados del ensayo de velocidad de ascenso capilar para los sistemas de suelo aditivado

### pH, Conductividad y Capacidad de Intercambio Catiónico

En la Tabla 3.15 se muestran los resultados obtenidos para las pruebas de pH, conductividad y capacidad de intercambio catiónico de los materiales evaluados.

Inicialmente se observa que los resultados de pH y conductividad presentan tendencias contrarias en los resultados obtenidos para los aditivos líquidos: aceite sulfonado, polímero, enzima y organosilano respecto a los obtenidos con los aditivos sólidos de naturaleza puzolánica: cal, cemento y zeolita/cemento.

En el caso de los aditivos líquidos, los resultados de las mediciones de pH muestran que las características ácidas del suelo natural se mantienen al ser incorporados los productos, en algunos casos con una ligera tendencia a la generación de mayor acidez, hecho atribuible al carácter ácido de estos productos. Adicionalmente, los resultados obtenidos para la conductividad demuestran que estos productos químicos originan 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. Se evidencia además que estos aditivos son precursores de una serie de reacciones de intercambio catiónico con las partículas arcillosas del suelo que generan el desplazamiento del agua intersticial y las sales disueltas en ella (H. Zhao et al., 2013). Ello conduce a una mayor estabilidad química del sistema, lo cual guarda coherencia con la reducción generada en la capacidad de intercambio catiónico del suelo natural.

Para el caso de los productos sólidos, se presenta un pH fuertemente básico y una conductividad eléctrica que es significativamente mayor al del suelo; este medio altamente alcalino favorece las reacciones puzolánicas que, a su vez, generan un incremento en la conductividad eléctrica (Amini & Ghasemi, 2019). Adicionalmente, el aumento presentado en el valor del CIC puede atribuirse a la presencia de cationes de calcio libres en el sistema mixto aditivado (Sosa et al., 2019). No obstante lo anterior, estos sistemas tienden a la neutralidad en el tiempo a causa de los procesos de curado (Taslimi Paein Afrakoti et al., 2020)(Salimi & Ghorbani, 2019).

**Tabla 3.15.** Resultados de pH, conductividad y CIC para los sistemas de suelo aditivado

Material	pH		Conductividad (μS/cm)		CIC (meq/100g suelo seco)
	0 días	7 días	0 días	7 días	7 días
Suelo Natural	4.79	4.88	207.5	215.0	20.88
Suelo-Aceite Sulfonado	5.05	5.00	196.6	214.0	18.32
Suelo-Polímero	5.05	4.84	208.5	202.6	16.52
Suelo-Enzima	4.48	4.91	206.6	207.5	17.16
Suelo-Organosilano	3.95	4.08	248.0	213.5	17.74
Suelo-Cal	12.01	12.31	6550.0	6150.0	17.73
Suelo-Cemento	12.32	11.96	1665.0	744.0	22.53
Suelo-Zeolita/Cemento	11.95	11.87	2330.0	1540.0	25.06

### Permeabilidad

Los resultados del ensayo de permeabilidad se muestran en la Tabla 3.16, en términos del coeficiente de conductividad hidráulica. El valor obtenido para el suelo natural es típico de suelos con un porcentaje significativo de finos, bien sea limos o arcillas, e indica que el suelo tiene una capacidad de drenaje pobre (Angelone et al., 2006). Este parámetro disminuye para el caso de los sistemas aditivados con los productos líquidos: aceite sulfonado, polímero, enzima y organosilano, lo que indica el carácter impermeable de estos materiales al generar superficies hidrófobas en la arcilla (Rodríguez Pardo, 2017). Para el caso de los productos sólidos: cemento, cal y zeolita/cemento se observa un aumento en este parámetro, el cual es coherente con los resultados de velocidad de ascenso capilar obtenidos, teniendo en cuenta que estos ensayos se realizaron solo para 7 días de curado de los materiales, esto es atribuible a la modificación inicial del tamaño de partícula y textura de la arcilla que se presenta con los productos cementantes, es recomendable realizar un seguimiento de estas propiedades en el tiempo.

**Tabla 3.16.** Resultados del coeficiente de conductividad hidráulica de los materiales evaluados

Material	k (m/s)
Suelo Natural	$1.36 \times 10^{-09}$
Suelo-Aceite Sulfonado	$1.56 \times 10^{-10}$
Suelo-Polímero	$7.33 \times 10^{-11}$
Suelo-Enzima	$4.67 \times 10^{-10}$
Suelo-Organosilano	$1.08 \times 10^{-11}$
Suelo-Cal	$1.20 \times 10^{-09}$
Suelo-Cemento	$1.90 \times 10^{-08}$
Suelo-Zeolita/Cemento	$5.03 \times 10^{-08}$

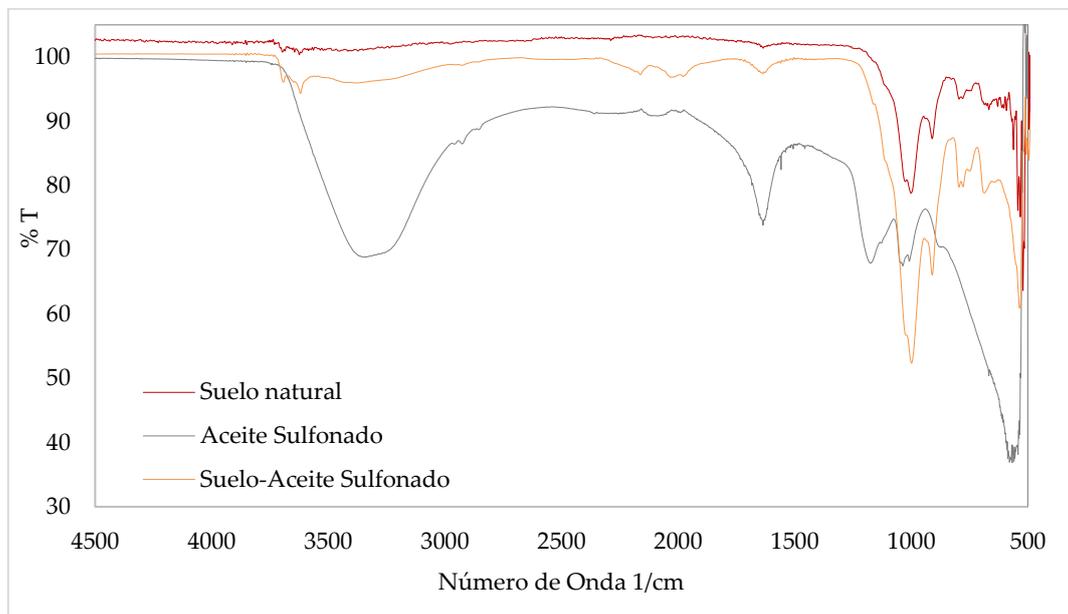
### Espectrometría Infrarroja por Transformada de Fourier y Reflectancia Total Atenuada, FTIR/ATR

Se empleó Espectrometría Infrarroja para realizar una identificación cualitativa de la composición de los productos químicos alternativos y los sistemas aditivados, con el fin de poder analizar los cambios composicionales a los 7 días de curado.

En los espectros infrarrojos mostrados en la Figura 3.24 las bandas ubicadas en los rangos de  $3200-3600 \text{ cm}^{-1}$  y  $1660 \text{ cm}^{-1}$  presentes tanto en el aditivo como en el suelo aditivado, están asociadas a la presencia de agua. En el espectro del aditivo aceite sulfonado, se observan bandas pequeñas que corresponden a señales emitidas por la parte hidrofóbica de las moléculas del ingrediente activo de este producto, a  $1470$  y  $1520 \text{ cm}^{-1}$  relacionadas con enlaces C-H típicos de los compuestos aromáticos y derivados naftalénicos, y otras a  $2840$  y  $2900 \text{ cm}^{-1}$ , que se asocian con enlaces C-H alifáticos de

carbonos saturados o  $sp^3$ . Las bandas a  $1040$  y  $1180\text{ cm}^{-1}$  corresponden a la parte hidrofílica de la molécula del ingrediente activo del aceite sulfonado, relacionadas con los grupos funcionales sulfonatos presentes en el agente surfactante.

Al analizar el espectro infrarrojo del suelo aditivado con el aceite sulfonado se observa que es similar al del suelo natural; no se observan señales nuevas que indiquen reacciones o transformaciones químicas. Este comportamiento indica que la interacción entre el aceite sulfonado y el suelo arcilloso se debe básicamente a que el aditivo altera la concentración de cationes presentes dentro del fluido de poros del suelo, lo que genera el intercambio iónico, y puede conducir a la floculación de los minerales arcillosos (Tingle et al., 2007)



**Figura 3.24.** Espectros FTIR del sistema mixto suelo-aceite sulfonado

La Figura 3.25 muestra los espectros infrarrojo del suelo natural, del polímero y del sistema mixto suelo-polímero. Las bandas ubicadas en los rangos de  $3200-3600\text{ cm}^{-1}$  y  $1660\text{ cm}^{-1}$  presentes tanto en el aditivo como en el sistema mixto, están asociadas a la presencia de agua; en el espectro del aditivo se observan las bandas características del producto polimérico, cuya apariencia es de un doble pico en el rango de  $2800$  a  $2920\text{ cm}^{-1}$  y bandas sencillas a  $960$ ,  $1450$  y  $1489\text{ cm}^{-1}$ , relacionadas con los copolímeros del vinil acetato.

El espectro infrarrojo del suelo aditivado con el polímero es similar al del suelo natural; no se observa la presencia de las bandas características del polímero, ni se evidencia la presencia de nuevas bandas en relación al espectro infrarrojo del suelo natural, que sugieran un cambio en los grupos funcionales del suelo. Este comportamiento indica que la interacción entre el polímero y el suelo es física,

generando fuerzas electrostáticas de adhesión entre las partículas del suelo y las cadenas poliméricas (Soltani-Jigheh et al., 2018)

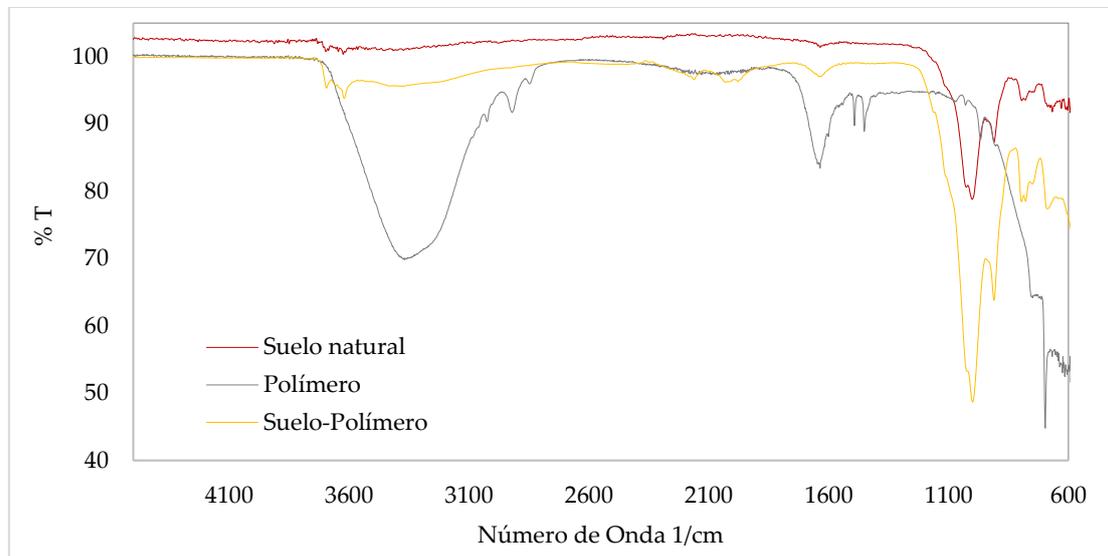


Figura 3.25. Espectros FTIR del sistema mixto suelo-polímero

En la Figura 3.26 se muestran los espectros infrarrojo del suelo natural, de la enzima y del sistema mixto suelo-enzima. Las bandas que se observan entre  $3200-3600\text{ cm}^{-1}$  y a  $1660\text{ cm}^{-1}$  tanto en el aditivo como en el suelo aditivado, están asociadas a la presencia de agua. En el espectro del aditivo se observan las bandas características del producto enzimático, las cuales tienen la apariencia de un doble pico entre  $2800-2900\text{ cm}^{-1}$  y una banda a  $1085\text{ cm}^{-1}$ .

El espectro infrarrojo del suelo aditivado con la enzima es similar al del suelo natural; no se observan las bandas características del producto enzimático, ni se evidencia la presencia de nuevas bandas en relación al espectro infrarrojo del suelo natural que sugieran la formación de especies nuevas. Este comportamiento indica que la enzima estaría actuando como un catalizador que potencia fenómenos de adhesión entre las partículas del suelo y las cadenas enzimáticas (AbouKhadra et al., 2018).

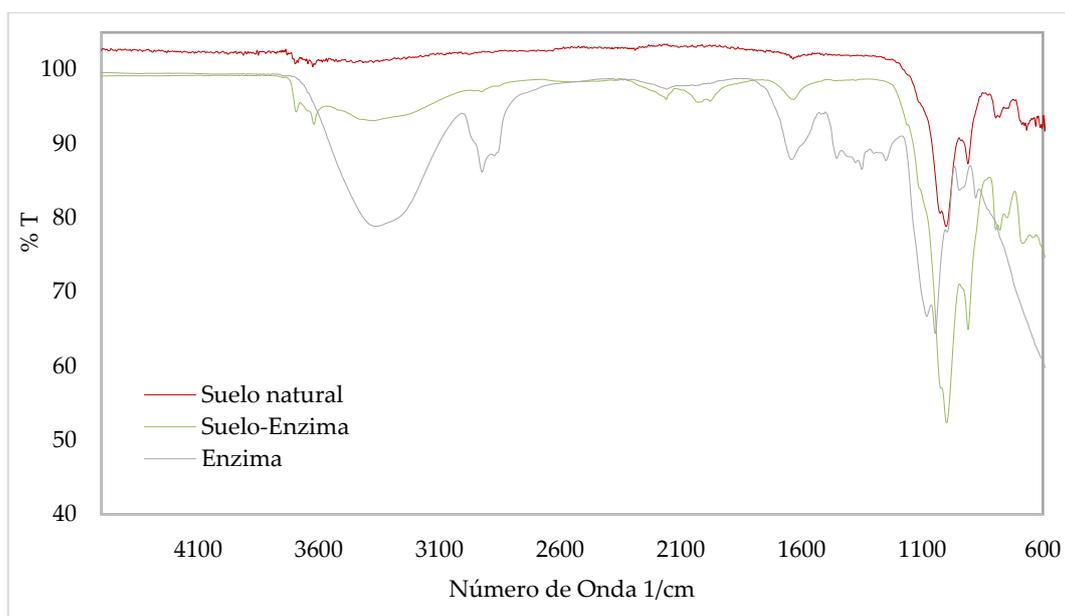


Figura 3.26. Espectros FTIR del sistema mixto suelo-enzima

En la Figura 3.27 las bandas a  $3200-3400\text{ cm}^{-1}$  presentes en el espectro del organosilano, corresponden con la señal del grupo  $-\text{OH}$  del alcohol bencílico presente en la formulación del producto y que le confiere el olor característico; los picos a  $2840$ ,  $2880$  y a  $1500\text{ cm}^{-1}$  obedecen a las estructuras orgánicas y enlaces C-H del organosilano, entre tanto que los picos a  $1000-1080\text{ cm}^{-1}$  presentes tanto en el aditivo como en el sistema mixto suelo-organosilano se relacionan con los enlaces covalentes del silicio con el oxígeno presentes tanto en el suelo como en el producto químico. En el sistema aditivado no se observan señales que sean apreciablemente diferentes a las presentes en el suelo natural y que evidencien la formación de nuevos enlaces o productos de reacciones químicas (Lekha et al., 2013).

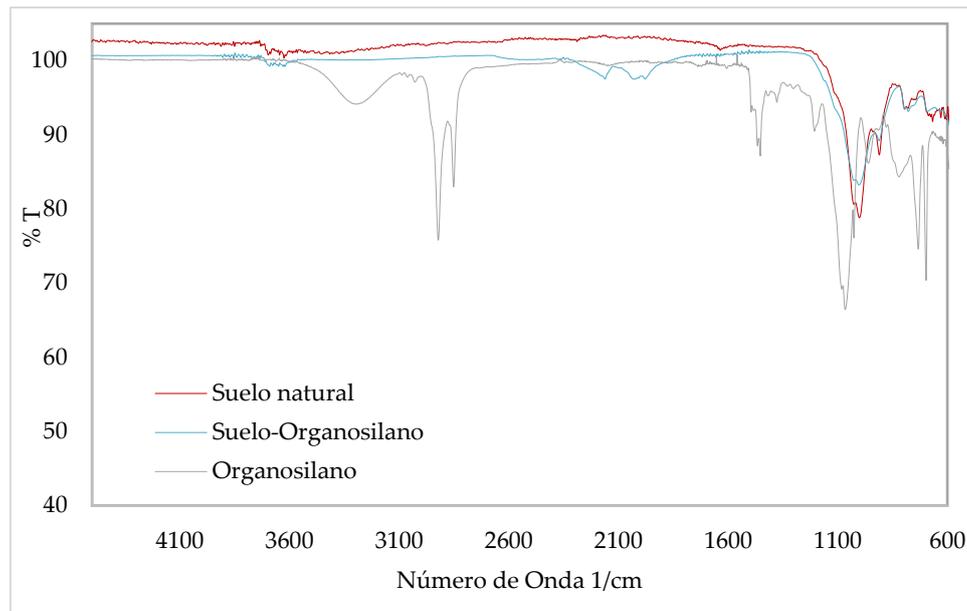


Figura 3.27. Espectros FTIR del sistema mixto suelo-organosilano

En la Figura 3.28 las bandas observadas entre 3200-3600  $\text{cm}^{-1}$  y 1600-1700  $\text{cm}^{-1}$ , presentes tanto en la zeolita como en el sistema mixto suelo-zeolita/cemento, están asociadas a la presencia de agua. El espectro característico de los compuestos inorgánicos alcalinos del producto zeolítico se presenta como un doble pico a 1417 y 1470  $\text{cm}^{-1}$  y bandas individuales a 860 y 998  $\text{cm}^{-1}$ ; por su parte, el espectro IR del suelo aditivado, presenta la aparición de una señal en 1380-1480  $\text{cm}^{-1}$  que no se observó en los espectros del suelo natural. De acuerdo con la literatura, este pico corresponde a la señal del ion carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) probablemente proveniente de los compuestos presentes en el cemento incorporado, y de las reacciones de estabilización en las que se forman carbonatos, los cuales se producen por diversos mecanismos, incluyendo las reacciones con el  $\text{CO}_2$  atmosférico (Fasihnikoutalab et al., 2017).

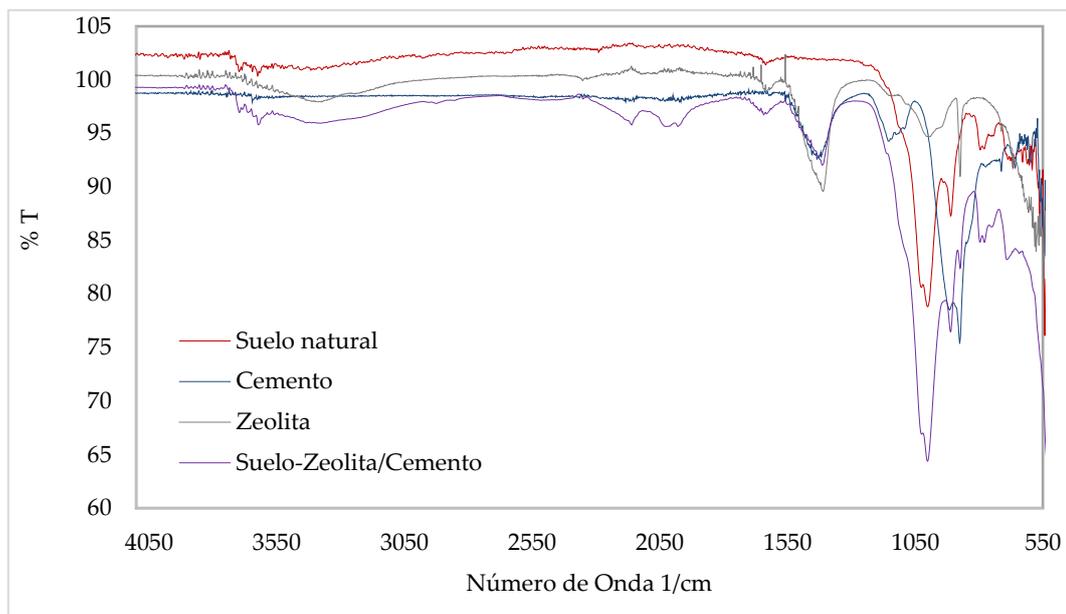


Figura 3.28. Espectros FTIR del sistema mixto suelo-zeolita/cemento

### Caracterización textural de los materiales

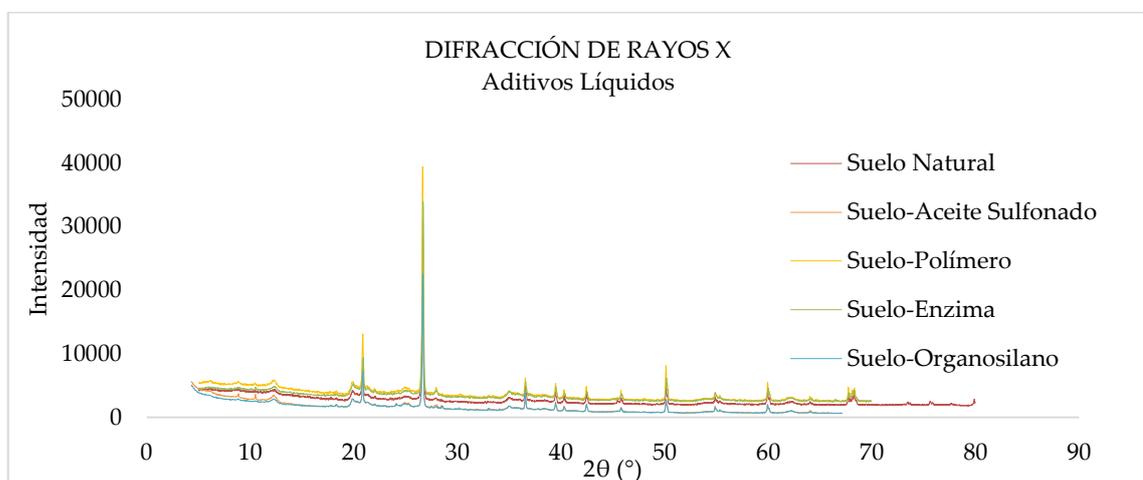
En la Tabla 3.17 se muestran los resultados del análisis textural realizado empleando el método BET. Se observa que con todos los aditivos se presenta la reducción del área superficial respecto a su valor en el suelo solo, así como reducción e indetección de la microporosidad. Estos resultados indican que los aditivos estudiados generan cambios en la textura del suelo, efecto que ha sido referenciado en otros estudios realizados con este tipo de materiales (Yi-min & Xiao-lan, 2011) (Songt & Sandí, 2001) (Soltani-Jigheh et al., 2018). Dado que esta propiedad está estrechamente relacionada con la porosidad, la permeabilidad y el tamaño de partícula, posiblemente los sistemas aditivados presenten también cambios en el tamaño de las partículas.

Tabla 3.17. Resultados de la caracterización textural para los sistemas de suelo aditivado

Material	S Área Superficial Específica (m <sup>2</sup> /g)	S microporos (m <sup>2</sup> /g)	S mesoporos (m <sup>2</sup> /g)	V microporos (cm <sup>3</sup> /g)	V mesoporos (cm <sup>3</sup> /g)	Tamaño de Poro (Å)
Suelo Natural	44.22	0.91	43.30	0.00028	0.10565	100.311
Suelo-Aceite Sulfonado	38.81	0.02	38.79	-	0.09142	94.102
Suelo-Polímero	34.53	0.10	34.43	-	0.08625	97.395
Suelo-Enzima	40.17	-	40.17	-	0.09986	95.869
Suelo-Organosilano	35.67	-	35.67	-	2.16190	1082.743
Suelo-Cal	25.73	-	25.73	-	0.10692	137.505
Suelo-Cemento	28.49	-	28.49	-	0.11342	140.704
Suelo-Zeolita/Cemento	28.28	-	28.28	-	0.0947	131.107

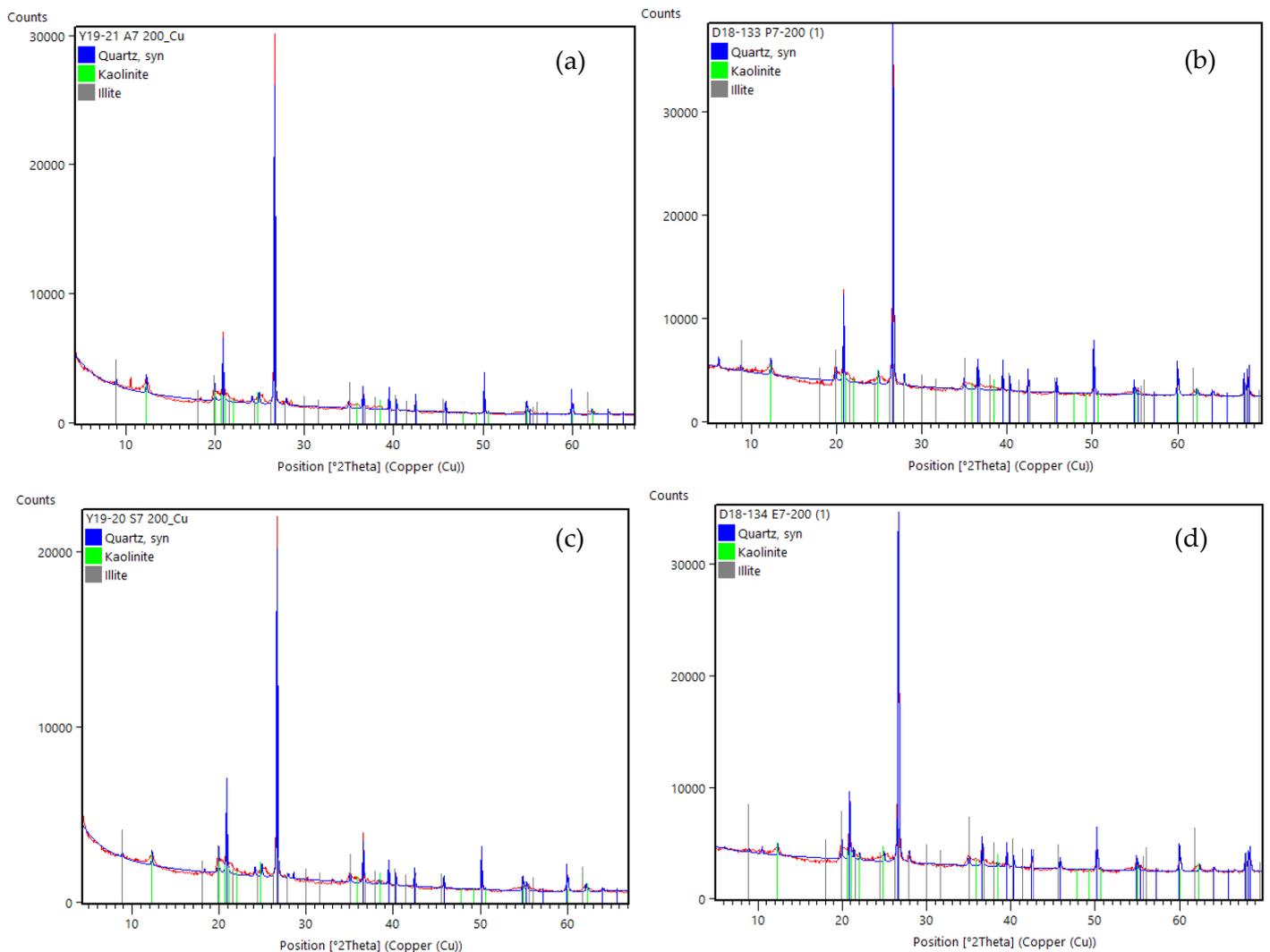
### Difractometría de Rayos X, DRX

El análisis de Difracción de Rayos X se realizó sobre las muestras de suelo aditivado después de 7 días de curado, al analizar los difractogramas de los suelo aditivados con los productos líquidos: aceite sulfonado, polímero, enzima y organosilano, Figura 3.29, se observa que presentan los mismos picos del suelo natural; no se observa la presencia de nuevas señales en relación al difractograma del suelo natural, que sugieran la formación de nuevas fases cristalinas. Este comportamiento indica que estos productos no generan cambios mineralógicos ni cristalinos en el suelo, sino que actúan como catalizadores que potencian fenómenos de adhesión entre las partículas del suelo y las moléculas de los aditivos, resultado que es coherente con lo observado mediante la caracterización de otras propiedades de los sistemas mixtos.



**Figura 3.29.** Difractograma de rayos X para sistemas mixtos suelo-aditivos líquidos

Al realizar la identificación cualitativa de fases en los difractogramas utilizando el PANalytical X'Pert HighScore Plus, se encuentra que entre de las fases cristalinas identificadas se destacan el cuarzo, la caolinita y la illita, al igual que la muestra del suelo natural, tal como se muestra en la Figura 3.30.



**Figura 3.30.** Difractogramas de rayos X para sistemas mixtos suelo-aditivos líquidos. **(a)** suelo- aceite sulfonado, **(b)** suelo-polímero, **(c)** suelo-enzima, **(d)** suelo-organosilano.

La Figura 3.31 muestra de manera comparativa los difractogramas obtenidos para los materiales aditivados con los productos cementantes: cal, cemento y zeolita/cemento. En relación a los resultados obtenidos para el suelo natural, se observa la aparición de nuevas señales siendo la más notoria la ubicada alrededor de  $2\theta=29.5^\circ$ , debida principalmente a la presencia de calcita en estos materiales, atribuible a la posible carbonatación de los materiales. En la Figura 3.32 se muestran los difractogramas con la identificación de fases en el software PANalytical X'Pert HighScore Plus de estos materiales y en todos se encuentra la calcita entre las fases cristalinas identificadas.

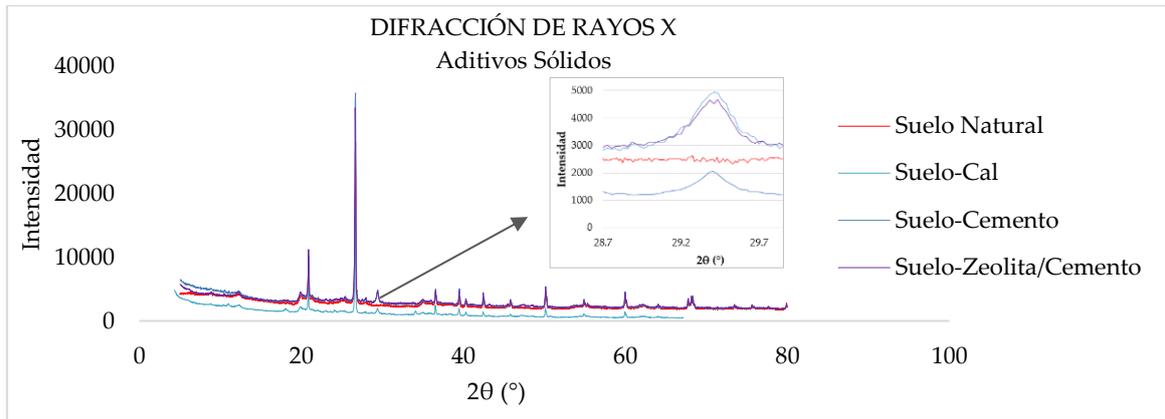


Figura 3.31. Difractograma de rayos X para sistemas mixtos suelo-aditivos sólidos

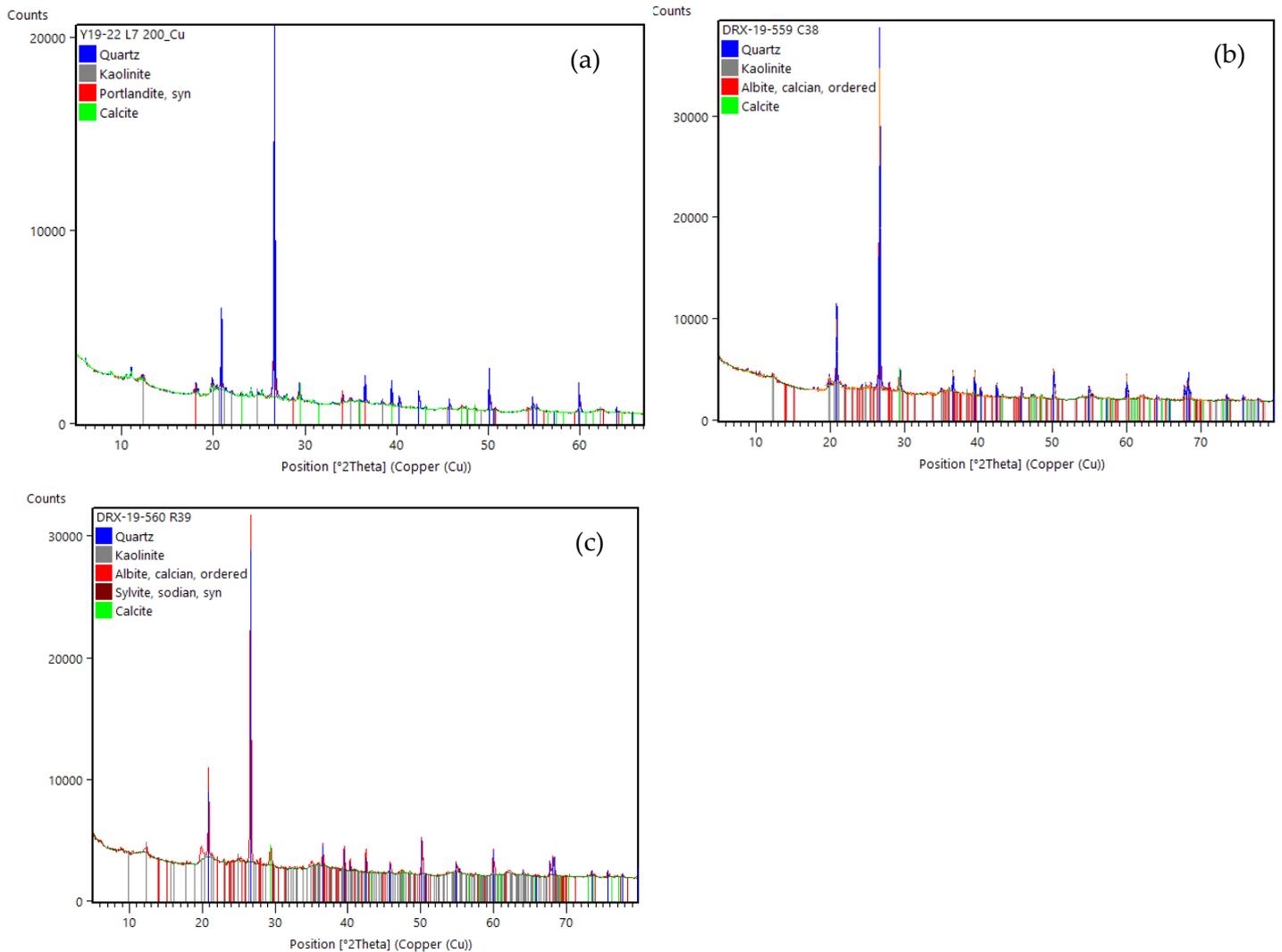


Figura 3.32. Difractogramas de rayos X para sistemas mixtos suelo-aditivos sólidos. (a) suelo- cal, (b) suelo-cemento, (c) suelo-zeolita/cemento.

### Microscopía Electrónica de Barrido, SEM, 7 días de curado

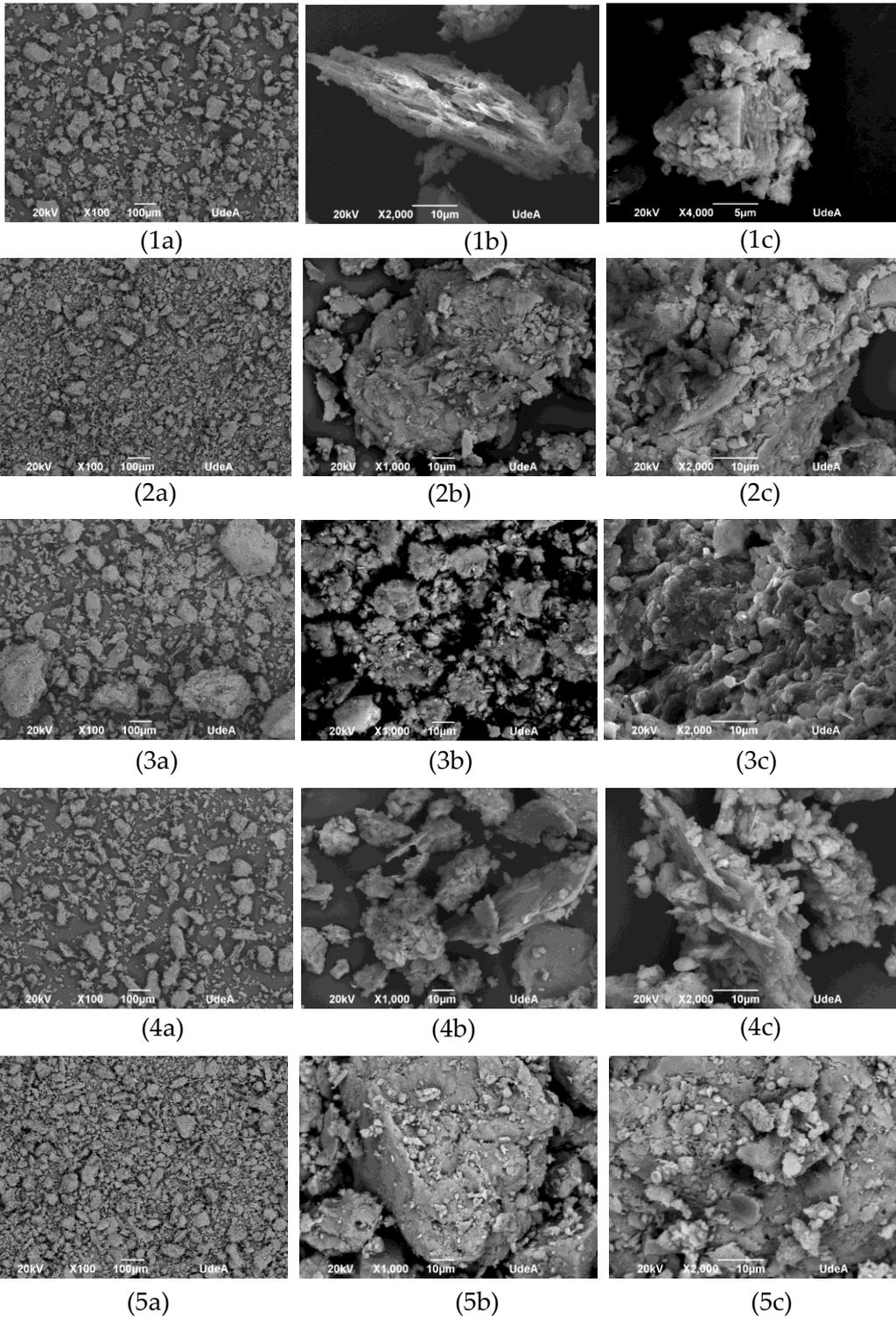
En la Figura 3.33 se muestran las imágenes obtenidas por Microscopía Electrónica de Barrido, SEM. Como característica morfológica inicial se observa un aumento considerable del tamaño de las partículas del suelo al ser aditivado con los productos líquidos y la cal, especialmente con el polímero y el organosilano donde se observan grandes aglomerados de partículas. Por su parte, para los sistemas que contienen cemento y zeolita/cemento se observan un mayor distanciamiento entre las partículas, lo cual es coherente con los resultados obtenidos para la permeabilidad, la velocidad de ascenso capilar y la porosidad.

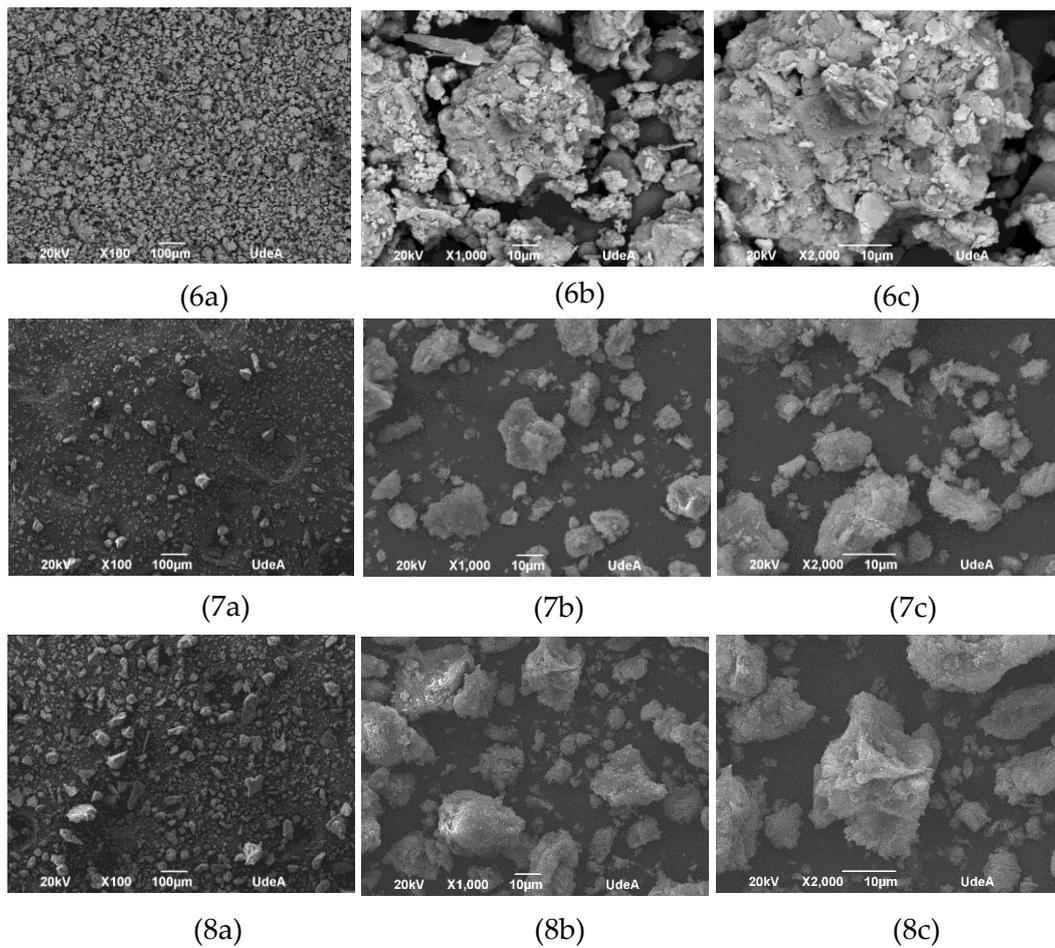
Así mismo, en las imágenes 3.33 (1b) y 3.33( 1c) se observan las formas típicas de las partículas de arcilla (Katz et al., 2001) y agregados laminares con una alta porosidad; todo lo cual coincide con la caracterización inicial del suelo. Al aditivar el suelo arcilloso con los productos químicos, se genera un cambio en la apariencia de las partículas. En las imágenes correspondientes a los materiales aditivados se observan partículas más compactas, de menos porosidad, con una matriz más sólida y estable. Evidentemente, los aditivos líquidos funcionan como ligante entre las partículas del suelo y actúan mediante mecanismos que conducen a la liberación del agua atrapada en el suelo, con lo cual se generan materiales más densos.

De forma adicional se realizó análisis EDS sobre la superficie de los materiales para determinar en forma aproximada la composición elemental, Tabla 3.18. Los resultados reflejan el aporte de los aditivos al suelo, siendo los más evidentes el calcio para los productos puzolánicos como la cal, el cemento y la zeolita/cemento; y el carbono para los productos orgánicos como aceite sulfonado, el polímero, la enzima y el silano.

**Tabla 3.18.** Resultados análisis EDS sobre la superficie de los materiales evaluados

Elemento	% Peso							
	Suelo Natural	Suelo-Aceite Sulfonado	Suelo-Polímero	Suelo-Enzima	Suelo-Organosilano	Suelo-Cal	Suelo-Cemento	Suelo-Zeolita/Cemento
C	-	10.78	0.77	10.54	11.42	5.81		
O	46.04	42.56	52.27	46.6	38.88	41.76	47.63	52.13
Na	-	-	-	-	-	-	-	0.19
Mg	0.63	0.53	0.71	0.46	0.38	0.3	-	0.81
Al	13.35	9.86	11.82	10.59	12.84	12.33	10.72	7.75
Si	21.31	26.87	29.31	26.16	28.74	23.92	29.26	17.6
S	-	-	-	-	-	-	-	0.7
Cl	-	-	-	-	-	-	-	0.14
K	3.2	0.61	0.64	0.47	0.77	0.31	0.73	0.38
Ca	-	-	0.19	-	-	7.27	5.05	16.02
Ti	-	0.53	0.65	0.35	0.55	0.32	-	0.57
Fe	15.47	8.26	3.64	4.84	6.43	7.97	6.6	3.71





**Figura 3.33.** Imágenes SEM obtenidas para los sistemas mixtos de suelo aditivado. 1: suelo natural, 2: suelo-aceite sulfonado, 3: suelo-polímero, 4: suelo-enzima, 5: suelo-organosilano, 6: suelo-cal, 7: suelo-cemento, 8: suelo-zeolita/cemento

### Resumen de los resultados obtenidos en la evaluación inicial del desempeño de los sistemas mixtos de suelo con los aditivos químicos

En la Figura 3.34 se muestra esquemáticamente un resumen de los resultados obtenidos en la evaluación inicial del desempeño de los sistemas mixtos de suelo con los aditivos químicos.

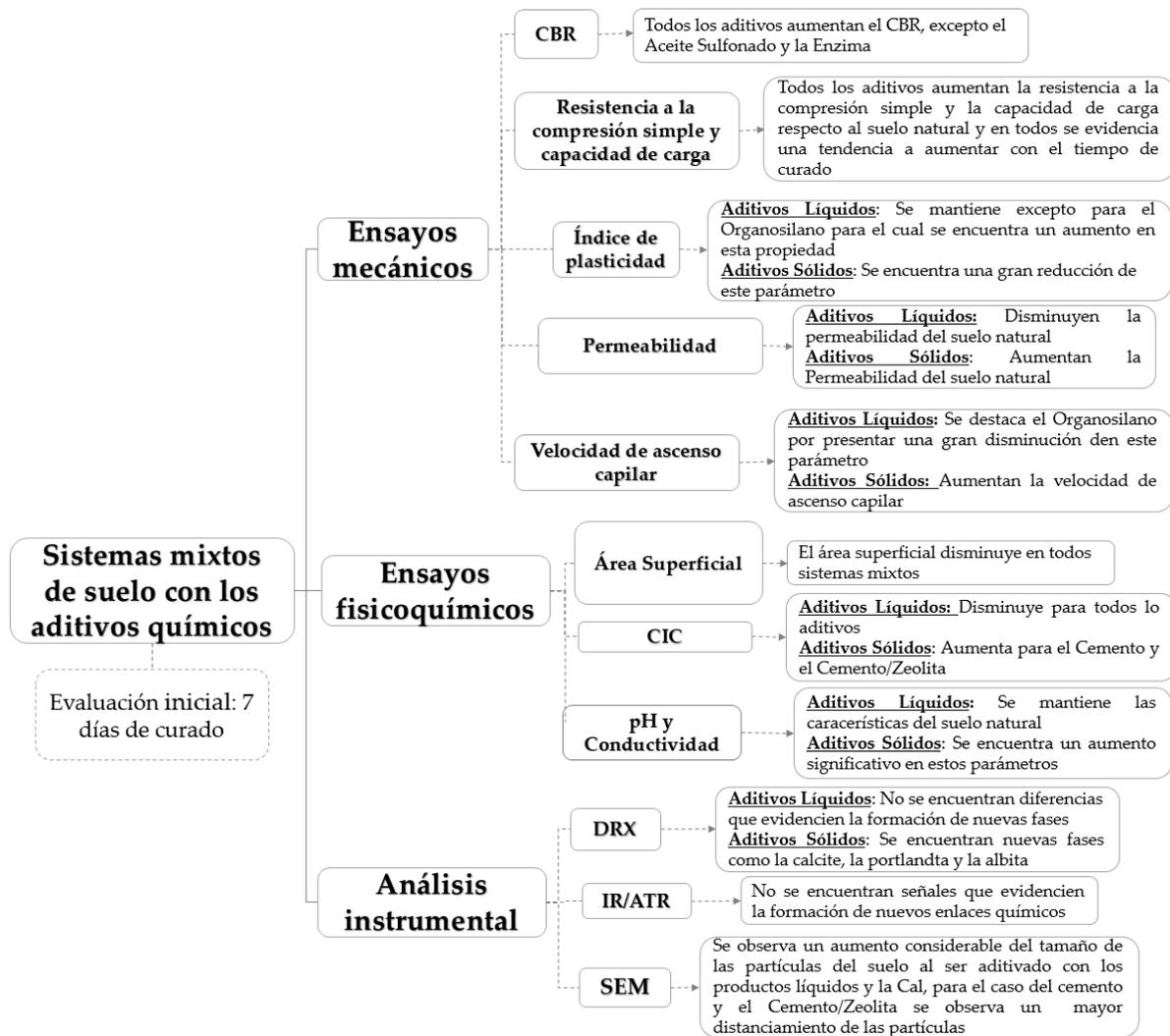


Figura 3.34. Resumen de los resultados obtenidos en la evaluación inicial del desempeño de los sistemas mixtos de suelo con los aditivos químicos

### 3.5. Evaluación ambiental de los sistemas mixtos de suelo con los aditivos químicos

- Posibles afectaciones del medio ambiente por lixiviación del material

A los lixiviados obtenidos después de someter los materiales mixtos de suelo con los aditivos químicos a un proceso de extracción sólido-líquido empleando una cámara de lixiviación, tal como está descrito en el Capítulo 2, se le realizaron mediciones de pH, Carbono Orgánico Total COT y determinación de la biodegradabilidad mediante la relación entre la Demanda Química de Oxígeno DQO, Demanda Biológica de Oxígeno DBO<sub>5</sub>

### pH y Carbono Orgánico Total COT de los Lixiviados

En la Tabla 3.19 se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de pH y Carbono Orgánico Total de los lixiviados obtenidos de los materiales evaluados. Para el caso de los suelos aditivados con productos líquidos, el pH se mantuvo relativamente constante respecto al suelo natural evidenciando que estos aditivos no generan lixiviados que afecten este parámetro. Por su parte, las muestras aditivadas con los productos sólidos: cal, cemento y zeolita/cemento, presentaron lixiviados de naturaleza básica, debido a los altos contenidos de óxido de calcio de estos productos. Es de anotar que estos lixiviados al presentar un pH tan elevado pueden ser corrosivos y afectar cuerpos de agua subterránea; sin embargo se espera que a mayores tiempos de curado el pH de estos lixiviados tienda a la neutralidad debido a la formación de matrices cementantes estables, compuestas por fases hidratadas de sílice y alúmina solidificadas, que no generan lixiviación de sustancias alcalinas.

Los valores obtenidos de COT para todos los materiales evaluados son bajos; normalmente para el agua potable el valor de este parámetro está entre 0.1 y 25 mg / L (Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater, 23rd. 5310 B. Total Organic Carbon (TOC)—High-Temperature Combustion Method., 2017), por lo que todos los resultados obtenidos se encuentran en el rango admitido para agua potable. Esto se debe principalmente a que el suelo objeto de estudio contiene una relativa baja cantidad de materia orgánica; adicionalmente, el incremento que se presenta con algunos de los aditivos líquidos evaluados responde a la composición química de los productos. Para el caso de los sistemas mixtos con cal, cemento y zeolita/cemento el aumento en el COT se atribuye a que el medio alcalino generado por estos materiales favorece la solubilidad de los ácidos húmicos presentes en la materia orgánica del suelo.

**Tabla 3.19.** Resultados de pH y COT para lixiviados de los sistemas de suelo aditivado

MATERIAL	pH	COT (ppm)
Suelo Natural	5.30	7.15
Suelo-Aceite Sulfonado	5.64	7.82
Suelo-Polímero	6.95	10.69
Suelo-Enzima	5.51	8.61
Suelo-Organosilano	5.34	6.51
Suelo-Cal	12.06	7.11
Suelo-Cemento	11.13	22.58
Suelo-Zeolita/Cemento	11.74	11.57

### DBO<sub>5</sub>, DQO y Biodegradabilidad

En la Tabla 3.20 se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de DQO, DBO<sub>5</sub> y clasificación de biodegradabilidad de los lixiviados obtenidos de los materiales evaluados. Como se puede observar, los resultados de DQO de los sistemas aditivados

no presentaron gran variabilidad respecto al resultado del suelo natural. Sin embargo, en el caso de la DBO<sub>5</sub>, los materiales aditivados con los productos cementantes: cal, cemento y zeolita/cemento mostraron disminuciones significativas de este parámetro, resultado atribuible tanto al CaO presente en estos productos, el cual tiene un efecto significativo en la precipitación de la materia orgánica contenida en la muestra, como a la floculación inducida por el aumento del pH debido al agotamiento del CO<sub>2</sub>; todo lo cual conduce a una disminución en la DBO<sub>5</sub> (Branyikova et al., 2018), (Mayers et al., 2019).

La biodegradabilidad, definida como la relación entre la DBO<sub>5</sub> y la DQO, donde las relaciones mayores a 0.4 indican que el medio analizado es biodegradable, aquellas inferiores a 0.2 se consideran no biodegradables y para valores intermedios se adopta la clasificación de moderadamente biodegradable. Los resultados obtenidos para los aditivos líquidos evaluados tienden hacia la biodegradabilidad; lo que, en términos ambientales, puede considerarse positivo ya que es un indicativo que la aplicación de estos materiales no presenta afectaciones por lixiviación. De otro lado, los resultados obtenidos para los aditivos cementantes mostraron características no biodegradables, lo cual resulta ser positivo en términos de durabilidad dado que son materiales estables ante la presencia de agentes biológicos.

**Tabla 3.20.** Resultados de DBO<sub>5</sub>, DQO y biodegradabilidad para lixiviados de los sistemas de suelo aditivado

MATERIAL	DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L )	DQO (mg O <sub>2</sub> /L )	RELACIÓN DBO <sub>5</sub> /DQO	CLASIFICACIÓN
Suelo Natural	97.990	387.105	0.2531	Moderadamente Biodegradable
Suelo-Aceite Sulfonado	91.615	186.500	0.4912	Biodegradable
Suelo-Polímero	99.940	400.100	0.2498	Moderadamente Biodegradable
Suelo-Enzima	90.040	385.350	0.2337	Moderadamente Biodegradable
Suelo-Organosilano	140.215	320.050	0.4381	Biodegradable
Suelo-Cal	20.365	557.500	0.0365	No biodegradable
Suelo-Cemento	21.640	426.050	0.0508	No biodegradable
Suelo-Zeolita/Cemento	33.115	534.000	0.0620	No biodegradable

- Posibles afectaciones del medio ambiente por desprendimiento de material particulado

### Desgaste

La prueba de desgaste superficial realizada sobre las probetas de los sistemas evaluados, ofrece información de interés ya que da una noción de la erodabilidad y la generación de material particulado que podrían tener los suelos tratados con estos productos químicos. En la Figura 3.35 se registra la masa de desgaste asociada a cada sistema aditivado. Es evidente que el suelo tratado con el organosilano presenta un

mayor grado de erosión que con el resto de productos; resultado que es coherente con otros estudios que han demostrado que los organosilanos mejoran significativamente propiedades como la permeabilidad y resistencia al agua pero son muy susceptibles al desgaste superficial. Para este tipo de aditivos se recomienda la aplicación de riegos superficiales, poliméricos o asfálticos, como protección ante el desgaste superficial que pueden sufrir a causa del tráfico (Gobernación de Antioquia, 2015).

Los aditivos que mejores resultados mostraron para este parámetro son el cemento y la zeolita/cemento; productos que se caracterizan por su alta capacidad cementante, lo que hace que se presente una mayor cohesión entre las partículas y consecuente una mayor resistencia a los agentes físicos. Por otra parte, la masa de desgaste presentada para el resto de aditivos se mantuvo cercana a la generada por el suelo natural, de donde se puede decir que estos estabilizantes no influyen significativamente en la susceptibilidad a la erosión ni a la posible generación de material particulado del suelo evaluado.

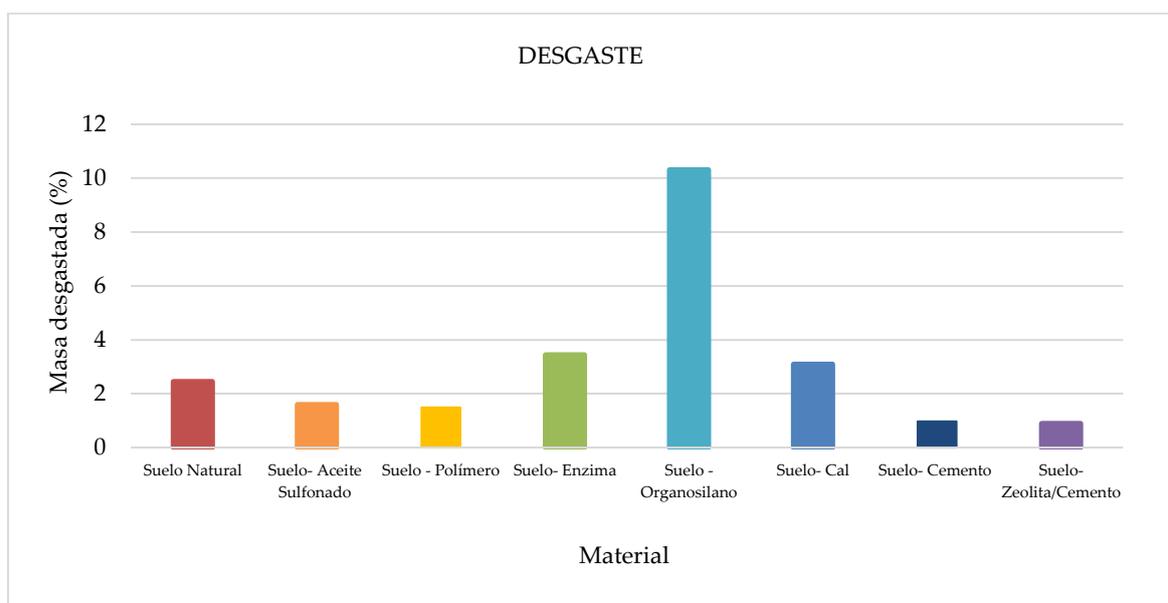


Figura 3.35. Resultados de las pruebas de desgaste para los sistemas de suelo aditivado

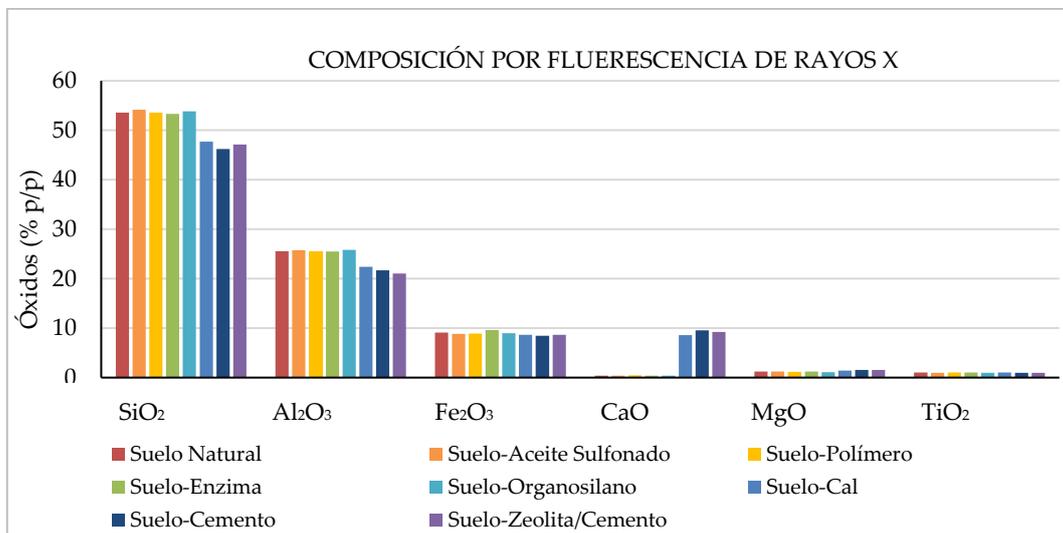
### Análisis de composición química por Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X, XRF

Los resultados del análisis composicional por XRF del material particulado obtenido en el ensayo de desgaste se muestran en la Figura 3.36. Como puede observarse, Si, Al y Fe son los elementos mayoritarios en todos los sistemas analizados, constituyendo aproximadamente el 85% de la composición química de los materiales. Estos elementos hacen parte de la estructura básica de los suelos (Nshimiyimana et al., 2020), por lo que su presencia en el material particulado no representa riesgo para el ser humano y el medio ambiente. Es de anotar que los resultados de composición química de los

materiales evaluados incluía otros elementos como Na, K, P, Mn, Ba, Cr, Zr, V; sin embargo estos no se incluyeron en la gráfica dado que sus relaciones en % p/p fueron inferiores a 0.1%.

Para el caso del suelo aditivado con cal, cemento y zeolita/cemento se presenta un aumento en el porcentaje de calcio y magnesio debido a que están presentes en la constitución básica de estos aditivos; no obstante, no representan ninguna afectación.

En términos generales, comparando los resultados del suelo natural con los obtenidos para el resto de muestras aditivadas, se puede concluir que no hay diferencias significativas en la composición química y puede inferirse que no hay presencia de elementos nocivos para el medio ambiente o la salud en el suelo aditivado con los productos evaluados.



\*Elementos identificados en algunas muestras < 1000 ppm: Na, K, P, Mn, Ba, Cr, Zr, V

**Figura 3.36.** Resultados de composición química para el material particulado desprendido de los sistemas de suelo aditivado.

### Análisis de tamaño de partícula por difracción láser

En la Tabla 3.21 se muestran los resultados del análisis de tamaño de partícula por difracción láser del material particulado obtenido en el ensayo de desgaste. Estos resultados se expresan en función de los diámetros correspondientes al 10%, 50% y 90% del material más fino en la curva de distribución de tamaño de partícula  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  y  $D_{90}$  respectivamente, parámetros comúnmente utilizados para describir las distribuciones de tamaño de partícula en este tipo de análisis. Se puede observar que en general hay un aumento en los tamaños de partícula de los materiales que incluyen aditivos respecto a los valores obtenidos para el suelo natural. Estos resultados ponen de manifiesto que los aditivos estudiados afectan la textura del suelo aumentando el tamaño de las partículas

por mecanismos fisicoquímicos de aglomeración y adhesión. Adicionalmente, al presentar mayores tamaños se disminuye la probabilidad de que estos materiales representen riesgo a la salud por inhalación.

**Tabla 3.21.** Resultados del análisis de tamaño de partícula para el para el material particulado desprendido de los sistemas de suelo aditivado

MATERIAL	DIÁMETRO DE PARTÍCULA (μM)		
	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>
Suelo Natural	4.353	42.354	279.425
Suelo-Aceite Sulfonado	5.772	61.456	333.561
Suelo-Polímero	5.438	70.984	349.071
Suelo-Enzima	4.627	45.874	246.646
Suelo-Organosilano	6.850	85.191	309.267
Suelo-Cal	8.565	108.676	576.937
Suelo-Cemento	6.926	71.036	335.978
Suelo-Zeolita/Cemento	7.597	98.580	467.545

Resumen de los resultados obtenidos en la evaluación ambiental de los sistemas mixtos de suelo con los aditivos químicos

En la Figura 3.37 se muestra de manera esquemática los resultados más importantes obtenidos en la etapa de evaluación ambiental de los sistemas mixtos de suelo con los aditivos químicos.



**Figura 3.37.** Resumen de los resultados obtenidos en la evaluación ambiental de los sistemas mixtos de suelo con los aditivos químicos

### 3.6. Pruebas de intemperismo

Tal como se mencionó en el CAPÍTULO II: desarrollo experimental, los sistemas mixtos de suelo con los aditivos químicos fueron sometidos a diferentes condiciones de intemperismo:

- *Envejecimiento artificial por exposiciones a ciclos alternados de luz ultravioleta y humedad en cámara QUV*: de acuerdo con la norma ASTM G154 «Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Non metallic Materials» (ASTM G154, 2016), se programaron ciclos de exposición alternados de 8 horas de luz UVA a una irradiancia de 1.55 W/m<sup>2</sup>/nm y temperatura de 60°C con 4 horas de condensación a una temperatura de 50°C, dichos ciclos fueron repetidos continuamente hasta alcanzar los tiempos de exposición establecidos en el diseño experimental.
- *Envejecimiento natural*: las muestras fueron expuestas a condiciones de intemperie natural: radiación solar, humedad y temperatura; sin embargo, fueron protegidas de la lluvia directa con una placa de metacrilato para evitar que perdieran su forma. Fueron sometidas a diferentes tiempos de envejecimiento de acuerdo con el diseño experimental con un m.
- *Condiciones resguardadas*: muestras expuestas a condiciones controladas de laboratorio en un ambiente resguardado de la intemperie, a diferentes tiempos de acuerdo con el diseño experimental.

Una vez sometidos a estas condiciones de intemperismo, el desempeño de los materiales fue evaluado de acuerdo con las siguientes variables de respuesta, consideradas en el diseño de experimentos:

- Resistencia a la compresión simple
- Corte directo
- Límites de Atterberg
- pH
- Conductividad eléctrica
- SEM
- Área superficial
- CIC
- Espectrometría IR
- Lixiviación: DBO, DQO y COT

El análisis estadístico de los datos obtenidos se realizó de acuerdo con los métodos establecidos en la norma ASTM G169 – 01 *Application of Basic Statistical Methods to Weathering Tests* (ASTM G169, 2013), haciendo uso del software R.

Las pruebas de envejecimiento artificial acelerado empleando una cámara QUV permitieron observar el comportamiento de estos sistemas ante condiciones ambientales adversas, tales como irradiación elevada (exposición a luz ultravioleta UVA) y humedad

por condensación; ambos ciclos a altas temperaturas: 50°C y 60 °, con lo cual se favorecen los posibles procesos de degradación que puedan presentarse en los sistemas mixtos de suelo aditivado.

Para todas las muestras sometidas tanto a las condiciones de la cámara QUV como al intemperismo natural, independiente de la naturaleza del producto químico aplicado, se observa una degradación cuya intensidad de color disminuye con el tiempo de exposición, Figura 3.38. Este fenómeno de degradación de color se genera por la deshidratación de los materiales y en la mayoría de los casos se observó que era netamente superficial.



Figura 3.38. Degradación de color con la exposición a intemperismo

Todas las probetas sometidas al ensayo de compresión simple presentaron grietas longitudinales e inclinadas respecto al eje de compresión; las probetas de suelo natural presentaron mayor proporción de estas fracturas con respecto a las probetas aditivadas, debido a que los aditivos le confieren a las partículas del suelo un mayor grado de adherencia Figura 3.39. En el caso de las probetas correspondientes al suelo aditivado con los productos líquidos: aceite sulfonado, polímero, enzima y organosilano, inicialmente se pudo observar el ensanchamiento progresivo de la muestra antes de llegar a la carga máxima que produjo la falla, asemejándose a una falla plástica o en barril. Al finalizar el ensayo, todos los materiales presentaron una falla frágil o por deslizamiento por el esfuerzo cortante, mostrando un corte claro a lo largo de un plano de deslizamiento y un ángulo de falla bien definido. Este tipo de falla es propio de suelos cohesivos densificados o sobreconsolidados.

Cabe resaltar aquí que el tipo de falla frágil se mantuvo independientemente del tipo de intemperismo al cual fueron sometidas las probetas. Este resultado es relevante pues

confirma que el deterioro que sufre el material sometido a intemperismo natural es replicable bajo condiciones de intemperismo acelerado en cámara QUV.



(a) Suelo natural



(b) Suelo-Aceite Sulfonado



(c) Suelo-Polímero



(d) Suelo-Enzima



(e) Suelo-Organosilano



(f) Suelo-Cal



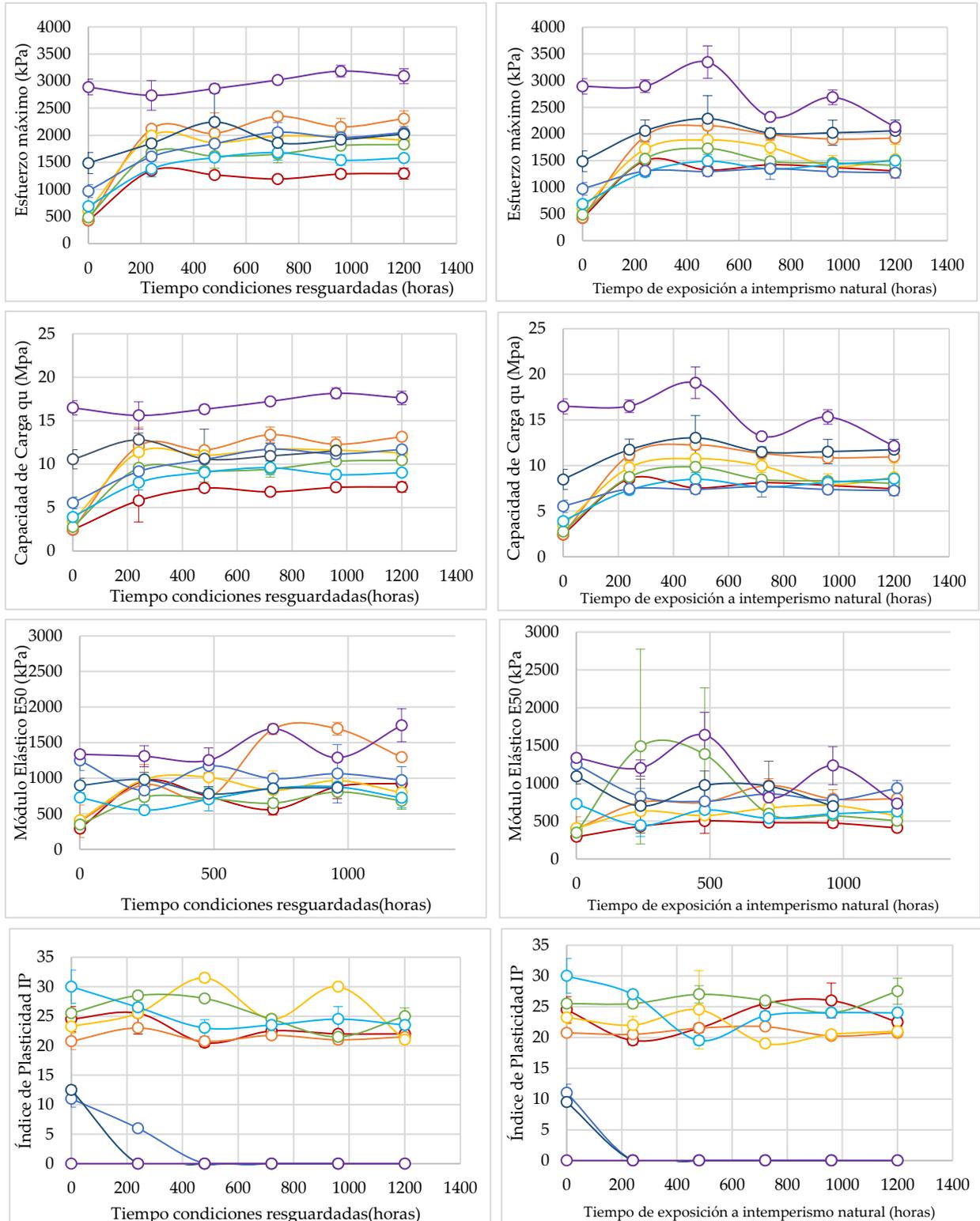
(g) Suelo-Cemento

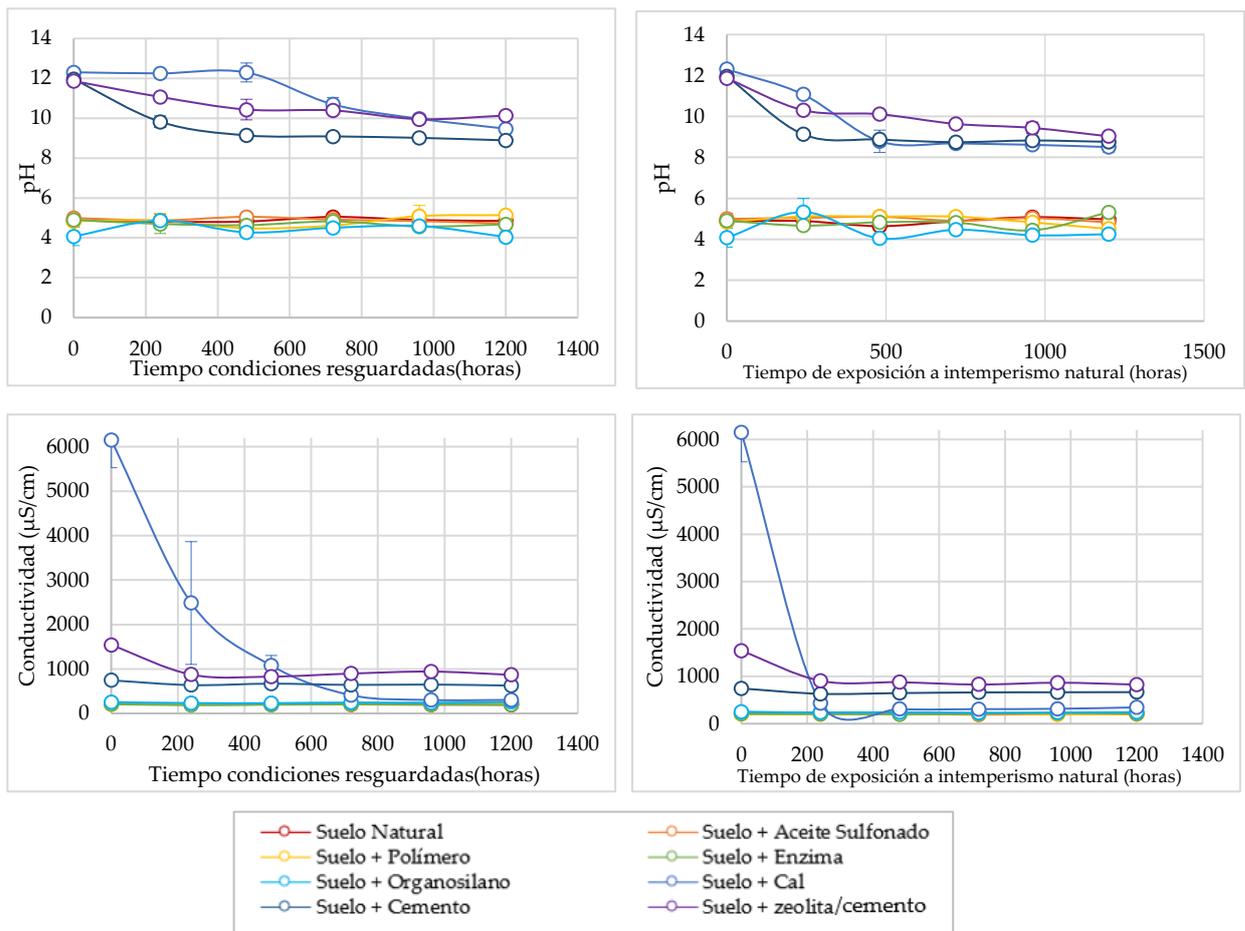


(h) Suelo-Zeolita/Cemento

**Figura 3.39.** Falla frágil presentada en todas las probetas ensayadas a compresión simple, independiente del tiempo y el aditivo

Con el fin de comprobar el efecto que tiene el intemperismo sobre los materiales evaluados, se compararon los resultados de las muestras sometidas a intemperismo natural con las muestras que fueron resguardadas en laboratorio. Los resultados que se consignan en las gráficas de la Figura 3.40, muestran que existen diferencias apreciables, en diferente magnitud según cada variable de respuesta, entre los resultados obtenidos para los materiales sometidos a intemperismo natural y los que fueron resguardados en laboratorio.





**Figura 3.40.** Resultados obtenidos en las variables de respuesta de materiales expuesto a condiciones resguardadas y de intemperismo natural

Se realizó un análisis estadístico para determinar si las variables de respuesta presentan diferencias significativas en cada uno de los materiales evaluados, comparando el intemperismo natural con las condiciones resguardadas. Inicialmente, con el fin de determinar cuál era la prueba estadística más adecuada para cada conjunto de datos, se realizó el test de Levene basado en la mediana, se consideró un nivel de significancia  $\alpha=0.05$ , para evaluar la homocedasticidad de cada conjunto de datos; hay que tener en cuenta que cuando el estadístico  $p > \alpha$  se acepta la hipótesis nula y se concluye que el conjunto de datos cumple con el supuesto de homocedasticidad y por tanto es adecuado realizar la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis; en caso contrario en que el estadístico de Levene resulte ser menor que la significancia  $p < \alpha$  se rechaza la hipótesis nula y concluyéndose que los datos no cumplen con el supuesto homocedasticidad y por tanto no es adecuado realizar la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, tal como se muestra en la Tabla 3.22.

**Tabla 3.22.** Resultados test de Levene para los conjuntos de datos de las variables de respuesta según el factor intemperismo

Esfuerzo máximo (kPa)	Módulo Elástico E50 (kPa)	Capacidad de carga (Mpa)	IP	pH	Conductividad (μS/cm)
<b>Suelo Natural</b>					
0.4359	0.006567*	0.6794	0.1764	0.2316	0.4262
<b>Suelo-Aceite Sulfonado</b>					
0.1969	0.00412*	0.1721	0.09209	0.8373	0.8252
<b>Suelo-Polímero</b>					
0.02752*	0.1427	0.02857*	0.1242	0.4101	0.5513
<b>Suelo-Enzima</b>					
0.8901	0.1588	0.8901	0.03053*	0.6105	0.1538
<b>Suelo-Organosilano</b>					
0.9146	0.1716	0.9147	0.5743	0.47	0.3374
<b>Suelo-Cal</b>					
0.03416*	0.1182	0.03417*	-	0.2159	0.07443
<b>Suelo-Cemento</b>					
0.9275	0.08401	0.9275	-	0.2739	0.5605
<b>Suelo-Zeolita/Cemento</b>					
0.0163*	0.4642	0.0163*	-	0.6288	0.5803

\*Para estos conjuntos de datos no se logra comprobar la homocedasticidad de los datos y por tanto debe usarse la prueba no paramétrica de Wilcoxon

Para comparar los resultados de los materiales expuestos a intemperismo y los que estuvieron bajo condiciones resguardadas, posterior al test de homocedasticidad se utilizaron las pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis y Wilcoxon considerando un nivel de significancia  $\alpha=0.05$ . En este caso cuando el estadístico  $p < \alpha$  se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa logrando determinar que hay diferencias significativas entre los datos analizados. En la Tabla 3.23 se puede observar que hay diferencias significativas en al menos un parámetro por sistema aditivado; adicionalmente se aprecia que los aditivos cementantes: cemento y zeolita/cemento, son los más resistentes al intemperismo en tanto que sus propiedades mecánicas no presentaron diferencias significativas.

**Tabla 3.23.** Resultados pruebas de hipótesis no paramétricas para evaluar el efecto del intemperismo

Esfuerzo máximo (kPa)	Módulo Elástico E50 (kPa)	Capacidad de carga (Mpa)	IP	pH	Conductividad (μS/cm)
<b>Suelo Natural</b>					
0.01911	0.00007578	0.01017	0.6701	0.6229	0.02324
<b>Suelo-Aceite Sulfonado</b>					
0.01017	0.01854	0.01017	0.09418	0.1508	0.57
<b>Suelo-Polímero</b>					
0.001505	0.000881	0.0002057	0.00355	0.4497	0.02819
<b>Suelo-Enzima</b>					
0.004072	0.1509	0.004072	0.7281	0.4051	0.07544

Suelo-Organosilano					
0.01017	0.02837	0.01017	0.9374	0.4048	0.9096
Suelo-Cal					
0.00001083	0.04937	0.00001083	-	0.004072	0.2559
Suelo-Cemento					
0.2265	0.8206	0.2265	-	0.007263	0.7911
Suelo-Zeolita/Cemento					
0.07526	0.04125	0.07526	-	0.01722	0.65

\*Se resaltan en negrita los resultados para los cuales se logra determinar que hay diferencias significativas

Posteriormente y con el fin de comparar los resultados de los sistemas aditivados respecto al suelo natural se realizó un análisis estadístico de los datos con las mismas consideraciones mencionadas anteriormente. En la Tabla 3.24 se muestran los resultados del test de Levene para cada conjunto de datos, con el fin de determinar el uso adecuado de las pruebas no paramétricas.

**Tabla 3.24.** Resultados test de Levene para los conjuntos de datos de las variables de respuesta según el sistema aditivado

Esfuerzo máximo (kPa)	Módulo Elástico E50 (kPa)	Capacidad de carga (Mpa)	IP	pH	Conductividad (µS/cm)
Suelo-Aceite Sulfonado					
0.7247	0.006884*	0.8976	0.01356*	0.2802	0.1327
Suelo-Polímero					
0.8438	0.8392	0.9638	0.1019	0.1091	0.2825
Suelo-Enzima					
0.9015	0.358	0.8384	0.06128	0.0417*	0.7319
Suelo-Organosilano					
0.3105	0.4396	0.1827	0.2934	0.0007393*	0.4512
Suelo-Cal					
0.1733	0.5937	0.3312	0.03926*	2.324e-14*	0.0001399*
Suelo-Cemento					
0.01319*	0.3274	0.03197*	0.8124	0.0000002695*	0.0001384*
Suelo-Zeolita/Cemento					
0.3993	0.01298*	0.6282	9.533e-11*	0.0000003552*	0.00005339*

\*Para estos conjuntos de datos no se logra comprobar la homocedasticidad de los datos y por tanto debe usarse la prueba no paramétrica de Wilcoxon

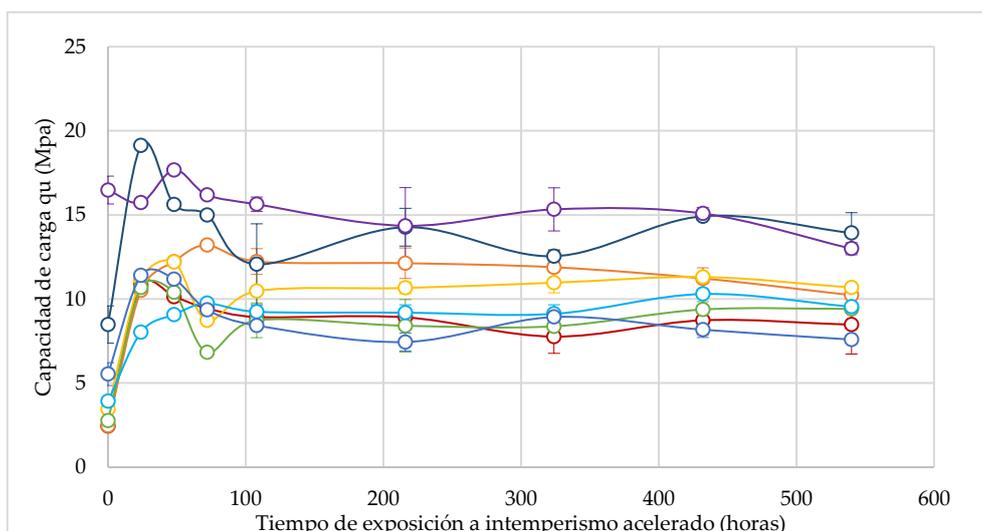
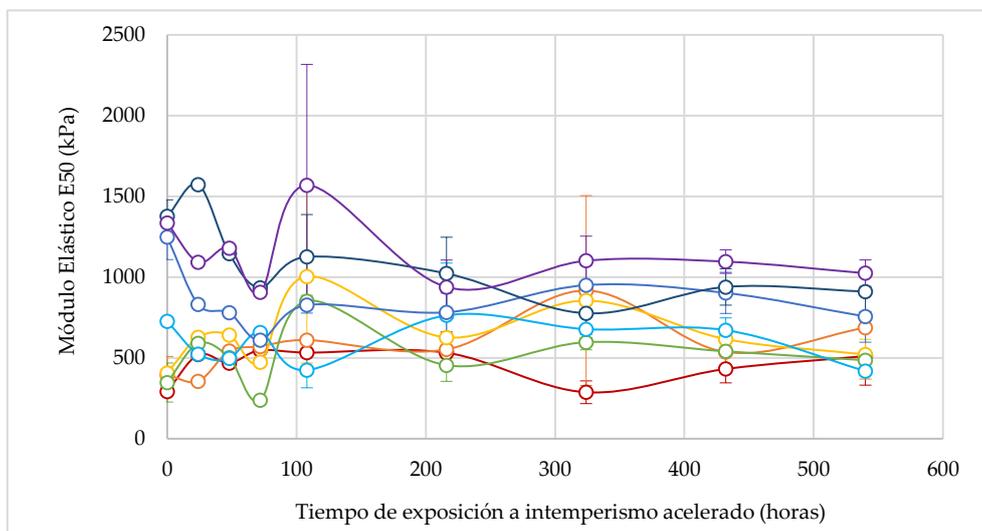
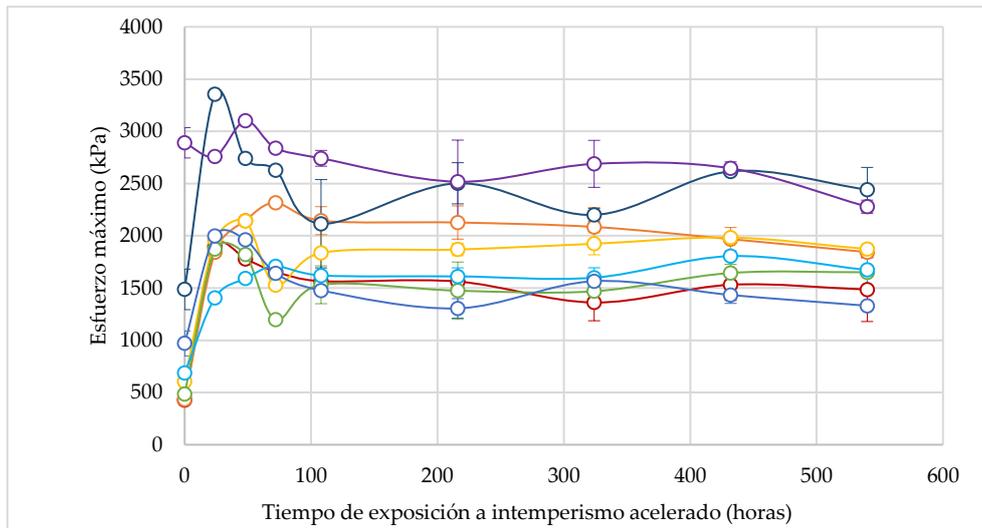
En la Tabla 3.25 se presentan los resultados para las pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis y Wilcoxon, con los cuales se puede evaluar el efecto de los aditivos estudiados respecto al suelo natural. Los estadísticos calculados en estas pruebas, permiten concluir —cuando  $p < \alpha$ — que los aditivos evaluados tienen un impacto significativo, aunque en diferente magnitud, sobre las propiedades ingenieriles del suelo natural. Teniendo en cuenta la magnitud de los estadísticos se encuentra que los aditivos cementantes son los que más impacto tienen sobre las propiedades del suelo y de los aditivos líquidos se destaca el aceite sulfonado y el polímero.

**Tabla 3.25.** Resultados pruebas de hipótesis no paramétricas para evaluar el efecto de los aditivos evaluados respecto al suelo natural

Esfuerzo máximo (kPa)	Módulo Elástico E50 (kPa)	Capacidad de carga (Mpa )	IP	pH	Conductividad (μS/cm)
<b>Suelo-Aceite Sulfonado</b>					
5.942e-11	0.0008374	6.826e-11	0.000004202	0.3883	0.3687
<b>Suelo-Polímero</b>					
0.00000006577	0.0002881	0.00000005212	0.03371	0.8967	0.779
<b>Suelo-Enzima</b>					
0.004565	0.04664	0.004139	0.2542	0.03535	0.05198
<b>Suelo-Organosilano</b>					
0.02483	0.01549	0.02109	0.7891	0.4481	0.0000002158
<b>Suelo-Cal</b>					
0.07737	0.000000005959	0.05461	2.662e-15	6.555e-14	6.566e-14
<b>Suelo-Cemento</b>					
2.613e-12	6.348e-10	2.427e-12	5.63e-15	6.566e-14	6.563e-14
<b>Suelo-Zeolita/Cemento</b>					
6.335e-14	2.427e-12	6.335e-14	9.842e-16	6.568e-14	6.576e-14

Correlación entre intemperismo acelerado e intemperismo natural para los materiales evaluados

Una vez evidenciados los efectos que tiene el intemperismo y el tipo de aditivo sobre las propiedades de los materiales evaluados, se procedió a comparar los resultados obtenidos entre los materiales expuestos a condiciones de intemperismo natural y los expuestos a condiciones de intemperismo acelerado, con el fin de obtener los factores de aceleración para cada material objeto de estudio. En las gráficas de la Figura 3.41 se muestra la evolución de las propiedades de cada material bajo las condiciones de intemperismo acelerado; en estas se evidencian cambios en las propiedades de cada material como resultado de la exposición a la energía radiante proveniente de la luz solar, en combinación con el calor —contemplando las condiciones de altas temperaturas— y el agua en sus diversos estados, principalmente como humedad y rocío.



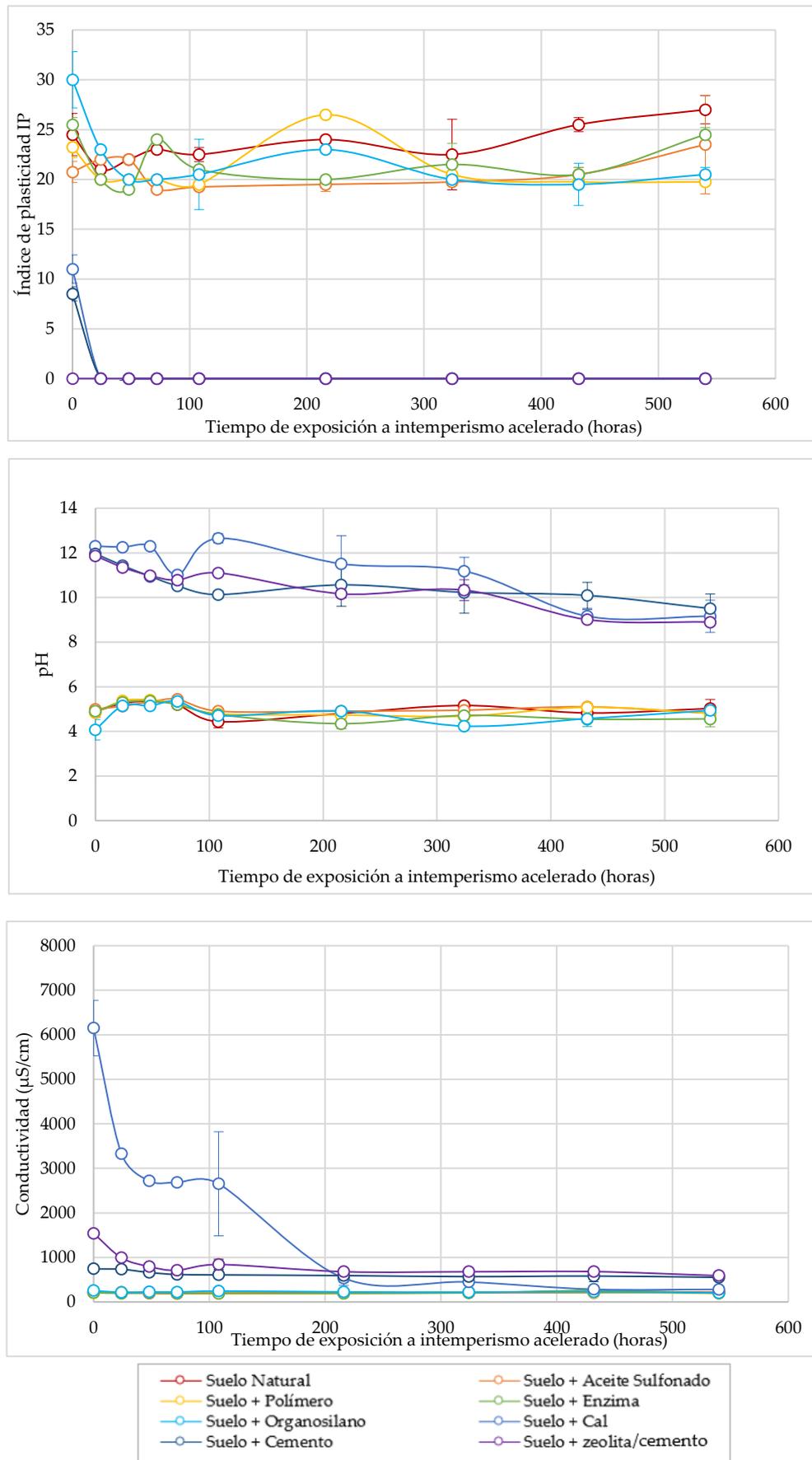


Figura 3.41. Resultados obtenidos en las variables de respuesta de los materiales expuestos a condiciones de intemperismo acelerado

De acuerdo con los métodos establecidos en la norma ASTM G169 – 01 *Application of Basic Statistical Methods to Weathering Tests* (ASTM G169, 2013), mediante el coeficiente de Spearman se evaluó el grado de correlación existente entre los resultados de los materiales sometidos a condiciones de intemperismo acelerado y los resultados obtenidos bajo condiciones de intemperismo natural. En la Tabla 3.26 se muestran los coeficientes de correlación para cada uno de los materiales evaluados en las diferentes variables de respuesta. E debe tener en cuenta que un coeficiente de Spearman entre 0.66 y 0.85 se considera una correlación buena y por encima de 0.85 se considera una correlación muy buena (Hernández Sampieri et al., 2010)

Se observa que para los parámetros mecánicos: resistencia a la compresión simple y capacidad de carga, para todos los sistemas mixtos evaluados se obtiene un buen grado de correlación entre los resultados de los materiales sometidos a condiciones de intemperismo acelerado y los resultados obtenidos bajo condiciones de intemperismo natural, lo que demuestra que estas propiedades tienen una evolución significativa a través del tiempo. De otra parte, los parámetros fisicoquímicos y de plasticidad no presentaron buenas correlaciones en todos los materiales, incluso se encontraron correlaciones negativas. Este comportamiento se debe probablemente a que en algunos materiales estas propiedades son fluctuantes en el tiempo y no se logra definir una tendencia clara de evolución.

Teniendo en cuenta que para los parámetros mecánicos: resistencia a la compresión simple y capacidad de carga, se encuentra una buena correlación entre las condiciones de intemperismo evaluadas, se considera que es adecuado usar alguno de estos parámetros para calcular los factores de aceleración propios de cada material.

**Tabla 3.26.** Resultados coeficiente de correlación de Spearman\*

Esfuerzo máximo (kPa)	Módulo Elástico E50 (kPa)	Capacidad de carga (Mpa )	IP	pH	Conductividad (μS/cm)
<b>Suelo Natural</b>					
0.8285714	0.3714286	0.8285714	0.4857143	-0.7714286	-0.2571429
<b>Suelo-Aceite Sulfonado</b>					
0.7142857	0.7714286	0.7142857	-0.1470588	0.2898855	0.2571429
<b>Suelo-Polímero</b>					
0.6571429	0.6	0.6571429	0.2732295	0.9428571	0.02857143
<b>Suelo- Enzima</b>					
0.7714286	0.3714286	0.7714286	-0.4852941	-0.2571429	-0.6571429
<b>Suelo-Organosilano</b>					
0.7	0.2571429	0.7	0.9404033	0.4638168	0.6567896
<b>Suelo-Cal</b>					
0.8285714	0.3714286	0.8285714	-	0.2571429	0.4857143
<b>Suelo-Cemento</b>					
0.6	0.5428571	0.6	-	0.8285714	-0.1428571
<b>Suelo-Zeolita/Cemento</b>					
0.7142857	0.7142857	0.7142857	-	0.8285714	0.9428571

### Factores de aceleración

Teniendo en cuenta que el factor de aceleración es la equivalencia numérica entre el tiempo bajo condiciones de intemperismo acelerado y el tiempo bajo condiciones de intemperismo natural para un determinado material, este se puede hallar de manera teórica relacionando la irradiación UV total recibida por las muestras en la cámara de intemperismo acelerado y la irradiación UV recibida bajo condiciones de intemperismo natural. De esta forma se calcula un factor de aceleración teórico  $FA_{teórico}$  teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

- El ciclo completo de la cámara consta de 12 horas: 8 horas de radiación UV y 4 horas de condensación a 100% de humedad relativa.
- La irradiancia aplicada mediante la cámara de envejecimiento acelerado utilizada en este trabajo es igual a  $1.55 \text{ W/m}^2\text{nm}$  que a  $340 \text{ nm}$  equivale a  $527 \text{ W/m}^2$ .
- Según datos aportados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, el promedio general de la radiación global medida en la ciudad de Medellín durante los últimos 4 años es de  $4375.6 \text{ Wh/m}^2$  por día.
- El sol emite una gran cantidad de energía a la tierra de la cual solo un 7% aproximadamente corresponde a la radiación ultravioleta (UV), es decir que para la ciudad de Medellín se tienen una radiación UV de  $306.29 \text{ Wh/m}^2$  por día.

Partiendo de estas consideraciones y realizando los cálculos respectivos, se encuentra que  $FA_{teórico} = 27.5:1$ , es decir que una hora de intemperismo acelerado equivale a 27.5 horas de intemperismo natural. Es de anotar que esta aproximación teórica del factor de aceleración se centra solamente en la radiación UV y no tiene en cuenta los efectos de degradación que se presentan al combinar otros factores del intemperismo como la temperatura y la humedad, todo lo cual le daría mayor precisión al factor encontrado.

Con el fin de obtener factores de aceleración más exactos para los materiales evaluados, se tomó como variable de respuesta representativa la capacidad de carga de los materiales. Considerando el punto donde se alcanza el máximo registrado por cada material, se calculan factores de aceleración experimentales  $FA_{exp}$ , tal como se muestra en la Ecuación 3.3.

$$FA_{exp} = \frac{\text{Tiempo Intemperismo Natural}_{máximo q_u}(h)}{\text{Tiempo Intemperismo acelerado}_{máximo q_u}(h)} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

En la Tabla 3.27 se muestran los factores de aceleración obtenidos para cada material. Estos factores permiten estimar con mayor precisión el tiempo equivalente en condiciones naturales de un material sometido a exposición acelerada en una cámara de envejecimiento acelerado, bajo las condiciones estudiadas y establecidas en la norma

ASTM G154 “Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials” (ASTM G154, 2016).

**Tabla 3.27.** Factores de aceleración calculados con datos experimentales para cada material evaluado

MATERIAL	Tiempo Intemperismo Natural máximo qu (h)	Tiempo Intemperismo acelerado máximo qu (h)	FA <sub>exp</sub>
Suelo Natural	240	24	10:1
Suelo-Aceite Sulfonado	480	48	10:1
Suelo-Polímero	480	48	10:1
Suelo-Enzima	480	24	20:1
Suelo-Organosilano	480	72	7:1
Suelo-Cal	240	24	10:1
Suelo-Cemento	480	24	20:1
Suelo-Zeolita/Cemento	480	48	10:1

Los factores de aceleración obtenidos permiten estimar la vida útil de los materiales en condiciones de intemperismo natural; teniendo en cuenta los resultados de capacidad de carga obtenidos a los diferentes tiempos de intemperismo acelerado, Figura 3.42, se puede observar que al final del tiempo de intemperismo el único material que presenta menor resistencia que el suelo natural es el sistema mixto suelo-cal. Con base al factor de aceleración es posible establecer que este sistema presenta una durabilidad menor a 8 meses al estar expuesto a condiciones de intemperismo natural; durabilidad que está relacionada además con la dosificación evaluada.

Los mejores resultados de desempeño se alcanzan para los sistemas mixtos suelo-cemento y suelo-zeolita/cemento, que después de 540 h de intemperismo acelerado siguen presentando resultados de resistencia muy altos. Teniendo en cuenta los factores de aceleración, se estima que estos materiales pueden tener una vida útil mayor a 15 meses bajo condiciones de intemperismo natural. Se destaca que el sistema suelo-zeolita/cemento, pese a presentar un factor de aceleración menor, exhibió un comportamiento más estable durante el tiempo de evaluación respecto al suelo-cemento.

Entre los aditivos líquidos, los que mejor desempeño presentan son el aceite sulfonado, el polímero y la enzima. Teniendo en cuenta el factor de aceleración, se estima una vida útil mayor a 8 meses bajo condiciones de intemperismo acelerado. Sin embargo, hay que tener en cuenta que estas estimaciones son basadas solo en el criterio de capacidad de carga; para tener un análisis más completo es necesario evaluar otras propiedades, como las que se analizan más adelante.

Resumen de los análisis realizados para las diferentes condiciones de intemperismo evaluadas

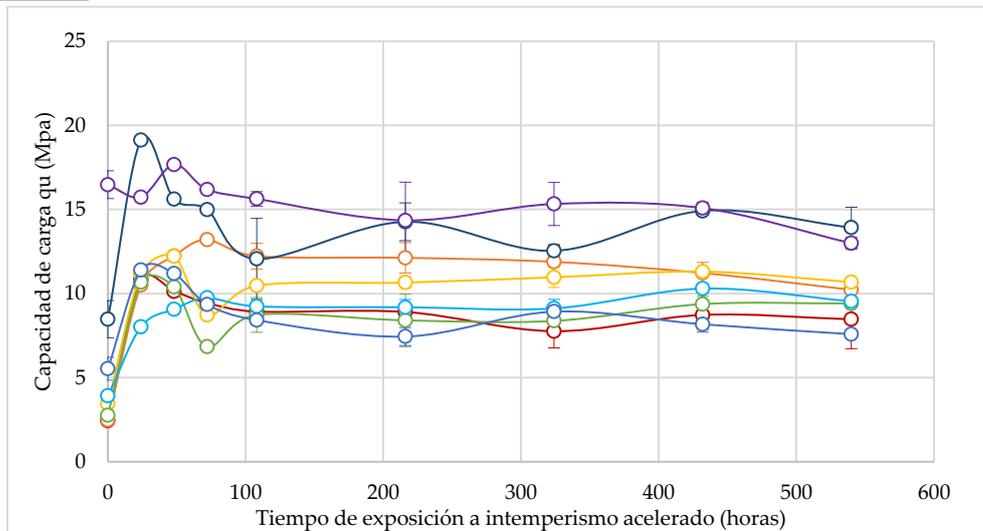


Figura 3.42. Resultados obtenidos de la capacidad carga de los materiales expuestos a condiciones de intemperismo acelerado

En el esquema mostrado en la Figura 3.43 se presenta de manera resumida los análisis y conclusiones obtenidas para las diferentes condiciones de intemperismo evaluadas

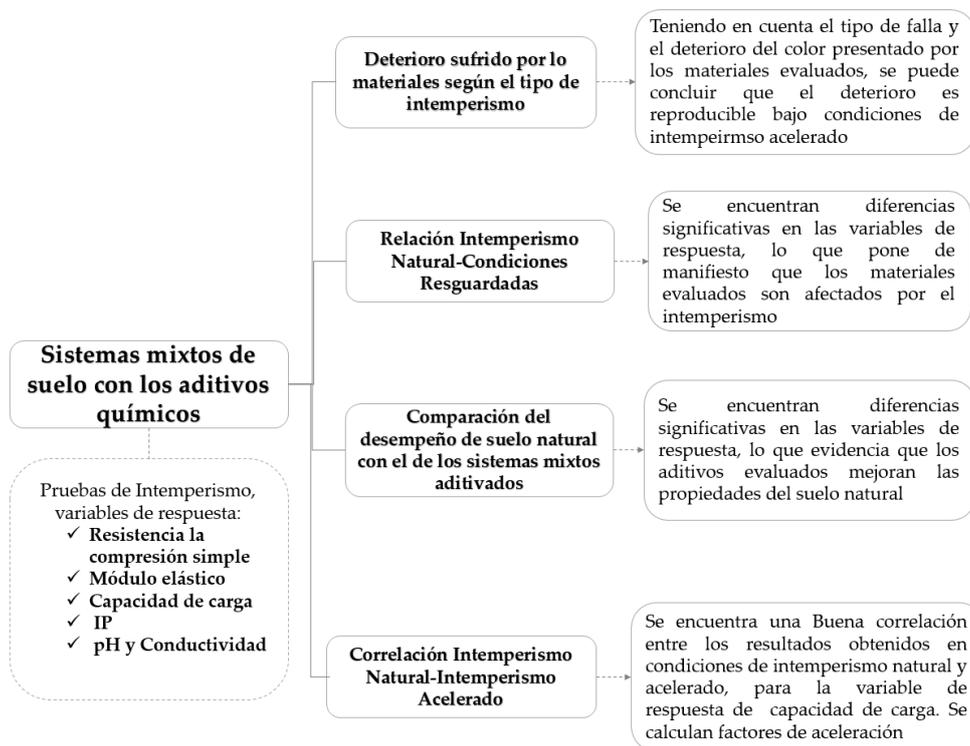


Figura 3.43. Resumen de los análisis realizados para las diferentes condiciones de intemperismo evaluadas

### Ensayos de corte directo para los materiales expuestos a intemperismo

Se realizaron pruebas de corte directo para determinar los parámetros de resistencia cortante y la capacidad de carga de las muestras que fueron aditivadas y sometidas a las diferentes condiciones de intemperismo, Tabla 3.28, Tabla 3.29 y Tabla 3.30. En general se puede observar que para todos los tiempos y tipo de intemperismo los materiales aditivados presentaron mayores capacidades de carga respecto al suelo natural, lo que pone de manifiesto el aporte de los productos evaluados en la mejora de las propiedades ingenieriles del suelo.

Como se puede observar en la Tabla 3.28, los materiales que fueron resguardados del intemperismo mostraron capacidades de carga mayores respecto a las muestras sometidas a intemperismo natural y acelerado. Esto evidencia nuevamente el efecto que tiene el intemperismo sobre las propiedades mecánicas de este tipo de materiales.

Para las muestras sometidas a intemperismo natural, en la Tabla 3.29, se observa que tanto los parámetros de resistencia cortante como la capacidad de carga aumentaron respecto a las condiciones iniciales, comportamiento atribuible a los procesos de curado que se dan en los materiales. Sin embargo, a un mayor tiempo de exposición los materiales exhiben un leve deterioro de estas propiedades debido a los efectos del intemperismo natural. Este mismo comportamiento se observa en los resultados obtenidos para los materiales sometidos condiciones de intemperismo acelerado, Tabla 3.30, siendo mayor la magnitud del deterioro debido a las condiciones más extremas asociadas a este tipo de intemperismo. En estos resultados se destaca el desempeño de los sistemas mixtos suelo-aceite sulfonado y suelo-zeolita/cemento, que después de 540 horas de intemperismo acelerado presentan valores de capacidad de carga mayores a 45 MPa.

**Tabla 3.28.** Resultados ensayo de corte directo para muestras en condiciones resguardadas

Material	Ángulo de fricción interno ( $\phi$ )		Cohesión (kPa)		Capacidad de carga (MPa)	
	480 h	1200 h	480 h	1200 h	480 h	1200 h
Suelo Natural	38.5	39.5	347.6	343.6	27.62	29.23
Suelo-Aceite Sulfonado	44.9	44	297.9	341.6	51.84	50.59
Suelo-Polímero	43	40.9	368.5	398.2	47.01	38.70
Suelo-Enzima	44.3	42.4	258.2	286	42.76	35.63
Suelo-Organosilano	45.2	44.4	311.8	283	55.85	46.31
Suelo-Cal	42.3	42.2	217.5	255.2	28.27	31.63
Suelo-Cemento	41.4	41.3	388.3	355.5	40.51	37.01
Suelo-Zeolita/Cemento	44	44.6	381.4	380.4	55.18	59.74

**Tabla 3.29.** Resultados ensayo de corte directo para muestras sometidas a intemperismo natural

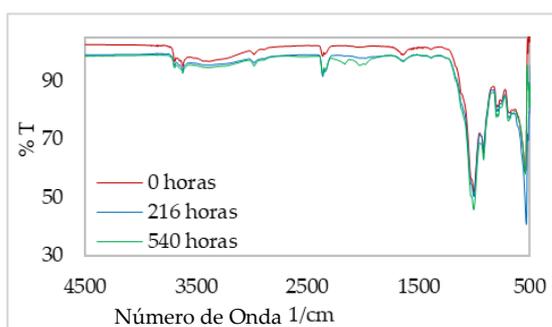
Material	Ángulo de fricción interno ( $\phi$ )			Cohesión (kPa)			Capacidad de carga (Mpa)		
	0 h	480 h	1200 h	0 h	480 h	1200 h	0 h	480 h	1200 h
Suelo Natural	28.8	38	39	160.9	330.7	277.1	5.38	23.9	23.09
Suelo-Aceite Sulfonado	26.5	43.8	42.9	272.1	379.4	375.4	7.00	49.38	48.24
Suelo-Polímero	29	43.5	39.6	161.9	300.9	361.5	5.51	42.78	30.79
Suelo-Enzima	30.1	44.1	44.1	190.7	258.2	228.4	6.96	41.36	37.77
Suelo-Organosilano	31.6	44.4	43.5	277.1	277.1	293	10.98	45.38	42.36
Suelo-Cal	24.1	40.9	40.9	321.8	247.3	271.1	6.74	26.31	28.07
Suelo-Cemento	42.2	39.5	38.2	409.2	414.1	469.7	47.35	34.37	33.11
Suelo-Zeolita/Cemento	43.5	44	44.7	416.1	405.2	340.6	55.63	58.09	55.36

**Tabla 3.30.** Resultados ensayo de corte directo para muestras sometidas a intemperismo acelerado

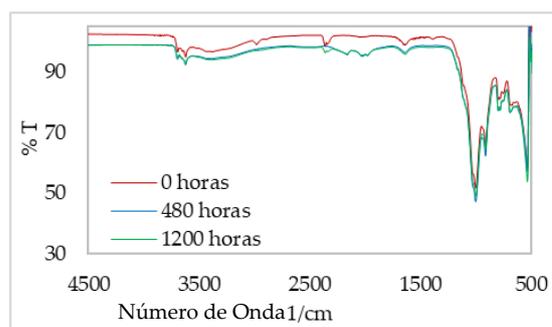
Material	Ángulo de fricción interno ( $\phi$ )			Cohesión (kPa)			Capacidad de carga (Mpa)		
	0 h	216 h	540 h	0 h	216 h	540 h	0 h	216 h	540 h
Suelo Natural	28.8	38.4	37.4	160.9	265.2	265.2	5.38	20.83	18.49
Suelo-Aceite Sulfonado	26.5	42.9	42.6	272.1	354.5	399.2	7.00	45.48	48.09
Suelo-Polímero	29	38.6	38.4	161.9	312.8	326.7	5.51	24.32	24.65
Suelo-Enzima	30.1	44.6	44.2	190.7	309.9	293	6.96	50.86	45.80
Suelo-Organosilano	31.6	41.5	44	277.1	335.7	230.4	10.98	36.15	36.82
Suelo-Cal	24.1	41.5	40.6	321.8	262.2	234.4	6.74	29.11	24.00
Suelo-Cemento	42.2	43.9	40.7	409.2	412.1	412.1	47.35	57.92	38.93
Suelo-Zeolita/Cemento	43.5	43.8	43.7	416.1	472.7	338.7	55.63	65.25	48.23

### Análisis composicional para los materiales expuestos a intemperismo

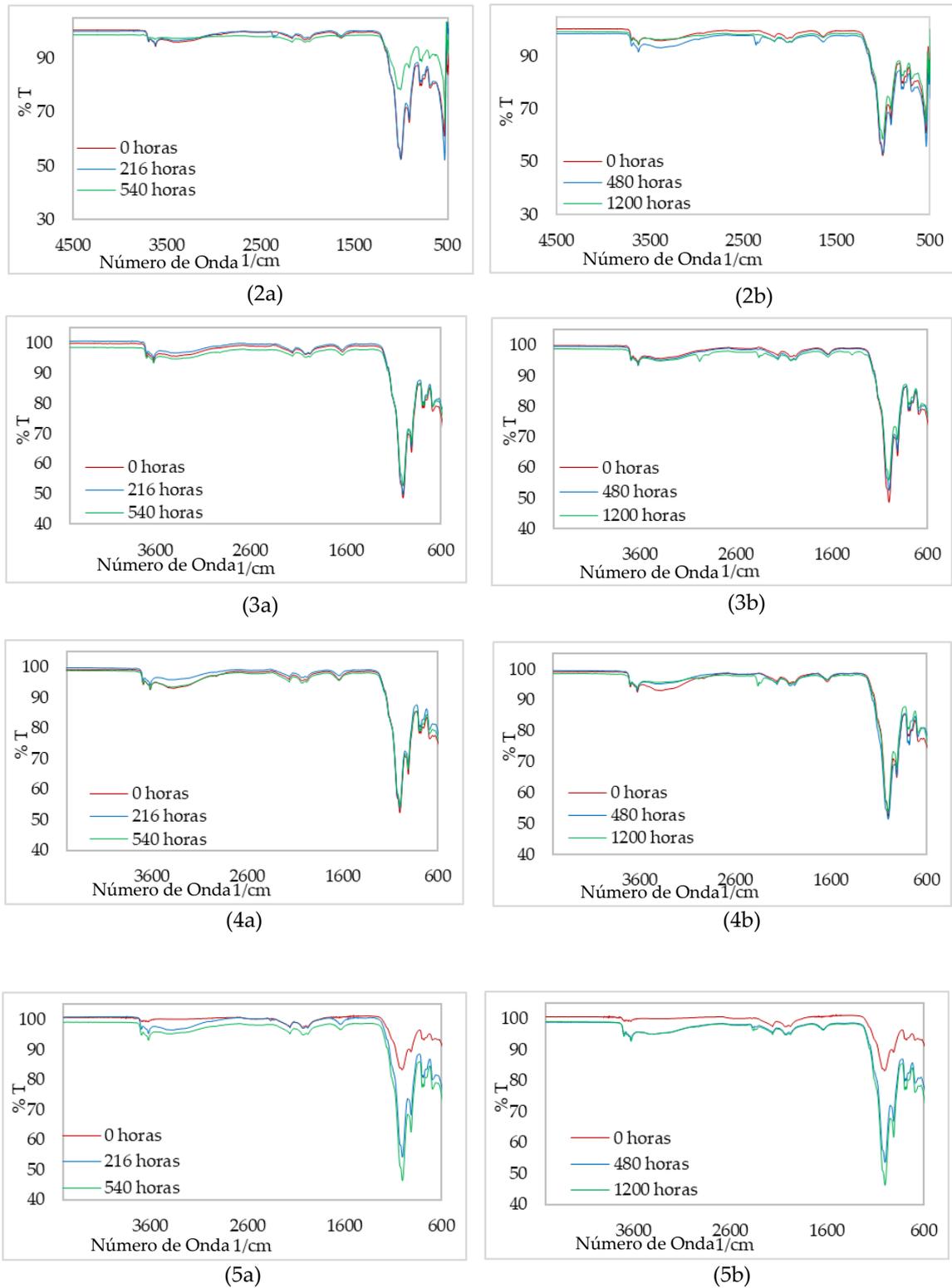
Se empleó Espectrometría Infrarroja para realizar una identificación cualitativa de la composición de los materiales aditivados con los productos químicos estabilizantes que fueron expuestos a condiciones de intemperismo natural y acelerado, con el fin evaluar si se evidenciaban cambios composicionales. Como se muestra en la Figura 3.44 los espectros infrarrojos obtenidos no reflejaron cambios composicionales en los materiales evaluados.



(1a)



(1b)



**Figura 3.44.** Espectros FTIR obtenidos para los sistemas mixtos de suelo aditivado sometidos a intemperismo acelerado (a) y natural (b). (1): suelo natural, (2): suelo-aceite sulfonado, (3): suelo-polímero, (4): Suelo-enzima, (5): suelo-organosilano.

### Análisis adicionales para los materiales expuestos a intemperismo acelerado

Los siguientes análisis fisicoquímicos y ambientales se realizaron a los materiales expuestos solo a intemperismo acelerado en cámara QUV, esto con el fin de tener una aproximación a la evolución de estas propiedades y a los mecanismos de degradación en el tiempo que presentan los materiales estudiados.

#### Capacidad de Intercambio Catiónico CIC

En la Tabla 3.31 se presentan los resultados obtenidos para la capacidad de intercambio catiónico de los materiales evaluados a diferentes tiempos de exposición a intemperismo acelerado. Como se puede observar, todos los materiales aditivados presentan un máximo a las 216 horas de intemperismo acelerado y a las 540 horas los valores de CIC disminuyen en todos los casos. Este comportamiento encontrado solo en los materiales aditivados, puede atribuirse a la liberación de cationes durante el proceso de degradación de los aditivos y es más evidente para los productos líquidos de naturaleza orgánica, para los cuales se reporta un valor similar al del suelo natural una vez completan las 540 horas de intemperismo acelerado. Para el caso de los productos cementantes: cal, cemento y zeolita/cemento, esta propiedad es más estable en el tiempo, lo que indica una mayor durabilidad ante condiciones ambientales, asociado también a la naturaleza química más estable de los productos obtenidos en las reacciones puzolánicas.

**Tabla 3.31.** Resultados de CIC para los materiales expuestos a intemperismo acelerado

Material	CIC (meq/100g suelo seco)		
	Intemperismo Acelerado en cámara QUV		
	0 h	216 h	540 h
Suelo Natural	20.88	18.79	18.43
Suelo-Aceite Sulfonado	16.52	21.05	18.83
Suelo-Polímero	17.74	23.58	18.06
Suelo-Enzima	18.32	21.80	18.04
Suelo-Organosilano	17.16	21.38	18.38
Suelo-Cal	17.73	18.06	17.30
Suelo-Cemento	22.53	26.58	22.00
Suelo-Zeolita/Cemento	25.06	23.23	21.59

### Caracterización textural de los materiales después de 540 h de intemperismo acelerado

En la Tabla 3.32 se muestran los resultados del análisis textural realizado a los materiales evaluados después de 540 horas de intemperismo acelerado. Como consecuencia del deterioro que sufren los materiales con el tiempo de exposición, se observa que todos presentan aumento del área superficial y la porosidad respecto a su valor antes de ser sometidos a intemperismo acelerado; no obstante, se observa que los materiales aditivados mantienen un valor de área superficial y de mesoporosidad por debajo del valor obtenido para el suelo natural, lo que indica que los cambios generados por los aditivos en la textura del suelo permanecen en el tiempo.

**Tabla 3.32.** Resultados de la caracterización textural para los sistemas de suelo aditivado después de 540h de intemperismo acelerado

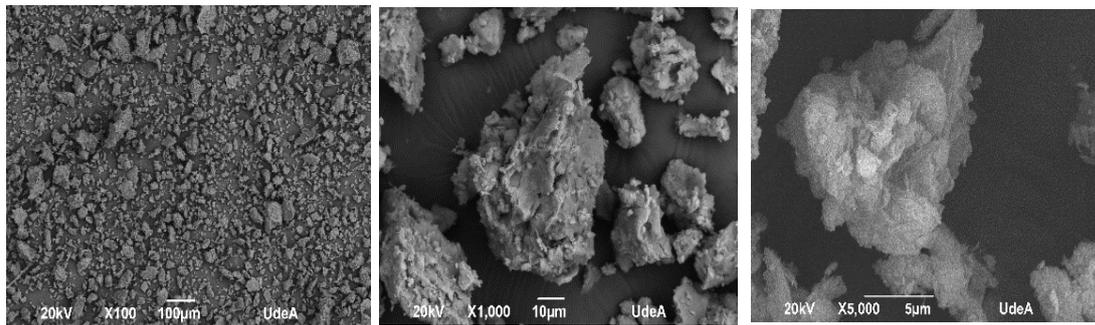
Material	S Área Superficial Específica (m <sup>2</sup> /g)	S microporos (m <sup>2</sup> /g)	S mesoporos (m <sup>2</sup> /g)	V microporos (cm <sup>3</sup> /g)	V mesoporos (cm <sup>3</sup> /g)	Tamaño de Poro (Å)
Suelo Natural	72.1	0.74	71.37	0.00009	0.1785	104.484
Suelo-Aceite Sulfonado	44.96	0.91	44.05	0.00027	0.1191	112.385
Suelo-Polímero	41.02	-	41.02	-	0.1098	105.757
Suelo-Enzima	40.96	0.67	40.29	0.00016	0.0935	97.533
Suelo-Organosilano	58.07	-	58.07	-	0.1429	98.18
Suelo-Cal	35.63	0.72	34.91	0.00021	0.1277	150.143
Suelo-Cemento	47.01	-	47.01	-	0.1278	217.401
Suelo-Zeolita/Cemento	34.88	1.69	33.19	0.00068	0.09631	123.25

### Microscopía Electrónica de Barrido, SEM

En la Figura 3.45 se muestran las imágenes obtenidas por Microscopía Electrónica de Barrido, SEM, de las muestras que fueron sometidas a 540 horas de intemperismo acelerado. Como característica morfológica inicial se observa que los materiales aditivados presentan una matriz de partículas más sólida y en algunos casos más densa que el suelo natural; sin embargo, se encuentra una reducción de tamaños respecto a las muestras antes del intemperismo acelerado especialmente en los aditivos líquidos, Figura 3.33. Esto se debe a que el proceso de envejecimiento genera una degradación de los productos químicos y por ende una pérdida de cohesión entre las partículas del suelo arcilloso.

En la Tabla 3.33 se presentan los resultados de la composición elemental obtenida con análisis EDS sobre la superficie de los materiales antes y después de ser sometidos al intemperismo acelerado. Al comparar los resultados con los obtenidos para las muestras antes del envejecimiento se encuentra una pérdida de elementos en las muestras debido a los procesos de degradación; en particular para los productos de naturaleza orgánica: aceite sulfonado, polímero, enzima y organosilano, no se detecta la presencia de carbono lo cual puede estar indicando degradación y pérdida del producto. En contraposición,

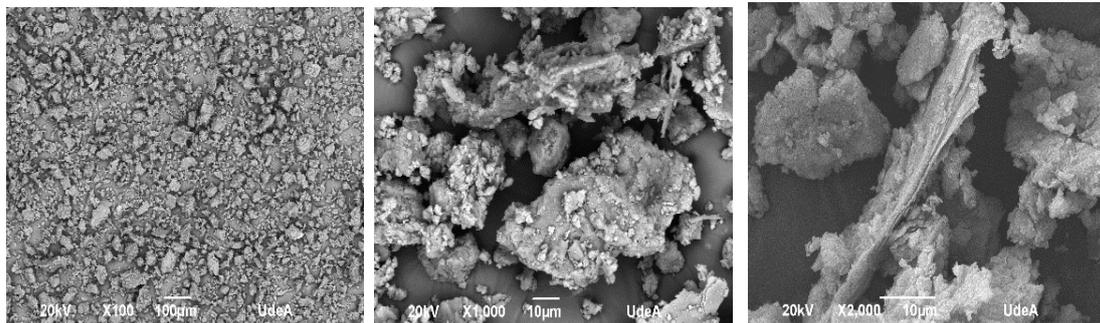
se encuentra que el material más estable respecto a su composición inicial, es el que contiene la zeolita/cemento, el cual mantiene todos los elementos iniciales.



(1a)

(1b)

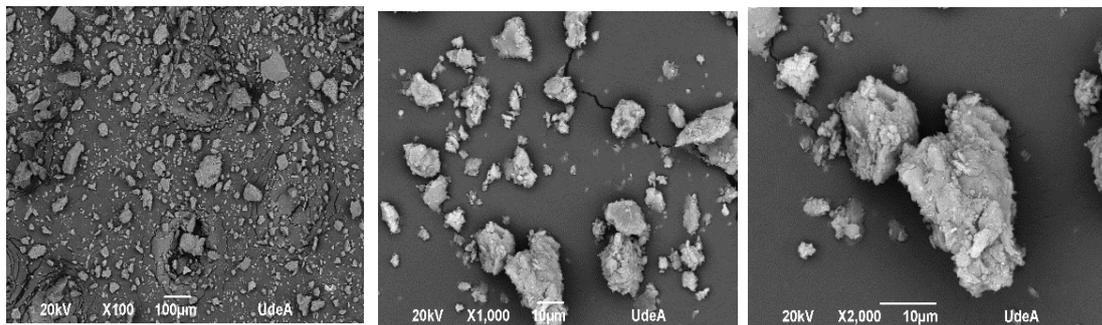
(1c)



(2a)

(2b)

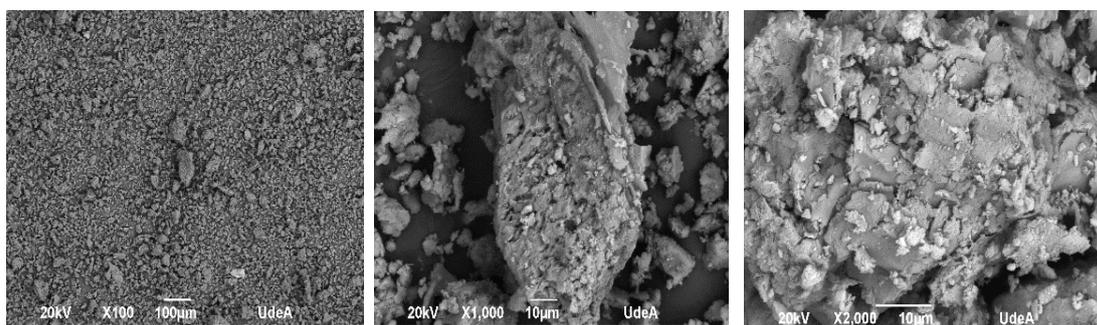
(2c)



(3a)

(3b)

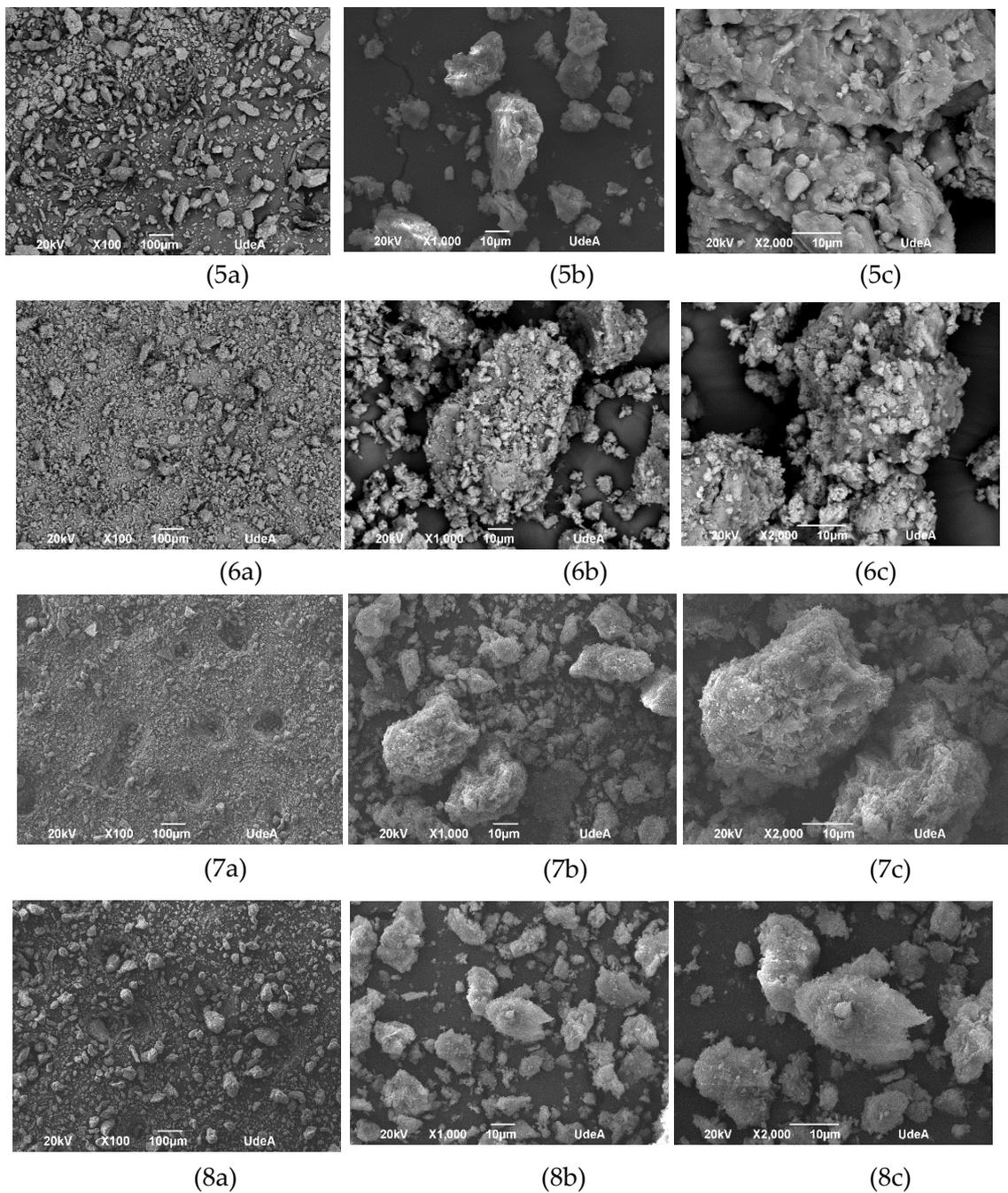
(3c)



(4a)

(4b)

(4c)



**Figura 3.45.** Imágenes SEM obtenidas para los sistemas de suelo aditivado sometidos a 540 h de intemperismo acelerado. 1: suelo natural, 2: suelo-aceite sulfonado, 3: suelo-polímero, 4: Suelo-enzima, 5: suelo-organosilano, 6: suelo-cal, 7: suelo-cemento, 8: suelo-zeolita/cemento

**Tabla 3.33.** Resultados análisis EDS sobre la superficie de los materiales evaluados antes y después de ser sometido al intemperismo acelerado

Resultados análisis EDS antes del intemperismo acelerado								
Elemento	% Peso							
	Suelo Natural	Suelo-Aceite Sulfonado	Suelo-Polímero	Suelo-Enzima	Suelo-Organosilano	Suelo-Cal	Suelo-Cemento	Suelo-Zeolita/Cemento
C	-	10.78	0.77	10.54	11.42	5.81		
O	46.04	42.56	52.27	46.6	38.88	41.76	47.63	52.13
Na	-	-	-	-	-	-	-	0.19
Mg	0.63	0.53	0.71	0.46	0.38	0.3	-	0.81
Al	13.35	9.86	11.82	10.59	12.84	12.33	10.72	7.75
Si	21.31	26.87	29.31	26.16	28.74	23.92	29.26	17.6
S	-	-	-	-	-	-	-	0.7
Cl	-	-	-	-	-	-	-	0.14
K	3.2	0.61	0.64	0.47	0.77	0.31	0.73	0.38
Ca	-	-	0.19	-	-	7.27	5.05	16.02
Ti	-	0.53	0.65	0.35	0.55	0.32	-	0.57
Fe	15.47	8.26	3.64	4.84	6.43	7.97	6.6	3.71
Resultados análisis EDS después de 540 h de intemperismo acelerado								
Elemento	% Peso							
	Suelo natural	Suelo-Aceite Sulfonado	Suelo-Polímero	Suelo-Enzima	Suelo-Organosilano	Suelo-Cal	Suelo-Cemento	Suelo-Zeolita/Cemento
C	-	-	-	-	-	-	14.89	-
O	36.37	38.42	38.36	46.22	38.58	43.83	44.65	53.45
Na	-	-	-	-	-	-	-	0.26
Mg	0.73	0.9	0.86	0.47	-	-	-	0.75
Al	11.1	15.95	11.82	12.02	16.40	10.1	8.46	10.1
Si	30	34.3	35.11	30.01	34.48	20.83	22.28	24.76
S	-	-	-	-	-	-	-	0.11
Cl	-	-	-	-	-	-	-	0.12
K	-	-	1.13	6.55	1.33	-	0.85	0.73
Ca	-	-	-	-	-	16.94	1.82	2.52
Ti	-	-	2.02	-	-	-	1.79	2.15
Fe	21.79	10.43	10.7	4.73	9.22	8.31	5.26	5.04

### Ensayos de Lixiviación

A los lixiviados obtenidos después de someter los materiales estudiados a un proceso de extracción sólido-líquido empleando una cámara de lixiviación, se le realizaron mediciones de pH, Carbono Orgánico Total COT y determinación de la biodegradabilidad mediante la relación entre la Demanda Química de Oxígeno DQO, Demanda Biológica de Oxígeno DBO<sub>5</sub>.

○ pH

Como se muestra en la Tabla 3.34, en el caso de los productos líquidos el pH de los materiales aditivados presentó una leve disminución a lo largo del tiempo de exposición a intemperismo acelerado hasta alcanzar un valor relativamente cercano al del suelo sin aditivar. Por su parte, las muestras aditivadas con cemento, cal y zeolita/cemento presentaron características básicas en todos los tiempos de exposición, atribuible al contenido en óxido de calcio que presentan estos productos, lo cual genera altos valores de pH.

**Tabla 3.34.** Resultados de pH del lixiviado de los materiales expuestos intemperismo acelerado

MATERIAL	pH		
	Intemperismo Acelerado en cámara QUV		
	0 h	216 h	540 h
Suelo Natural	5.305	5.4	5.235
Suelo-Aceite Sulfonado	6.95	4.685	4.43
Suelo-Polímero	5.645	4.935	4.94
Suelo-Enzima	5.51	5.78	5.17
Suelo-Organosilano	5.345	5	4.71
Suelo-Cal	12.06	11.39	12.095
Suelo-Cemento	11.135	11.53	11.365
Suelo-Zeolita/Cemento	11.74	11.36	11.295

○ Carbono Orgánico Total COT

Los resultados obtenidos para el carbono orgánico total de los materiales aditivados, Tabla 3.35, muestran una relación directamente proporcional entre los tiempos de exposición a intemperismo acelerado de los materiales y la concentración de COT en los lixiviados. Este aumento del COT está relacionado directamente con la materia orgánica natural presente en el suelo la cual puede lixiviarse más fácil en los materiales envejecidos.

De otro lado, los resultados obtenidos para el COT de todos los materiales en los tiempos de exposición a intemperismo acelerado evaluados, son bajos; para el agua potable el valor de este parámetro está entre 0.1 y 25 mg / L (American Public Health Association, Water Environment Federation, 2017), es decir que todos los resultados obtenidos se encuentran en el rango admitido para agua potable.

**Tabla 3.35.** Resultados de COT del lixiviado de los materiales expuestos intemperismo acelerado

MATERIAL	COT (ppm)		
	Intemperismo Acelerado en cámara QUV		
	0 h	216 h	540 h
Suelo Natural	7.149	13.805	16.304
Suelo-Aceite Sulfonado	7.816	16.899	15.431
Suelo-Polímero	10.694	19.799	20.146
Suelo-Enzima	8.612	17.818	19.629
Suelo-Organosilano	6.510	15.054	15.315
Suelo-Cal	7.110	21.326	18.435
Suelo-Cemento	22.581	11.741	18.005
Suelo-Zeolita/Cemento	11.570	18.911	19.351

o Biodegradabilidad

La Tabla 3.36 se presenta las relaciones obtenidas entre la DBO<sub>5</sub> y la DQO, como una medida de la biodegradabilidad de los lixiviados derivados de los materiales evaluados sometidos a intemperismo acelerado. Los resultados evidencian que antes del envejecimiento los materiales aditivados con los productos líquidos presentan lixiviados con características biodegradables o moderadamente biodegradables; sin embargo, al igual que el suelo natural, el polímero y el organosilano presentan lixiviados no biodegradables después de 540 horas de exposición a intemperismo acelerado, todo lo cual puede deberse a la degradación de los materiales, en sus fracciones biodegradables, por efecto del intemperismo acelerado.

Los lixiviados de los materiales con productos puzolánicos presentan características no biodegradables en todos los tiempos de evaluación, todo lo cual resulta ser deseable en términos de durabilidad dado que son materiales estables ante la presencia de agentes biológicos.

**Tabla 3.36.** Resultados de biodegradabilidad del lixiviado de los materiales expuestos intemperismo acelerado

MATERIAL	BIODEGRADABILIDAD, relación DBO <sub>5</sub> /DQO					
	Intemperismo Acelerado en cámara QUV					
	0 h		216 h		540 h	
Suelo Natural	0.253	Moderadamente Biodegradable	0.201	Moderadamente Biodegradable	0.160	No Biodegradable
Suelo-Aceite Sulfonado	0.491	Biodegradable	0.242	Moderadamente Biodegradable	0.280	Moderadamente Biodegradable
Suelo-Polímero	0.250	Moderadamente Biodegradable	0.225	Moderadamente Biodegradable	0.173	No Biodegradable
Suelo-Enzima	0.234	Moderadamente Biodegradable	0.426	Biodegradable	0.476	Biodegradable
Suelo-Organosilano	0.438	Biodegradable	0.126	No Biodegradable	0.187	No Biodegradable
Suelo-Cal	0.037	No Biodegradable	0.037	No Biodegradable	0.00004	No Biodegradable
Suelo-Cemento	0.051	No Biodegradable	0.032	No Biodegradable	0.005	No Biodegradable
Suelo-Zeolita/Cemento	0.062	No Biodegradable	0.027	No Biodegradable	0.012	No Biodegradable

Resumen de los análisis de resultados obtenidos en la caracterización de los materiales expuestos a condiciones de intemperismo acelerado

En la Figura 3.46 se muestra de manera esquemática un resumen de los análisis de resultados obtenidos en la caracterización de los materiales expuestos a condiciones de intemperismo acelerado.

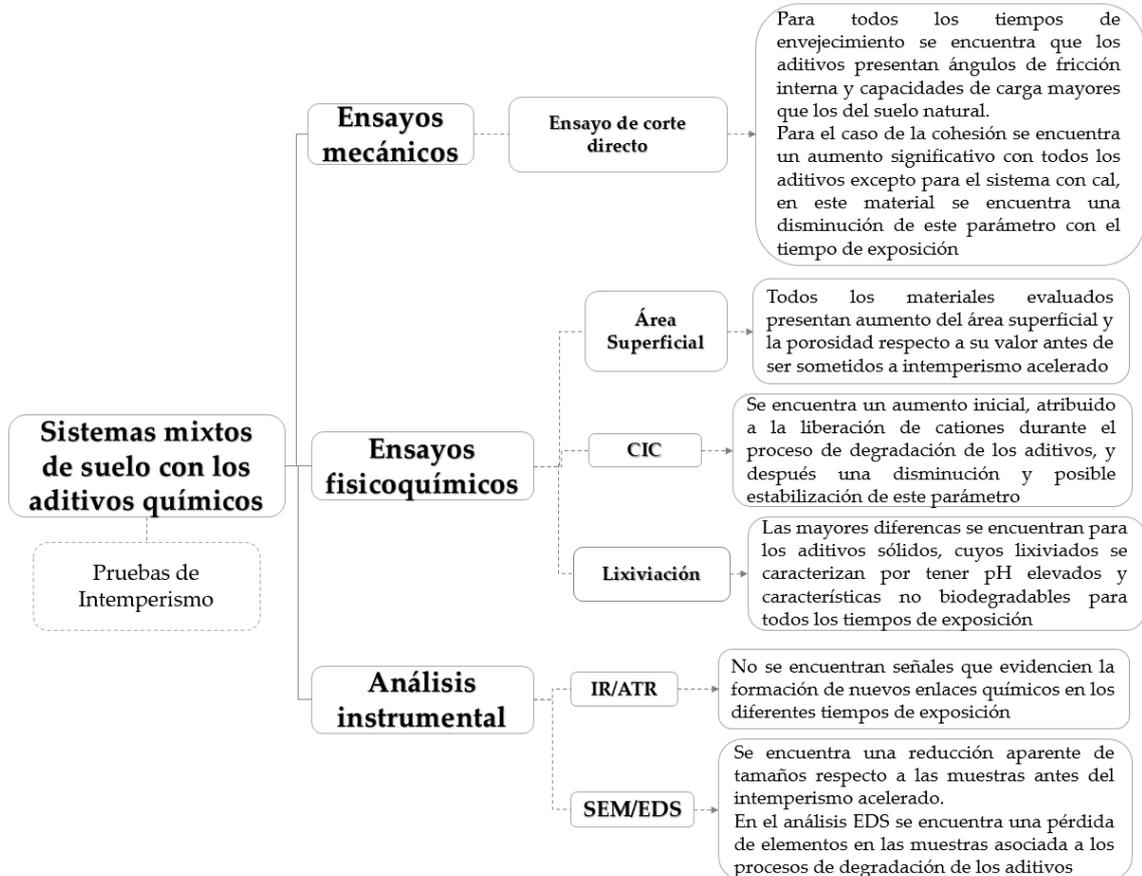


Figura 3.46. Resumen de los resultados obtenidos en la caracterización de los materiales expuestos a condiciones de intemperismo

## 4. CAPÍTULO IV: prueba complementaria. Construcción de tramos piloto

### 4.1. Introducción

La estabilización fisicoquímica de vías no pavimentadas se ha presentado como una solución atractiva a la problemática del mal estado y al constante deterioro de la red vial rural. Estas vías que no cuentan con un trazado definido, requerimientos geométricos, materiales bajo norma ni sistemas de drenaje apropiados, presentan patologías y deterioros acelerados, por lo que es necesario desarrollar, validar e implementar tecnologías alternativas que ofrezcan una mayor estabilidad en el tiempo, aprovechamiento de los materiales in situ y que sean más amigables con el ambiente. En este contexto, el Ministerio de Transporte como cabeza del sector en Colombia lidera el desarrollo de proyectos piloto que contemplen la evaluación de tecnologías alternativas y la construcción de pistas de prueba a escala real (Restrepo et al., 2017).

En consonancia con lo anterior, uno de los proyectos desarrollados fue el Proyecto Piloto Valencia que se concibió como una estrategia de articulación interinstitucional para la intervención de vías terciarias, con el objeto de «AUNAR ESFUERZOS ENTRE LAS PARTES PARA EL DESARROLLO DE UNA PRUEBA PILOTO PARA EVALUAR NUEVAS TECNOLOGÍAS Y MATERIALES ALTERNATIVOS EN EL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA, PARA EL MEJORAMIENTO DE VÍAS DE BAJOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO EN EL PAÍS». El alcance del proyecto contempló objetivos como: i) realizar estudios en tramos piloto para identificar, estructurar, validar y regular materiales y tecnologías alternativas para estabilización de suelos y aumento de la calidad de la superficie de rodadura de las vías que sean técnica, económica y ambientalmente factibles, ii) estandarizar protocolos de aplicación de materiales y tecnologías alternativas estableciendo rendimientos, costos, empleo de materiales disponibles, durabilidad y estrategias de participación directa de la comunidad en los procesos constructivos y de mantenimiento. Además del impacto social, la experiencia con las comunidades de capacitación y transferencia tecnológica, se contempló la formulación de una propuesta de normatividad técnica para métodos constructivos, materiales y tecnologías alternativas para las intervenciones en las vías terciarias.

En el marco del Proyecto Piloto Valencia fue posible evaluar a escala real dos de los aditivos químicos estudiados en este trabajo: el producto enzimático y el producto puzolánico zeolítico —mezcla de zeolita/cemento—, mediante la construcción de tramos de prueba de un kilómetro de longitud por cada producto, ubicados en una vía terciaria del municipio de Valencia en el departamento de Córdoba, Colombia, de donde

también provino el suelo utilizado en todo el estudio. La intervención incluyó trabajos de preconstrucción, procesos constructivos, etapa de curado y seguimientos posteriores para monitorear el desempeño de las tecnologías aplicadas.

## 4.2 Desarrollo metodológico

La concepción del Plan Piloto Valencia está basada en la cooperación y en una apuesta por el desarrollo de las vías terciarias del país mediante la implementación de soluciones alternativas innovadoras; se pretende construir infraestructura para potencializar el desarrollo de las regiones en el mediano plazo, generando conectividad e integración social. En este sentido, la estrategia para su ejecución incluyó los siguientes aspectos:

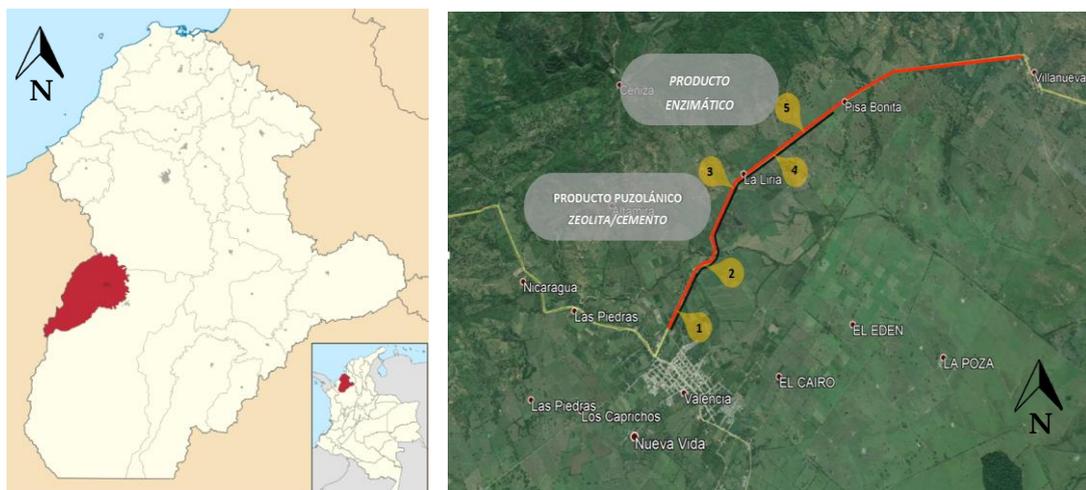
- Sondeos y toma de muestras
- Actividades de reconocimiento de las zonas intervenidas
- Socialización, capacitación y difusión a comunidades acerca del proyecto
- Levantamiento de actas de vecindad
- Actividades de preconstrucción y acondicionamiento de la vía
- Clasificación y caracterización fisicoquímica de suelos
- Evaluación fisicoquímica y mecánica de los sistemas de suelo con aditivos en laboratorio
- Definición de estrategias del proceso constructivo de estabilización
- Construcción de los tramos de prueba
- Pruebas de campo antes y después de la aplicación del producto
- Actividades de postconstrucción: curado y cierre de actas de vecindad
- Seguimiento y monitoreo del producto y/o tecnología aplicada

### 4.2.1. Ubicación de los tramos, sondeos y toma de muestra

Los tramos de prueba se encuentran ubicados en Valencia municipio colombiano localizado en el departamento de Córdoba Figura 4.1. El municipio se ubica sobre la margen izquierda del río Sinú, a 90 km. por carretera al sur de Montería —capital del departamento—. Según información del Departamento Nacional de Estadística DANE del año 2018 el municipio cuenta con cerca de 35.694 habitantes de los cuales el 53 % comprende población rural (Departamento Nacional de Planeación, 2018). Esta región está localizada sobre un piso térmico cálido a una altura promedio de 60 m.s.n.m, con una temperatura promedio de 30°C, un promedio anual de precipitaciones entre 1500 y 2000 mm con lluvias constantes entre los meses de mayo y octubre (Ideam, 2011), características de un clima cálido semi-húmedo influenciado por los vientos Alisios del Norte, con una topografía variada que se desenvuelve entre la Serranía de Abibe y el

Valle del Sinú. Los tramos fueron construidos sobre el corredor vial Valencia Villanueva, norte del área urbana del municipio de Valencia; en este sector tienen asentamiento comunidades campesinas dedicadas a la ganadería y al cultivo de papaya.

El corredor vial Valencia Villanueva es de uso continuo de vehículos de carga pesada para el transporte principalmente de productos agrícolas. En el marco del Proyecto Piloto Valencia se realizó un conteo de tránsito y se encontró un TPD de 30 vehículos/día, de los cuales cerca del 60% corresponden a camiones grandes, circunstancia que genera un deterioro constante de la condición de esta vía así como emisión de material particulado que afecta las condiciones ambientales y la salud de las comunidades. En la Figura 4.2 se muestra el estado inicial del corredor vial antes de la intervención realizada. Las ubicaciones de los tramos de prueba a lo largo del corredor vial en estudio son: el producto puzolánico –zeolita/cemento– se ubicó entre las abscisas Km 2+000 al Km 3+000 y el producto enzimático en las abscisas Km 4+000 al Km 5+000, tal como se esquematiza en la Figura 4.1.



**Figura 4.1.** Ubicación municipio de Valencia y tramos intervenidos con los productos estabilizantes (fuente Google Earth)



Figura 4.2. Estado inicial del corredor vial Valencia-Villanueva

Durante la etapa de exploración se realizaron sondeos para la identificación de suelos y toma de muestra a lo largo de los tramos seleccionados. La toma de muestras se realizó con apiques de 1 m<sup>3</sup> cada 250 m intercalados entre los dos carriles de las vías, tal como se muestra en el esquema de la Figura 4.3.

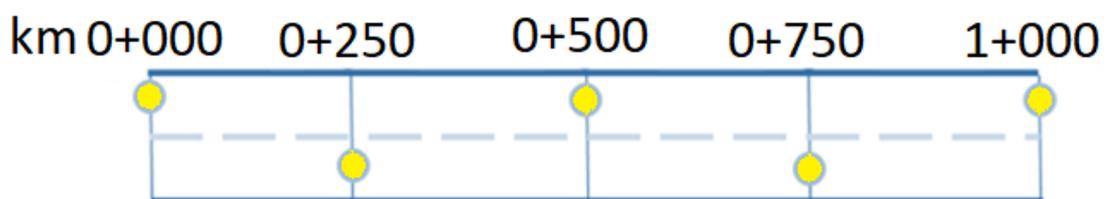


Figura 4.3. Esquema toma de muestras: Arreglo Triangular —apiques cada 250 m—. Etapa Exploratoria

Esta metodología de muestreo, junto con los diversos ensayos de laboratorio, permitió identificar la tipología de los suelos existentes, y hacer una descripción detallada de los estratos, rocas y condiciones de los niveles freáticos presentes.

#### 4.2.2. Caracterización fisicoquímica y clasificación de suelos

De cada uno de los apiques realizados se tomaron muestras de aproximadamente 80 kg a una profundidad en un rango entre de 0–40 cm, con el fin de caracterizar los materiales que posteriormente fueron sometidos al proceso de aditivación con

los productos estabilizantes; estas muestras fueron debidamente empacadas y rotuladas. La caracterización y clasificación de los suelos muestreados se realizó en laboratorio mediante los siguientes ensayos:

- Clasificación de suelos según las normas AASTHO y USCS
- Gravedad específica
- Contenido de humedad natural
- Contenido de materia orgánica
- Contenido de sulfatos
- pH y conductividad
- CBR en apiques intermedios a 1.2 m de profundidad

#### **4.2.3. Evaluación fisicoquímica y mecánica de los sistemas estabilizante-suelo en laboratorio**

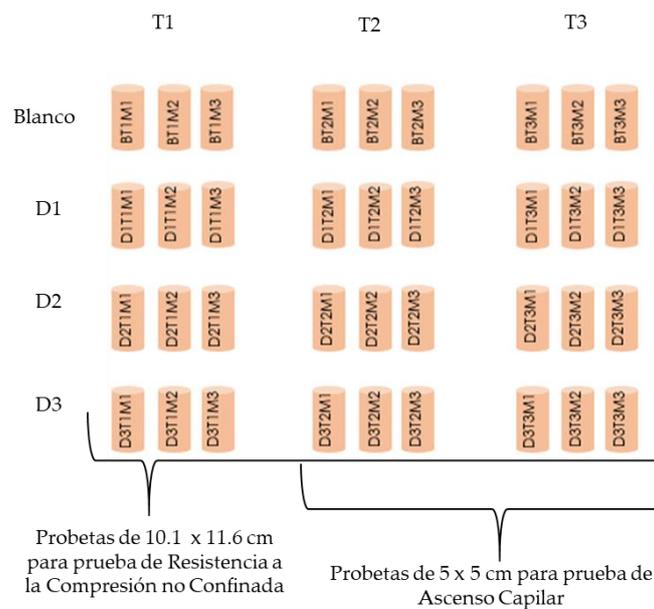
En esta etapa se evaluó el desempeño en laboratorio de los aditivos químicos como estabilizantes del suelo correspondiente al tramo seleccionado. Para cada uno se realizaron ensayos de tres dosificaciones y a tres tiempos de curado, incluidos los suelos sin aditivo o blancos del proceso, a través de las siguientes pruebas:

- Resistencia a la compresión simple: basada en la norma ASTM D2166 «Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil» (ASTM D2166, 2016)
- Límites de Atterberg: basada en la Norma ASTM D4318 «Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity index of soils» (ASTM D4318, 2005)
- Velocidad de ascenso capilar y tiempo de saturación: de acuerdo con el protocolo desarrollado en el grupo de investigación

De acuerdo con las dosificaciones establecidas, mostradas en la Tabla 4.1, los productos químicos fueron incorporados al suelo con la cantidad de agua necesaria para alcanzar la humedad óptima; una vez homogeneizado el suelo se procedió a fabricar las probetas a la densidad máxima y a la humedad óptima determinadas en el ensayo Proctor, de acuerdo con las dimensiones requeridas para cada ensayo, tal como se ilustra en la Figura 4.4. Las pruebas de resistencia a la compresión no confinada y ascenso capilar se realizaron por triplicado en todos los puntos del diseño experimental, los límites de consistencia se evaluaron solo para el tiempo de curado de 7 días.

**Tabla 4.1.** Dosificaciones establecidas para la evaluación de los productos en laboratorio

	<b>Enzima</b> Dosis: litro de aditivo puro/ m <sup>3</sup> suelo seco a densidad máxima	<b>Zeolita / Cemento</b> Dosis: Kg aditivo / m <sup>3</sup> suelo seco a densidad máxima
<b>Dosificación 1 D1</b>	0.023	1.8 / 170
<b>Dosificación 2 D2</b>	0.033	1.8 / 180
<b>Dosificación 3 D3</b>	0.043	1.7 / 170



**Figura 4.4.** Esquema para la elaboración de probetas aditivadas y del blanco del proceso

#### 4.2.4. Construcción de los tramos de prueba

La durabilidad de la estabilización depende de un buen proceso constructivo y de la calidad del material estabilizado, por ello el proceso constructivo se llevó a cabo teniendo en cuenta observaciones y recomendaciones de trabajos previos, tales como: el uso de un kit de maquinaria básico, el retiro de sobretamaños mayores a 2" y un espesor de estabilización entre 15 y 25 cm (Orobio, 2011), (Gobernación de Antioquia, 2015). A continuación se describen las etapas que constituyeron el proceso constructivo de los tramos de prueba.

1. Acondicionamiento de la vía: se realizó con el fin de tener los tramos objeto de estudio en las condiciones de limpieza adecuadas, incluyó las siguientes actividades:
  - Rocería en los laterales de la vía
  - Retiro del material vegetal presente en los laterales del trazado de la vía
  - Limpieza de las obras de arte existentes

2. Escarificación del terreno: se realizó con el fin de mejorar la penetración del producto y su absorción en el suelo, esta etapa comprendió las siguientes actividades:
  - Desaglomeración del suelo presente en el tramo a intervenir en un espesor entre 15 - 25 cm, usando una motoniveladora
  - Separación y retiro de sobretamaños — gravas mayores a dos pulgadas —
3. Aplicación del producto: las actividades de esta etapa variaron de acuerdo con la naturaleza del producto, siempre garantizando una distribución homogénea en el área intervenida.
  - El producto líquido enzimático se diluyó en un isotanque, acoplado a una camioneta, con la cantidad de agua necesaria para alcanzar la humedad óptima y se esparció por medio de una flauta, manteniendo una velocidad constante e iniciando desde los laterales de la vía, hasta distribuir el producto totalmente en el área que será estabilizada
  - El producto puzolánico zeolita/cemento —sólidos— primero se distribuyó manualmente el producto zeolítico sobre toda el área intervenida y se homogeneizó, después se dosificó la cantidad de cemento requerida, distribuyendo homogéneamente los bultos de cemento sobre toda el área, en este caso se hizo necesario controlar el material particulado mediante la prehumectación rápida de los productos ya distribuidos en la vía.
4. Mezclado y ajuste de humedad óptima: en esta etapa se garantizó la homogeneización y regularidad en el volumen del material suelo/aditivo, considerando los siguientes aspectos:
  - En la aplicación del producto puzolánico se usó un tractor agrícola para agilizar el proceso de mezclado y evitar el fraguado del material durante el proceso de construcción
  - Durante esta etapa se realizaron mediciones continuas del contenido de humedad y realizaron los riegos de agua necesaria para alcanzar la humedad óptima. Las mediciones del contenido de humedad se realizaron con humidómetro Speedy de acuerdo con la norma ASTM D4944 «Standard Test Method for Field Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Calcium Carbide Gas Pressure Tester» (ASTM D4944, 2018)
5. Compactación: en esta etapa se garantizó la densidad máxima del material tratado, considerando los siguientes aspectos:
  - Se usó un vibrocompactador de 9 toneladas para llegar a la compactación requerida. Se aclara que para el caso de suelos arcillosos el compactador más

adecuado sería el rodillo pata de cabra, el cual genera una compactación por presión y amasado, por su parte el compactador de rodillo vibratorio liso, como el utilizado en la prueba piloto, es especialmente indicado para suelos granulares y arenosos, o para suelos que tengan un pequeño porcentaje de finos arcillosos; sin embargo, el uso de la maquinaria en la prueba piloto estuvo limitada a la disponibilidad de equipos de los gobiernos locales en las zonas aplicación.

- Durante esta etapa se realizaron mediciones continuas de densidad hasta alcanzar la densidad máxima encontrada en el ensayo Proctor. Las mediciones de densidad se realizaron con cono de arena de acuerdo con la norma ASTM D1556 «Density and Unit Weight of Soil in Place by Sand-Cone Method» (ASTM D1556, 2015)
6. Curado: la etapa de curado consistió en realizar riegos frecuentes de agua durante 4 días, en este tiempo la vía se mantuvo abierta al tránsito.

#### 4.2.5. Seguimiento y monitoreo de los productos aplicados

Con el fin de evaluar el desempeño y durabilidad de los productos aplicados se realizaron los siguientes ensayos:

- Densidad y peso unitario del suelo en el terreno: de acuerdo con la norma ASTM D1556 «Density and Unit Weight of Soil in Place by Sand-Cone Method» (ASTM D1556, 2015)
- Módulo dinámico con Deflectómetro de Peso Liviano LWD: basado en la norma ASTM E 2835 «Standard Test Method for Measuring Deflections using a Portable Impulse Plate Load Test Device» (ASTM E2835, 2015)
- Índice de condición para vías no pavimentadas URCI: Realizado de acuerdo con la metodología desarrollada por la fuerzas armadas de Estados Unidos, descrita en el manual técnico TM 5-626 «Technical Manual Unsurfaced Road Maintenance Management» (Eaton & Beaucham, 1992).

Esta metodología evalúa la condición de la vía mediante una inspección visual y arroja una valoración cuantitativa del deterioro de la vía, su escala de medición va de 0 a 100, siendo 100 el valor que se le daría a una vía que se encuentra en excelentes condiciones. La evaluación URCI contempla siete parámetros o patologías, estos se cuantifican mediante una inspección visual en el tramo de interés; los parámetros evaluados son: sección transversal

inapropiada, drenaje lateral inadecuado, corrugaciones, polvo, baches, ahuellamiento y agregado Suelto (Llano et al., 2017).

Estos ensayos se realizaron en los tramos antes de la intervención y en tres seguimientos posteriores a la aplicación de los productos estabilizantes: 28 días, 4 meses y 8 meses.

### 4.3 Resultados

#### 4.3.1. Resultados de los sondeos y la descripción visual/manual

Los perfiles estratigráficos obtenidos de la caracterización del suelo in situ mediante la prueba de descripción visual/manual de cada uno de los apiques realizados en el tramo de prueba del producto puzolánico y enzimático se muestran en la Tabla 4.2 y Tabla 4.3 respectivamente.

**Tabla 4.2.** Perfil estratigráfico de los suelos presentes en los apiques realizados en el tramo donde se aplicó la zeolita/cemento

Perfil estratigráfico de los sondeos para el tramo donde se aplicó la zeolita			
Apique	Longitud del estrato (m)	Descripción visual/manual	Registro fotográfico
Apique 1	0.00 – 0.30	Arcilla de consistencia dura color pardo oscuro	
	0.30– 1.00	Arcilla de consistencia dura color café oscuro con betas vinotinto y grises	
Apique 2	0.00 – 0.50	Limo Arcilloso color pardo amarillo	
	0.50 – 1.0	Arcilla de consistencia dura color pardo oscuro	

Apique 3	0.0 – 0.15	Limo Arcilloso color pardo amarillo con grava —tamaño máximo 1 pulgada—	
	0.15 – 0.23	Arena limosa color gris con betas rojas	
	0.23-0.32	Arcilla color pardo claro de consistencia dura	
	0.32 – 1.00	Arcilla color pardo rojizo de consistencia dura	
Apique 4	0.0 – 0.13	Arena gruesa color pardo claro con grava —tamaño máximo 1 pulgada—	
	0.13-0.22	Limo arcilloso color pardo amarillo de consistencia dura	
	0.22-0.30	Arena fina color pardo amarillo con betas blancas	
	0.30-0.34	Arena fina pardo rojizo	
	0.34-0.36	Arena fina pardo amarillo	
	0.36-0.38	Arena fina pardo rojizo (limosa)	
	0.38-0.44	Arcilla dura pardo	
	0.44-0.65	Arcilla dura café	
0.65-1.00	Arcilla dura pardo amarillo		

Tabla 4.3. Perfil estratigráfico de los suelos presentes en los apiques realizados en el tramo donde se aplicó la enzima

Perfil estratigráfico de los sondeos para el tramo donde se aplicó la enzima			
Apique	Longitud del estrato (m)	Descripción visual/manual	Registro fotográfico
Apique 1	0.00 – 0.09	Limo arcilloso color pardo	
	0.09 – 0.18	Arena fina color gris con betas blancas	
	0.18 – 0.38	Limo arcilloso color pardo claro con presencia de grava —tamaño máximo 3 pulgada—	
	0.38 – 1.00	Arcilla de consistencia dura color pardo rojizo con betas color gris	

Apique 2	0.00 – 0.22	Limo arcilloso color pardo amarillo con grava —tamaño máximo 1/2 pulgada—	
	0.22 - 0.56	Arcilla de consistencia dura color pardo claro con betas rojizas	
	0.56 - 0.64	Arcilla de consistencia dura color café	
	0.64 - 1.00	Arcilla color pardo rojizo de consistencia dura	
Apique 3	0.00 – 0.14	Limo arcilloso color pardo claro con grava —tamaño máximo 3 pulgadas—	
	0.14 – 0.54	Arcilla de consistencia dura color pardo rojizo	
	0.54 -1.00	Arcilla de consistencia dura color pardo amarillo	
Apique 4	0.00 – 0.27	Limo arcilloso color pardo amarillo con grava	
	0.27- 1.00	Arcilla color pardo rojizo consistencia dura con betas color pardo	

#### 4.3.2. Resultados de la caracterización fisicoquímica y clasificación de suelos

Los resultados de la clasificación y caracterización fisicoquímica en laboratorio de los suelos presentes en los tramos que fueron intervenidos con la zeolita y con la enzima se muestran en la Tabla 4.4 y la Tabla 4.5 respectivamente.

**Tabla 4.4.** Resultados de los análisis de suelos presentes en un rango entre 0 y 40 cm de profundidad en los apiques correspondientes al tramo seleccionado para aplicar la zeolita/cemento

Parámetro	Unidades	Resultados de suelos presentes entre 0 y 40 cm de profundidad/Apiques del tramo seleccionado para aplicar la zeolita/cemento			
		Apique 1	Apique 2	Apique 3	Apique 4
Humedad natural	%	15.9	13.0	5.6	5.0
Clasificación SUCS	—	CL	CL	SC-SM	SM
Descripción	—	Arcilla magra color pardo oscuro	Arcilla magra con arena color pardo-amarillo	Arena arcillo-limosa color pardo-amarillo con vetas rojizas	Arena limosa con gravas color pardo claro
Clasificación AASTHO	—	A-7-6 (16)	A-7-6 (17)	A-4 (0)	A-1-b (0)
Pasa No. 4	%	96	100	86	68
Pasa No. 40	%	94	97	63	37
Pasa No. 200	%	89	82	37	12
Límite Líquido LL	—	47	47	24	No se puede determinar
Límite Plástico LP	—	21	19	19	---
Índice de Plasticidad IP	—	26	28	5	NP
Gravedad específica finos	—	2.708	2.677	2.654	2.656
Gravedad específica gruesos	—	—	—	2.583	2.583
Gravedad específica combinada	—	—	—	2.643	2.632
Absorción del agregado grueso	—	—	—	1.40	1.40
Materia orgánica por ignición	%	4.37	2.37	1.33	0.82
Contenido de sulfatos	mg SO <sub>4</sub> /g de suelo	0.3657	0.4600	0.6429	0.4114
pH	—	7.6	7.5	8.1	8.8
Conductividad	μS/cm	409	139.8	295.0	80.5
CBR inalterado antes de inmersión	%	—	6.3	—	2.8

CBR inalterado después de inmersión	%	—	0.5	—	1.7
Expansión	%	—	3.36	—	0.40
Absorción	%	—	10.2	—	11.2

**Tabla 4.5.** Resultados de los análisis de suelos presentes en un rango entre 0 y 40 cm de profundidad en los apiques correspondientes al tramo seleccionado para aplicar la enzima

Parámetro	Unidades	Resultados de suelos presentes entre 0 y 40 cm de profundidad /Apiques del tramo seleccionado para aplicar la enzima			
		Apique 1	Apique 2	Apique 3	Apique 4
Humedad natural	%	4.6	13.8	12.3	6.9
Clasificación SUCS	—	SC	CL	CH	SC
Descripción	—	Arena arcillosa con gravas color pardo grisáceo	Arcilla magra con arena color pardo-amarillo	Arcilla magra con arena color pardo rojizo claro	Arena arcillosa con gravas color pardo-amarillo
Clasificación AASTHO	—	A-2-4 (0)	A-7-6 (16)	A-7-6 (19)	A-2-4 (0)
Pasa No. 4	%	78	99	98	69
Pasa No. 40	%	44	95	93	47
Pasa No. 200	%	25	84	81	26
Límite Líquido LL	—	28	46	57	24
Límite Plástico LP	—	16	19	29	17
Índice de Plasticidad IP	—	12	27	28	7
Gravedad específica finos	—	2.659	2.720	2.726	2.646
Gravedad específica gruesos	—	2.618	N/A	N/A	2.618
Gravedad específica combinada	—	2.650	N/A	N/A	2.637
Absorción del agregado grueso	—	1.60	N/A	N/A	1.60
Materia orgánica por ignición	%	1.09	3.32	2.88	1.87
Contenido de sulfatos	mg SO <sub>4</sub> /g de suelo	1.7712	0.5587	0.4899	1.1912
pH	—	8.7	8.3	8.3	6.9
Conductividad	μS/cm	492.0	115.0	130.4	635.0

CBR inalterado antes de inmersión	%	—	12.5	—	6.0
CBR inalterado después de inmersión	%	—	4.7	—	0.5
Expansión	%	—	0.46	—	1.96
Absorción	%	—	9.0	—	14.8

○ Suelos homogéneos

Las características organolépticas y las propiedades físicas y mecánicas de los suelos descritos en los perfiles en campo y la clasificación individual por apiques realizada en laboratorio, permitieron, debido a su similitud y compatibilidad, realizar una agrupación de las muestras correspondientes a los apiques de cada tramo, facilitando de esta manera el manejo de la información, definición de parámetros de diseño y toma de decisiones de tipo ingenieril al simular en el laboratorio el proceso de mezclado que normalmente se realiza en campo para la incorporación del producto al suelo. De esta forma, el suelo homogéneo corresponde a la mezcla de los suelos provenientes de los cuatro apiques de cada tramo; este material fue nuevamente clasificado y caracterizado y sus propiedades representativas se muestran en la Tabla 4.6.

**Tabla 4.6.** Resultados análisis de laboratorio suelo homogéneo

Suelo homogéneo			
Parámetro	Unidades	Resultado, suelo homogéneo tramo zeolita/cemento	Resultado, suelo homogéneo tramo enzima
Clasificación SUCS	—	CL	SC
Descripción	—	Arcilla magra arenosa color rojizo	Arena arcillosa color pardo rojizo oscuro
Clasificación AASTHO	—	A-4 (8)	A-4 (4)
Pasa No. 4	%	93	83
Pasa No. 40	%	83	66
Pasa No. 200	%	69	45
Límite Líquido /LL	—	34	28
Límite Plástico / LP	—	17	18

Índice de Plasticidad / IP	—	17	10	
Gravedad específica finos	—	2.646	2.698	
Gravedad específica gruesos	—	2.581	2.618	
Gravedad específica combinada	—	2.641	2.684	
Absorción del agregado grueso	%	2.00	1.60	
Materia orgánica por ignición	%	2.05	2.91	
Contenido de sulfatos	mg SO <sub>4</sub> /g de suelo	0.4706	0.4784	
pH	-	6.021	6.07	
Conductividad	μS/cm	272	151.4	
ATP	D <sub>10</sub>	μm	3.398	2.428
	D <sub>50</sub>	μm	24.451	25.033
	D <sub>90</sub>	μm	73.389	75.853
Peso unitario seco máximo	KN/m <sup>3</sup>	18.90	18.0	
Densidad máxima seca	Kg/m <sup>3</sup>	1929	2004	
Humedad óptima	%	12	11	
CBR (100% compactación)	%	3	8	
Expansión	%	2.6	0.1	
Absorción	%	8.9	1.4	

#### 4.3.3. Resultados de la evaluación fisicoquímica y mecánica de los sistemas estabilizante-suelo en laboratorio

Para la evaluación en laboratorio de los sistemas aditivados se realizaron los ensayos de compactación para determinar los parámetros de densidad máxima y humedad óptima a la que tenían que prepararse las muestras, tal como se muestra en la Tabla 4.7. Para el caso del producto enzimático la variación en estos parámetros se consideró despreciable y por ello se asumieron los parámetros de compactación del suelo natural para las tres dosificaciones evaluadas.

Tabla 4.7. Resultados curvas de compactación sistemas aditivados

Parámetro	Suelo natural	Dosis 1	Dosis 2	Dosis 3
<b>Sistema suelo-zeolita/cemento</b>				
Dosis zeolita / cemento: Kg aditivo / m <sup>3</sup> suelo seco a densidad máxima	0	1.8 / 170	1.8 / 180	1.7 / 170
Densidad Máxima Seca (Kg/m <sup>3</sup> )	1929	1909	1924	1909
Humedad óptima (%)	12	11	13	11
<b>Sistema suelo-enzima</b>				
Dosis enzima: L aditivo/ m <sup>3</sup> suelo seco a densidad máxima	0	0.023	0.033	0.043
Densidad Máxima Seca (Kg/m <sup>3</sup> )	2004			
Humedad óptima (%)	11			

○ Resultados sistema mixto suelo-zeolita/cemento

Como se muestra en la Tabla 4.8 se evaluó el desempeño en laboratorio de la zeolita/cemento como estabilizante sobre el suelo homogéneo, derivado de la mezcla de los suelos explorados sobre el tramo asignado en el corredor vial Valencia-Villanueva, empleando tres sistemas de dosificaciones. Los resultados muestran que el aditivo puzolánico en todas las dosificaciones evaluadas, disminuye levemente el índice de plasticidad del suelo natural; adicionalmente, la resistencia mecánica del suelo aditivado con las dosis D1 y D2 es muy superior a la del suelo natural.

En el ensayo de ascenso capilar se obtuvo que los sistemas aditivados presentan mayores velocidades de ascenso capilar y por ende menores tiempos de saturación; sin embargo también presentan menores porcentajes de desmoronamiento. Ello indica que este aditivo confiere mayor permeabilidad al suelo y a su vez más resistencia a cambios volumétricos y desprendimientos de material; comportamiento que es relevante dada la naturaleza arcillosa del suelo y que estos materiales finos tienden a ser impermeables. Este resultado es coherente con los resultados mostrados en el capítulo 3, en los que se encontró que los sistemas mixtos de suelo con los productos puzolánicos aumentan la permeabilidad y porosidad del suelo con características arcillosas.

**Tabla 4.8.** Resultados de la evaluación físicoquímica y mecánica del sistema mixto suelo-zeolita/cemento

Sistema	Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión no confinada (KPa)	Tiempo de saturación (min)	Velocidad de ascenso capilar (mm/min)	% Desmoronamiento	LL <sup>1</sup>	LP <sup>1</sup>	Índice de Plasticidad (IP) <sup>1</sup>
Suelo natural	7	576	685 <sup>1</sup>	0.072	0.38	34	17	17
	14	363						
	28	397						
Dosis 1	7	1367	73	0.670	0.2	56	42	14
	14	1222	115	0.425	0.1			
	28	1366	143	0.342	0			
Dosis 2	7	1119	114	0.431	0.05	56	41	15
	14	1082	266	0.184	0.06			
	28	1205	129	0.379	0			
Dosis 3	7	377	129	0.380	0.06	37	26	11
	14	769	106	0.464	0.05			
	28	742	196	0.251	0			

<sup>1</sup>Estos ensayos solo se realizaron para un tiempo de curado de 7 días

o Resultados sistema mixto suelo-enzima

En la Tabla 4.9 se muestran los resultados obtenidos al evaluar el desempeño en laboratorio del producto enzimático como estabilizante sobre el suelo homogéneo, empleando tres sistemas de dosificaciones. En el caso de la dosis D2 se observó una leve disminución en el índice de plasticidad del suelo, lo cual no ocurrió para las demás dosificaciones evaluadas. En todos los sistemas la resistencia a la compresión simple aumentó con el tiempo de curado, aunque no se observa una tendencia de mejora respecto a la dosificación del producto.

De otra parte, se observó que los sistemas aditivados presentan mejor comportamiento con respecto al ascenso capilar y estabilidad al agua; en los sistemas suelo-aditivo aumenta el tiempo de saturación, disminuye la velocidad de ascenso capilar y el porcentaje de desmoronamiento. Estos resultados muestran que en los sistemas aditivados el agua es absorbida más lentamente y se presenta menos desprendimiento de material que en el suelo sin tratar, lo que resalta la acción del aditivo en cuanto a la impermeabilidad del suelo. En este mismo sentido, los resultados mostrados en el capítulo 3 muestran coherencia ya que se encontró que en el sistema mixto suelo-enzima se disminuye la permeabilidad y la porosidad del suelo natural.

**Tabla 4.9.** Resultados de la evaluación fisicoquímica y mecánica del sistema mixto suelo-enzima

Sistema	Tiempo de curado	Resistencia a la compresión no confinada (KPa)	Tiempo de saturación (minutos)	Velocidad de ascenso capilar (mm/min)	% Desmoronamiento	LL <sup>1</sup>	LP <sup>1</sup>	Índice de Plasticidad (IP) <sup>1</sup>
Suelo natural	1	1268	—	—	—	28	18	10
	7	2094	204	0.25	1.71			
	21	3390	229	0.22	1.69			
Dosis 1	1	1215	—	—	—	25	15	10
	7	2655	302	0.16	1.24			
	21	3010	251	0.20	1.63			
Dosis 2	1	1472	—	—	—	24	15	9
	7	2597	243	0.20	1.59			
	21	2881	326	0.15	0.89			
Dosis 3	1	1222	—	—	—	25	15	10
	7	2683	281	0.25	1.10			
	21	2901	375	0.13	1.12			

<sup>1</sup>Estos ensayos solo se realizaron para un tiempo de curado de 7 días

○ Definición de las estrategias de estabilización para el tramo de prueba

De acuerdo con los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas, en el caso del aditivo puzolánico, se consideró óptimo el uso de la dosis D1: 1.8 kg aditivo/ m<sup>3</sup> suelo seco a densidad máxima y 170 kg cemento/ m<sup>3</sup> suelo seco a densidad máxima, para la aplicación en el tramo de prueba en el corredor vial Valencia-Villanueva. Aun cuando con la dosis D2: 1.8 kg aditivo/ m<sup>3</sup> suelo seco a densidad máxima y 180 kg cemento/ m<sup>3</sup> suelo seco a densidad máxima se consiguen también desempeños adecuados del sistema en todas las propiedades evaluadas, se escoge la dosis D1 por requerir menor cantidad de cemento.

Para el caso del producto enzimático, teniendo en cuenta los resultados obtenidos se decidió llevar a campo la dosificación D2 de 0.033 L aditivo/m<sup>3</sup> de suelo seco a densidad máxima, dado que con ella se presentaron los mejores resultados evaluando en forma global todos los parámetros estudiados.

**4.3.4. Resultados ensayos realizados durante la etapa constructiva**

Previo a iniciar el proceso constructivo e inmediatamente después de la intervención se midieron algunos parámetros de los tramos evaluados: densidad, módulo dinámico e índice de condición URCI; esto con el fin de comprobar las mejoras in situ de los aditivos sobre el suelo natural.

○ Resultados producto puzolánico

En la Tabla 4.10, Tabla 4.11 y Tabla 4.12 se muestran los resultados obtenidos para el tramo donde se aplicó el producto puzolánico zeolita/cemento. Las fotografías de

la Figura 4.5 y de la Figura 4.6 muestran el estado del tramo antes y después de la intervención.

**Tabla 4.10.** Resultados de densidad en campo por el método de cono de arena antes y después de la intervención en el tramo correspondiente al producto puzolánico zeolita/cemento

ABSCISA, CARRIL	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	PESO UNITARIO SECO (KN/m <sup>3</sup> )	PORCENTAJE DE COMPACTACIÓN (%)
Antes de intervención			
Km 2+160 Carril izquierdo	4.17	18.48	90
Km 2+350 Carril izquierdo	1.98	18.23	89
Km 2+660 Carril derecho	3.7	18.7	92
Km 2+966 Carril derecho	4.48	19.25	94
Después de intervención			
Km 2+020 Carril izquierdo	15.4	16.5	96
Km 2+160 Carril derecho	12.83	17.21	101
Km 2+290 Eje de la vía	12.77	17.52	102
Km 2+400 Eje de la vía	9.94	18	104
Km 2+460 Carril derecho	12.04	16.5	96

**Tabla 4.11.** Resultados de módulo obtenido con LWD antes y después de intervención con el producto puzolánico zeolita/cemento

ABSCISA	CARRIL	"Módulo" (MPa)
Antes de intervención		
2+00	Derecho	45.27
2+100	Izquierdo	46.49
2+300	Derecho	50.9
2+400	Izquierdo	33.73
2+600	Eje de la vía	67.16
2+700	Derecho	66.18
2+800	Izquierdo	54.09
2+900	Derecho	52.2
Después de intervención		
2+000	Eje de la vía	61.81
2+020	Derecho	51.25
2+080	Eje de la vía	69.88
2+140	Derecho	88.24
2+180	Eje de la vía	80.07
2+160	Derecho	78.4
2+120	Izquierdo	75.25

2+065	Izquierdo	85.88
2+220	Eje de la vía	81.23
2+300	Derecho	63.03
2+340	Eje de la vía	112.5
2+260	Eje de la vía	111.94
2+260	Derecho	55.01
2+416	Derecho	43.69
2+383	Izquierdo	43.27
2+449	Izquierdo	54.35
2+400	Izquierdo	70.31
2+360	Izquierdo	103.21
2+460	Derecho	63.56
2+540	Derecho	46.68
2+480	Derecho	89.29
2+500	Izquierdo	72.35
2+560	Eje de la vía	50
2+620	Derecho	53.96
2+680	Eje de la vía	67.16
2+620	Derecho	52.57
2+660	Eje de la vía	62.85
2+730	Eje de la vía	120.32
2+740	Izquierdo	91.09
2+680	Izquierdo	108.7
2+800	Izquierdo	41.67

**Tabla 4.12.** Índice de condición de la vía URCI reportado antes y después de intervención con el producto puzolánico zeolita/cemento

RANGO EVALUADO		VALOR	CLASIFICACIÓN
ABSCISA INICIAL	ABSCISA FINAL		
Antes de intervención			
2+020	2+050	51	Regular
2+280	2+310	62	Bueno
2+400	2+430	51	Regular
Después de intervención			
2+020	2+050	96	Excelente
2+100	2+140	96	Excelente
2+180	2+210	96	Excelente
2+160	2+290	96	Excelente
2+360	2+390	95	Excelente
2+480	2+510	96	Excelente
2+560	2+590	95	Excelente
2+620	2+650	96	Excelente
2+700	2+730	96	Excelente



**Figura 4.5.** Registro fotográfico del tramo asignado al producto puzolánico zeolita/cemento antes de intervención



**Figura 4.6.** Registro fotográfico del tramo asignado al producto puzolánico zeolita/cemento después de intervención

○ Resultados producto enzimático

En la Tabla 4.13, Tabla 4.14 y Tabla 4.15 se muestran los resultados obtenidos para el tramo correspondiente a la enzima. Las fotografías de la Figura 4.7 y Figura 4.8 muestran el estado del tramo antes y después de la intervención.

**Tabla 4.13.** Resultados de densidad en campo por el método de cono de arena antes y después de intervención en el tramo correspondiente a la enzima

ABSCISA, CARRIL	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	PESO UNITARIO SECO (KN/m <sup>3</sup> )	PORCENTAJE DE COMPACTACIÓN (%)
Antes de la intervención			
Km 5+000, Carril derecho	4.15	18.1	92
Km 4+660 Carril izquierdo	5.98	17.3	88
Km 4+300 Eje de la vía	4.73	17.8	90
Km 4+120 Carril derecho	5.23	18.4	94
Después de la intervención			
Km 4+920 Carril derecho	7.13	19.3	98
Km 4+700 Carril izquierdo	8.40	19.1	97
Km 4+500 Carril derecho	7.88	19.3	98
Km 4+300 Carril izquierdo	7.67	19.0	97
Km 4+120 Carril izquierdo	7.96	19.3	98

**Tabla 4.14.** Resultados de módulo obtenido con LWD antes y después de intervención con la enzima

ABSCISA	CARRIL	MÓDULO DINÁMICO (MPa)
Antes de la intervención		
Km 5+000	Derecho	60.1
Km 4+900	Izquierdo	51.37
Km 4+800	Derecho	65.74
Km 4+700	Izquierdo	54.35
Km 4+600	Derecho	61.48
Km 4+500	Izquierdo	32.14
Km 4+400	Derecho	36.64
Km 4+300	Izquierdo	74.01
Km 4+200	Derecho	54.74
Km 4+100	Izquierdo	56.39
Km 4+000	Derecho	65.03
Después de la intervención		
4+960	Izquierdo	71.43

4+860	Derecho	65.79
4+760	Eje de la vía	65.98
4+660	Izquierdo	38.66
4+560	Derecho	111.94
4+460	Izquierdo	68.39
4+360	Derecho	80.07
4+260	Izquierdo	53.96
4+160	Derecho	64.29
4+060	Eje de la vía	38.39

**Tabla 4.15.** Índice de condición de la vía URCI reportado antes y después de intervención con la enzima

RANGO EVALUADO		VALOR	CLASIFICACIÓN
ABSCISA INICIAL	ABSCISA FINAL		
Antes de la intervención			
4+040	4+080	60	Bueno
4+630	4+670	42	Regular
4+850	4+890	62	Bueno
Después de la intervención			
4+910	4+940	100	Excelente
4+870	4+900	100	Excelente
4+830	4+860	100	Excelente
4+810	4+830	97	Excelente
4+750	4+780	98	Excelente
4+720	4+750	96	Excelente
4+650	4+680	99	Excelente
4+560	4+590	96	Excelente
4+500	4+530	100	Excelente
4+380	4+410	100	Excelente
4+220	4+250	93	Excelente
4+020	4+050	100	Excelente



Figura 4.7. Registro fotográfico del tramo asignado a la enzima antes de intervención



Figura 4.8. Registro fotográfico del tramo asignado a la enzima después de intervención

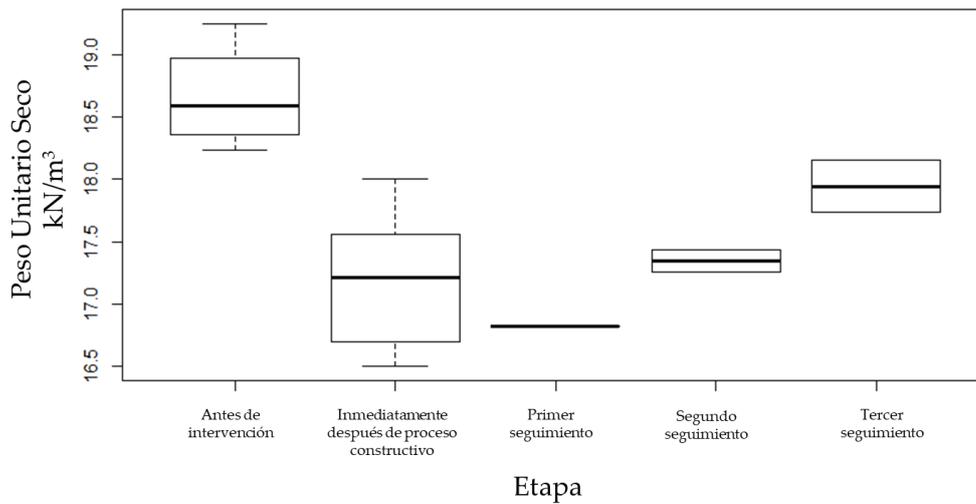
De acuerdo con los resultados obtenidos en los parámetros evaluados en campo, es posible concluir que en términos generales el proceso constructivo y la aplicación de ambos productos genera mejoras inmediatas en el suelo propio de la vía, generando un camino más transitable.

#### 4.3.5. Resultados de la etapa de seguimiento y monitoreo

Durante la etapa de seguimiento y monitoreo de los tramos construidos se realizaron 3 seguimientos: 28 días, 4 meses y 8 meses posteriores a la construcción; el desempeño de los tramos se evaluó en función de los siguientes parámetros: densidad, módulo dinámico con LWD e Índice de condición URCI. A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los productos evaluados.

- Resultados tramo tratado con el producto puzolánico zeolita/cemento

En la Figura 4.9 se muestran los resultados de densidad en campo por el método de cono de arena durante la etapa de seguimiento en el tramo correspondiente al producto puzolánico zeolita/cemento, observándose una dispersión aceptable de los datos medidos a lo largo del tramo de prueba. Inicialmente se presentó una disminución del peso unitario seco respecto al suelo antes de la intervención, lo que obedece a la modificación que el aditivo puzolánico genera en las características de compactación del suelo reduciendo la densidad máxima seca usada como parámetro de construcción, tal como se muestra en los resultados de la evaluación fisicoquímica y mecánica de los sistemas estabilizante-suelo en laboratorio. Durante los seguimientos posteriores se observa un aumento gradual del peso unitario seco del material aditivado que se relaciona directamente con el proceso de curado de estos materiales.



**Figura 4.9.** Resultados de densidad en campo por el método de cono de arena durante la etapa de seguimiento en el tramo tratado con el producto puzolánico zeolita/cemento

La Figura 4.10 presenta los resultados de módulo obtenido con LWD durante la etapa de seguimiento en el tramo correspondiente al tratamiento con zeolita, con datos medidos a lo largo del tramo que muestran una alta dispersión. Aun cuando el deflectómetro de peso liviano LWD usado para las mediciones, puede no ser el equipo y la técnica más adecuada para medir deflexiones de materiales cementantes, en este caso permitió observar comportamientos generales así como una leve tendencia a aumentar hasta el segundo seguimiento, presentando una disminución significativa en el tercer seguimiento, atribuible a la época de lluvias del momento causantes del posible deterioro en la calidad de los tramos construidos.

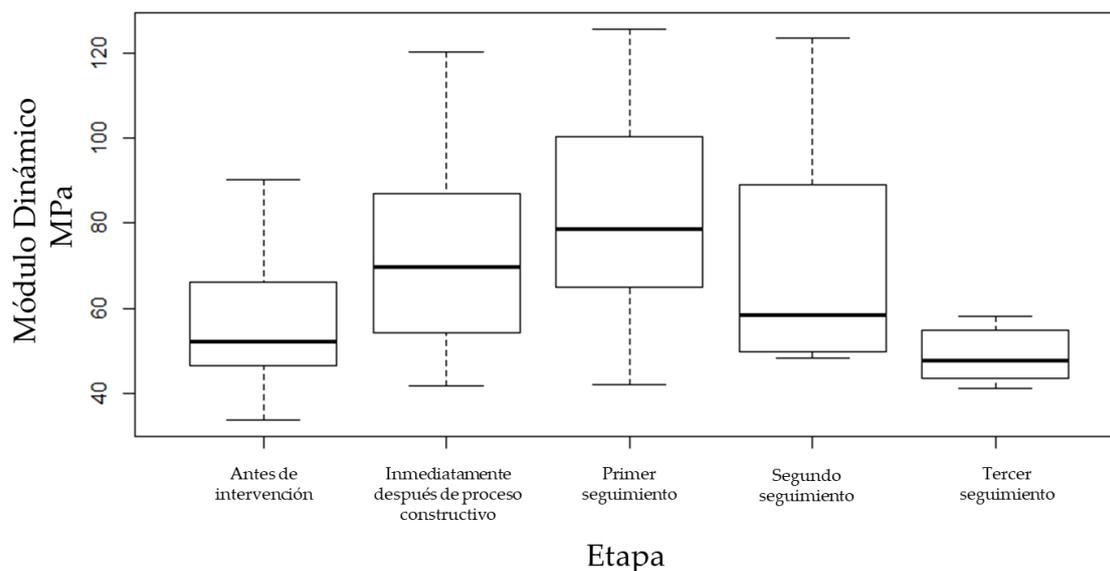


Figura 4.10. Resultados de módulo obtenido con LWD durante la etapa de seguimiento en el tramo tratado con el producto puzolánico zeolita/cemento

En la Figura 4.11 se muestran los resultados del índice de condición de la vía URCI durante la etapa de seguimiento en el tramo correspondiente al tratamiento con el producto puzolánico zeolita/cemento. Estos resultados muestran que el aditivo presenta un efecto positivo en la condición general de la vía; no obstante, los resultados del segundo seguimiento, en el que se evidencia la aparición de deterioros puntuales, ponen de manifiesto la necesidad de emplear tratamientos superficiales e implementar procesos de mantenimiento para evitar su deterioro temprano y a tiempos mayores.

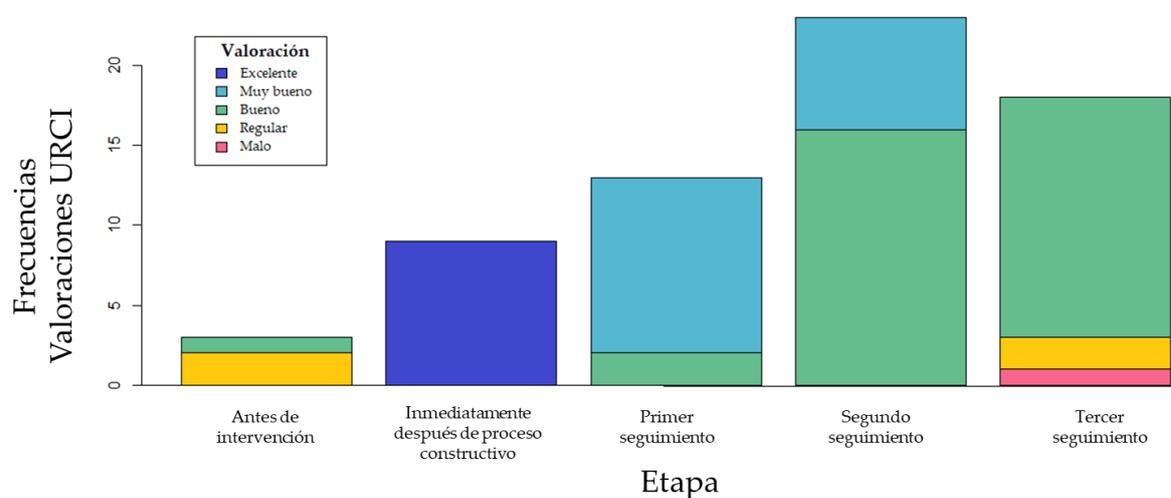
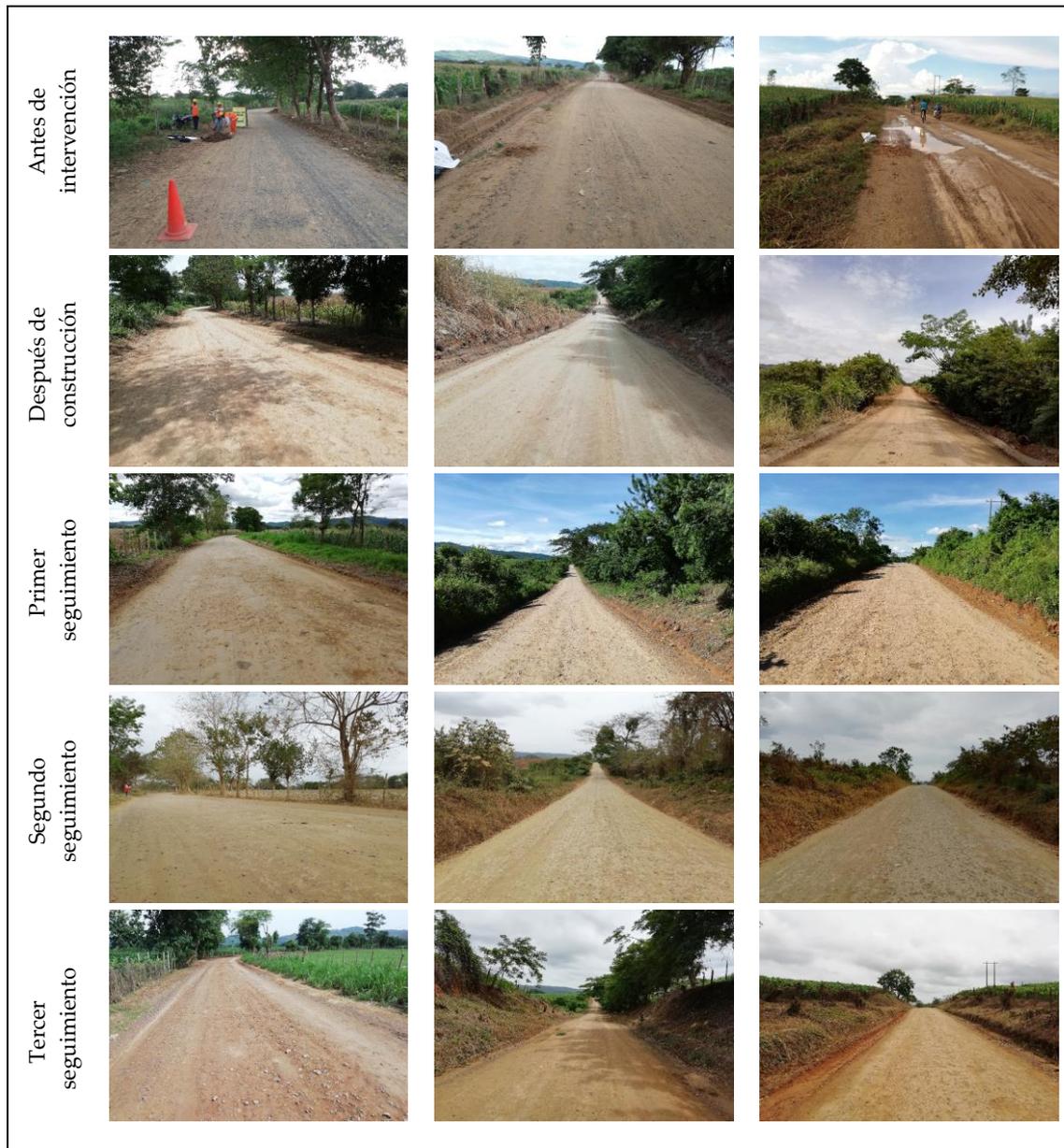


Figura 4.11. Resultados del índice de condición de la vía URCI durante la etapa de seguimiento en el tramo tratado con el producto puzolánico zeolita/cemento

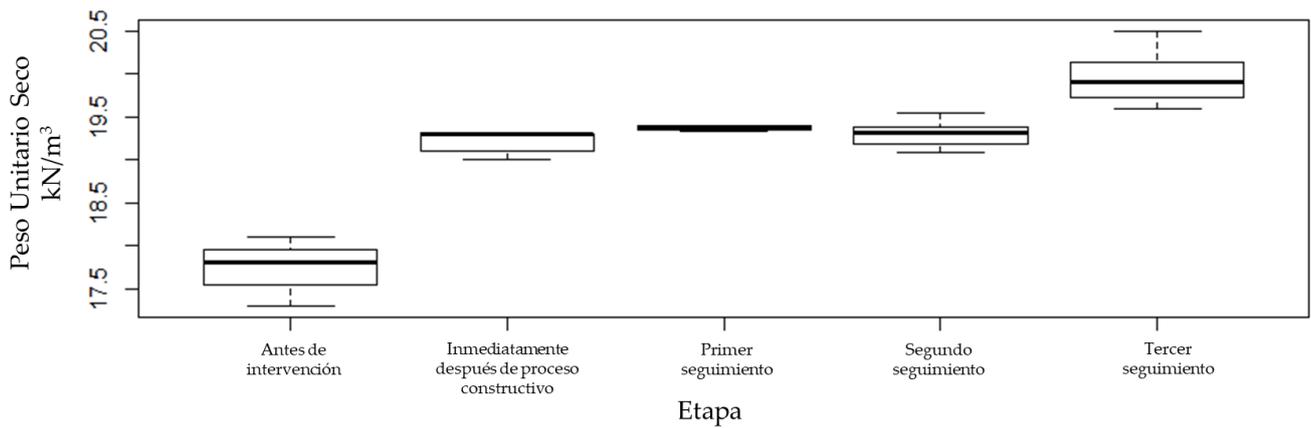
En las fotografías de la Figura 4.12 se muestra un registro fotográfico a través del tiempo en algunos puntos del tramo tratado con el producto puzolánico zeolita/cemento. Como se puede observar, la intervención con este producto mejoró las condiciones de transitabilidad de la vía respecto a las condiciones iniciales y luego de ocho meses, en ausencia de mantenimientos, sigue presentando un buen estado.



**Figura 4.12.** Registro fotográfico durante la etapa de seguimiento en el tramo tratado con el producto puzolánico zeolita/cemento

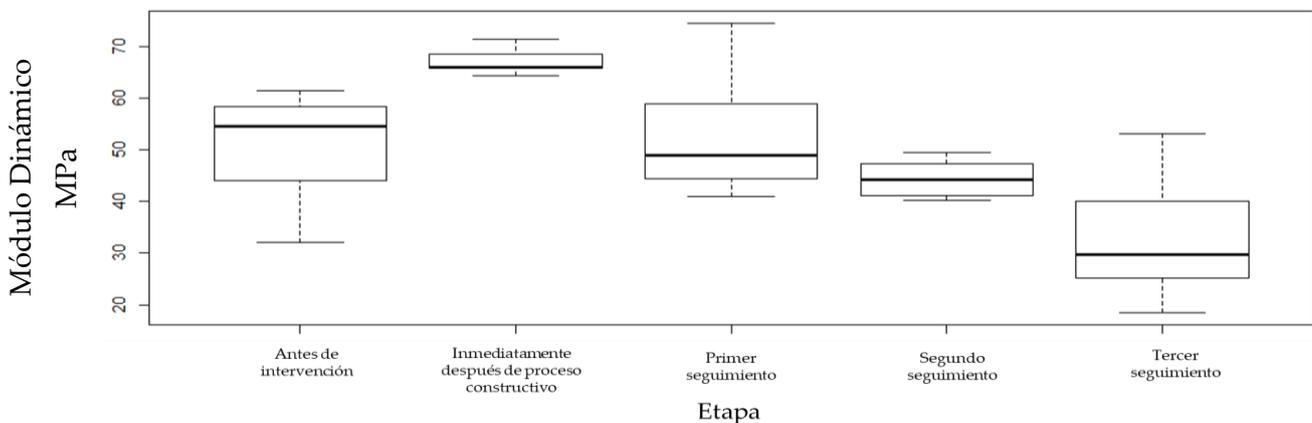
○ Resultados producto enzimático

En la Figura 4.13 se muestran los resultados de densidad en campo por el método de cono de arena durante la etapa de seguimiento en el tramo tratado con la enzima. Se observa una dispersión aceptable de los datos medidos a lo largo del tramo de prueba; se presenta un aumento gradual y considerable del peso unitario seco del material aditivado, lo cual constituye una respuesta positiva del suelo aditivado con el producto en relación a las propiedades ingenieriles del suelo.



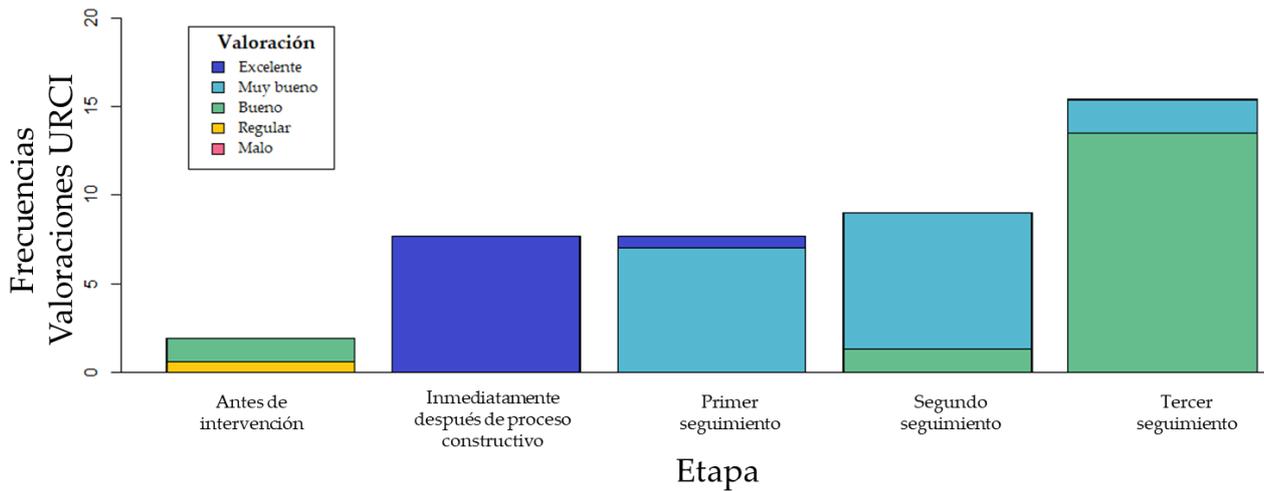
**Figura 4.13.** Resultados de densidad en campo por el método de cono de arena durante la etapa de seguimiento en el tramo tratado con enzima

La Figura 4.14 presenta los resultados de módulo obtenido con LWD durante la etapa de seguimiento en el tramo correspondiente al producto enzimático, con una dispersión aceptable de los valores medidos a lo largo del tramo. Se observa un aumento inicial en esta propiedad, resultado de la intervención con el aditivo, seguida de una disminución gradual durante la etapa de seguimiento que evidencia al deterioro sufrido por el material a través del tiempo.



**Figura 4.14.** Resultados de módulo obtenido con LWD durante la etapa de seguimiento en el tramo tratado con enzima

En la Figura 4.15 se muestran los resultados del índice de condición de la vía URCI durante la etapa de seguimiento en el tramo correspondiente al producto enzimático. Estos resultados muestran que el aditivo presenta un efecto positivo en la condición general de la vía; sin embargo, se evidencia que hay un deterioro a través del tiempo, lo cual pone de manifiesto la necesidad de implementar mantenimientos preventivos de manera periódica.



**Figura 4.15.** Resultados del índice de condición de la vía URCI durante la etapa de seguimiento en el tramo tratado con enzima

En las fotografías de la Figura 4.16 se muestra un registro fotográfico durante la etapa de seguimiento de algunos puntos del tramo correspondiente al producto enzimático; como se puede observar la intervención mejoró las condiciones de transitabilidad de la vía, las cuales se mantienen a través del tiempo.





Figura 4.16. Registro fotográfico durante la etapa de seguimiento en el tramo correspondiente al producto enzimático

#### 4.4. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos los dos productos evaluados presentan un buen desempeño como estabilizantes de los suelos presentes en los tramos que fueron intervenidos. Se debe resaltar que el producto puzolánico presenta valores de resistencia mecánica más altos y por su parte el producto enzimático presenta mejor desempeño respecto al control de polvo e impermeabilidad del terreno. Esto claramente muestra que es indispensable considerar las necesidades propias de la vía y establecer el objetivo de la intervención con productos estabilizantes para realizar una adecuada selección del tipo y naturaleza química del aditivo.

La construcción a escala real de tramos de prueba permitió estimar los costos de implementación de estas tecnologías. Para el producto enzimático los costos oscilan entre COP 100 y 150 millones/kilómetro, mientras que para el producto puzolánico está entre COP 350 y 400 millones/kilómetro. Es necesario resaltar aquí que la aplicación de productos sólidos resulta ser más costosa debido a que el proceso constructivo es más complejo y requiere más recursos de mano de obra y mayores tiempos respecto a la aplicación de aditivos líquidos. Sumado a esto, los costos de transporte también son

comparativamente más altos que los de los productos líquidos. No obstante las anteriores consideraciones, un análisis de costo beneficio conduce a considerar que los productos cementantes generan una mayor resistencia y durabilidad que los enzimáticos, con lo cual son muy recomendables cuando la vía que va a ser intervenida presenta un alto flujo de tránsito y por tanto requiere de una capacidad de soporte elevada.

Teniendo en cuenta los resultados y consideraciones anteriores, para la vía que fue objeto de estudio la tecnología evaluada que resulta ser más adecuada es la del producto enzimático, en tanto que es la solución más favorable por su costo-beneficio, teniendo en cuenta que esta vía no presenta un alto tránsito y que su deterioro se debe en gran medida a la combinación de los factores climáticos con la inestabilidad volumétrica del suelo natural que la conforma.

En este estudio se propone una metodología para la implementación y evaluación de estabilizantes químicos a escala real en tramos de prueba piloto, lo cual representa una contribución importante a los procesos de estandarización y regulación de estas tecnologías en el país. El desarrollo de este tipo de investigaciones, potencia e incentiva la aplicación de tecnologías alternativas para el mejoramiento de vías no pavimentadas y de bajo volumen de tránsito y se genera a corto y mediano plazo impactos positivos para la conectividad de los territorios y la calidad de vida de las comunidades que viven en la ruralidad del país.

Las metodologías implementadas en laboratorio y campo, así como los resultados obtenidos en los tramos piloto construidos, contribuyen a la generación y consolidación de conocimiento técnico y científico para el establecimiento de políticas públicas y la adopción de protocolos para adoptar la regulación técnica de nuevas tecnologías para la infraestructura de transporte del país. Se propone la validación en laboratorio así como la construcción de tramos de prueba como herramientas valiosas para evaluar el desempeño de estas tecnologías de estabilización de acuerdo con la propuesta metodológica desarrollada en esta investigación.

## 5. CAPÍTULO V: objetivos alcanzados, conclusiones generales, productos, recomendaciones y perspectivas

Este capítulo presenta los objetivos alcanzados, las conclusiones generales, los productos alcanzados, las recomendaciones y las perspectivas de la investigación que puedan dar continuidad al tema de estudio.

### 5.1. Objetivos alcanzados

Se evaluó el efecto del intemperismo sobre las propiedades fisicoquímicas y la durabilidad de un suelo vial aditivado con productos de diferente naturaleza química. Los resultados de esta evaluación permiten profundizar en el conocimiento de los fenómenos tanto físicos como químicos presentes en los procesos de estabilización química, así como en la determinación de correlaciones existentes entre esta fenomenología y la durabilidad que pueden presentar tanto los productos estabilizantes como los sistemas aditivados. Asimismo, se constituyen en una herramienta para la evaluación del desempeño de productos y/o tecnologías alternativas para vías de bajos volúmenes de tránsito, lo que conducirá indudablemente a potenciar y estandarizar el uso de estos materiales como soluciones pertinentes para el mejoramiento de la infraestructura vial rural.

Se evaluaron los sistemas mixtos de suelo aditivado con productos químicos de diferente naturaleza, bajo condiciones de intemperismo natural e intemperismo acelerado, en función de sus propiedades fisicoquímicas, ambientales y mecánicas; esta evaluación permitió determinar la durabilidad y evolución en el tiempo de cada uno de los materiales estudiados.

Para los sistemas mixtos de suelo con los aditivos químicos se encontró una buena correlación entre las propiedades mecánicas obtenidas bajo condiciones de intemperismo natural y las obtenidas bajo condiciones de intemperismo acelerado, para el caso de las propiedades fisicoquímicas solo en algunos materiales evidenciaron estar correlacionadas. De esta forma, y con base en las propiedades mecánicas se determinó el factor de aceleración, propio de cada material, que correlaciona el desempeño de los sistemas mixtos aditivados sometidos a intemperismo acelerado con el desempeño bajo condiciones de intemperismo natural.

Se implementaron y adaptaron nuevas técnicas para la caracterización del suelo y la evaluación del desempeño y la eficiencia de la estabilización química de los sistemas

mixtos de suelo aditivado. Entre ellas vale la pena destacar el análisis de tamaño de partícula por difracción láser, las pruebas de lixiviación, la prueba de desgaste por cepillado, la prueba de velocidad de ascenso capilar y los análisis instrumentales: FTIR/ATR, SEM/EDS, análisis textural por método BET. Todas ellas brindaron valiosos resultados que enriquecieron los análisis realizados.

Se determinó la influencia que tiene el tipo de estabilizante sobre el desempeño y la durabilidad de los sistemas mixtos aditivados. Los resultados obtenidos evidenciaron la relación existente entre la naturaleza química de los aditivos con el desempeño ingenieril y respuesta mecánica que confieren a los sistemas en los cuales han sido incorporados; los aditivos de naturaleza cementante se destacaron por presentar mayores resistencias mecánicas, mientras que los aditivos líquidos se destacaron por presentar un mejor desempeño en las pruebas de permeabilidad y velocidad de ascenso capilar.

Las pruebas de intemperismo acelerado, bajo la metodología desarrollada en este trabajo, constituye un método capaz de evaluar a corto plazo y predecir el desempeño y evolución en el tiempo de las propiedades fisicoquímicas, ambientales y mecánicas de suelos viales aditivados con productos químicos.

## 5.2. Conclusiones generales

### Caracterización fisicoquímica y mecánica del suelo natural

La caracterización efectuada al suelo natural permitió establecer las propiedades estructurales, fisicoquímicas y morfológicas de dicho material. Según la clasificación USCS, se caracterizó como una arcilla magra con contenidos de minerales como la caolinita y la illita, presentando un IP de 21 y un CBR de 5.0%. Estas características indican que se trata de un suelo de mala calidad desde el punto de vista geotécnico y que para su uso en aplicaciones de infraestructura vial, requiere de una intervención para mejorar sus propiedades ingenieriles.

La clasificación convencional del suelo natural fue complementada con técnicas instrumentales de caracterización de materiales para identificar con mayor detalle su composición, estructura y propiedades fisicoquímicas, con el objetivo de profundizar en el conocimiento del suelo y los parámetros ingenieriles que se requeriría mejorar para obtener un material con una mejor respuesta estructural.

### **Evaluación inicial de los sistemas mixtos de suelo con los aditivos químicos**

El sistema mixto de suelo aditivado con el producto de la familia química de los aceites sulfonados evaluado, demostró una apreciable mejora de las propiedades mecánicas del suelo natural, aumentando la cohesión de 160.9 kPa a 272 kPa y la capacidad de carga, que pasó de 5.38 MPa a 7.00MPa; también es de resaltar su aporte en las condiciones de compactación del suelo natural al aumentar la densidad máxima y disminuir la humedad óptima, lo cual se traduce en procesos constructivos más ágiles y eficientes.

El desempeño del sistema mixto de suelo aditivado con el producto de la familia química de los polímeros presenta mejoras en las propiedades mecánicas respecto al suelo natural. Se obtuvieron valores bajos de permeabilidad de  $k=7.33 \times 10^{-11}$ , desgaste de  $< 2 \%$  en peso y área superficial de 34.53 m<sup>2</sup>/g. Estos resultados evidencian que los polímeros actúan como aglomerantes y potencian fenómenos de adhesión entre las partículas del suelo y las cadenas poliméricas, todo lo cual le confiere al suelo natural una mayor estabilidad.

El sistema mixto de suelo aditivado con el producto de la familia química de las enzimas presentó un mejor desempeño en comparación con el suelo natural. Es destacable la mejora en las condiciones de compactación al disminuir la humedad óptima y aumentar la densidad máxima; adicionalmente propició una disminución significativa del porcentaje de expansión del suelo natural, el cual pasó de 1.1% a 0.5%.

La evaluación del sistema mixto de suelo aditivado con el producto de la familia química de los organosilanos presentó los mejores resultados respecto a la estabilidad al agua; la capacidad hidrofóbica que tienen este tipo de productos se pudo evidenciar en las disminuciones significativas de la permeabilidad con un valor de  $k=1.08 \times 10^{-11}$  y de la velocidad de ascenso capilar con valor menor a 0.1 mm/min respecto al suelo natural. No obstante estas bondades, simultáneamente se encontró gran susceptibilidad al desgaste del sistema mixto aditivado con organosilanos, obteniendo un resultado mayor al 10% en peso, lo que pone de manifiesto la necesidad de acompañar su aplicación con algún tratamiento superficial que le confiera resistencia a la fricción y aumente su durabilidad.

El desempeño del sistema mixto de suelo aditivado con cal presenta mejoras en las propiedades mecánicas respecto al suelo natural, aumentando la cohesión, de 160.9 kPa a 321.8 kPa; disminuyendo el índice de plasticidad, de 21 a 11; y disminuyendo el porcentaje de expansión que pasó de 1.1% en el suelo natural a 0.3% en el sistema mixto de suelo con la cal.

Los sistemas mixtos de suelo aditivado con el cemento y la zeolita/cemento se destacan por su evolución hacia valores elevados de resistencia mecánica, lo que se

evidencia en el aumento significativo del CBR, con valores superiores al 100%; la capacidad de carga, alcanzado valores de 47 y 56 MPa; y una anulación del IP del suelo. Sin embargo, y según sea el caso de aplicación, no generan mejoras en propiedades como la permeabilidad y la velocidad de ascenso capilar. De otra parte, debido a las reacciones de cementación que propician, estos productos son los que más alteran las propiedades fisicoquímicas del suelo natural tales como: pH, conductividad y CIC.

De acuerdo con los resultados obtenidos para el tipo de suelo estudiado, todos los productos evaluados demostraron desempeños adecuados para objetivos de mejoramiento en las propiedades ingenieriles del suelo. De manera general los sistemas mixtos suelo-cemento y suelo-zeolita/cemento presentaron mayores resistencias mecánicas, destacándose los resultados obtenidos para los cuales aumentaron significativamente la capacidad de carga del suelo, alcanzado valores de 47 y 56 MPa, así como valores de CBR superiores al 100%. Se encontraron además cambios favorables en las propiedades fisicoquímicas respecto al suelo natural, destacándose la reducción en la porosidad de los materiales y resistencia al agua que presentan los sistemas mixtos de suelo aditivado con los productos líquidos; entre ellos se destacan el organosilano y el polímero con coeficientes de conductividad hidráulica de  $1.08 \times 10^{-11}$  m/s y de  $7.33 \times 10^{-11}$  m/s respectivamente, menores que el valor obtenido para el suelo natural de  $1.36 \times 10^{-09}$  m/s.

Los efectos de los productos químicos evaluados sobre las propiedades de un suelo son específicos, dependen tanto de la tipología del suelo como de la naturaleza química del producto e, incluso, de las condiciones climáticas de la zona de aplicación. 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; establecer el objetivo que se espera lograr con un proceso de estabilización y así poder proceder a seleccionar el tipo de producto químico que debe usarse para un propósito particular.

### **Evaluación ambiental de los sistemas mixtos de suelo con los aditivos químicos**

La caracterización ambiental realizada permitió demostrar que los aditivos químicos evaluados como estabilizantes de suelos viales, no presentan afectaciones para el ambiente en términos de toxicidad, biodegradabilidad y generación de material particulado.

Los resultados obtenidos para los sistemas aditivados con los productos líquidos: aceite sulfonado, polímero, enzima y organosilanos, muestran que hay una estabilidad en los parámetros fisicoquímicos como pH, COT, DQO, DBO y composición química, comparados con el suelo natural. Ello indica que la estabilización de suelos con estos

productos químicos no altera de manera significativa al suelo en términos medioambientales.

Por el contrario, para el caso de los productos puzolánicos se encuentra que sí hay una alteración de los parámetros evaluados, específicamente por la incorporación de calcio al sistema con la consecuente alcalinización del medio, obteniendo lixiviados con un pH entre 11 y 12. Sin embargo, esta alteración no representa afectación ambiental en tanto que el calcio es un componente natural de los suelos y se espera que en el tiempo, al completar las reacciones puzolánica, el sistema tienda a la neutralidad.

Los resultados obtenidos permiten concluir que el impacto ambiental generado por los aditivos químicos en aplicaciones de infraestructura vial no es significativo comparado con los procesos constructivos tradicionales; por lo tanto, estas tecnologías son alternativas viables para mejorar la infraestructura vial de vías en afirmado desde perspectivas y enfoques de durabilidad y sostenibilidad ambiental.

### **Pruebas de intemperismo**

Todos los materiales sometidos a las condiciones de intemperismo acelerado mostraron una degradación progresiva de color y un desgaste superficial generando un cambio en la textura al dejar expuestas las partículas de mayor tamaño; este mismo aspecto se observó con el paso del tiempo tanto en los materiales expuestos a intemperismo natural como en la superficie de los tramos piloto construidos durante la etapa de seguimiento y monitoreo en campo.

Los mejores resultados de desempeño para el suelo evaluado, en términos de capacidad de carga, se tienen para los sistemas mixtos suelo-aceite sulfonado y suelo-zeolita/cemento, que después de 540 h de intemperismo acelerado presenta resultados de resistencia de alrededor de 48 MPa, lo cual es un buen resultado respecto al obtenido para el suelo natural que presentó una capacidad carga de 18 MPa. Cabe anotar además, que en general todos los sistemas mixtos de suelo aditivado con los productos evaluados, presentaron un mejor desempeño y durabilidad respecto al suelo natural, y que su elección dependerá de las necesidades específicas de cada proyecto vial, los productos cementantes aportan mayor resistencia mecánica y durabilidad pero a su vez son más costosos, por su parte los aditivos líquidos son más económicos y ofrecen mejoras significativas en cuanto a la permeabilidad y resistencia al agua de suelos finos como el estudiado.

La metodología desarrollada permitió evaluar el desempeño de los sistemas de suelo aditivado bajo condiciones de intemperismo natural e intemperismo acelerado, en función de sus propiedades fisicoquímicas, ambientales, mecánicas y de durabilidad. Al mismo tiempo, puede establecerse que el tipo de degradación y deterioro que se observa en los materiales evaluados bajo condiciones de intemperismo natural, se reprodujeron

de igual forma en las pruebas aceleradas. Estos resultados validan la metodología de evaluación desarrollada para las pruebas de intemperismo acelerado.

El análisis de envejecimiento artificial acelerado Q-UV permitió observar el comportamiento de los sistemas de suelo aditivado bajo parámetros ambientales extremos, tales como irradiación elevada, es decir exposición a luz ultravioleta UVA, y humedad por condensación, ambos ciclos a altas temperaturas. Estas condiciones ambientales evidentemente potencian los procesos de degradación en los materiales y sistemas evaluados y replican los factores adversos desde el punto de vista climático que afectan la durabilidad de los suelos estabilizados.

Bajo condiciones de intemperismo acelerado y a los tiempos evaluados, fue posible observar que todos los materiales inicialmente pasan por una fase de curado en la que las propiedades mecánicas se van incrementado hasta alcanzar valores constantes que se mantienen por un determinado tiempo. Posteriormente todas estas propiedades entran en una fase de deterioro que, sin embargo, cuando se mantienen constantes en el tiempo siempre son mejores en los sistemas mixtos aditivados que en el suelo natural, confirmándose así la durabilidad que los productos químicos empleados como estabilizantes confiere al suelo.

Se determinaron factores de aceleración propios de cada material mediante correlaciones encontradas entre las propiedades mecánicas de todos los materiales evaluados bajo condiciones de intemperismo natural e intemperismo acelerado. De manera general con base en estos factores y teniendo en cuenta la evolución de las propiedades en el tiempo, se estima una vida útil mayor a 15 meses para los materiales cementantes y mayor a 8 meses para los aditivos líquidos. Estos resultados generan una valiosa herramienta para predecir el desempeño en el tiempo de un suelo estabilizado e impulsan el desarrollo de metodologías basadas en este tipo de pruebas que pueden ser implementadas con ahorros logísticos y económicos que las hacen atractivas para su viabilización en proyectos viales.

Los resultados obtenidos para los factores de aceleración son válidos solamente para los materiales evaluados y bajo las condiciones específicas del ensayo en cuanto a ciclos y temperatura; sin embargo, la metodología desarrollada puede ser aplicada para hallar factores de envejecimiento de otros materiales bajo diversas condiciones de intemperismo.

La evaluación bajo condiciones de intemperismo acelerado permitió estimar el desempeño a largo plazo y la vida útil de estos materiales; así como evidenciar ventajas y beneficios que ofrecen los diferentes aditivos evaluados para el mejoramiento de vías de bajos volúmenes de tránsito desde un punto de vista técnico y de sostenibilidad ambiental.

### **Prueba complementaria. Construcción de tramos piloto**

La implementación de un proceso de estabilización, requiere de adecuadas evaluaciones de los materiales a nivel de laboratorio. La puesta a punto de la evaluación de los productos químicos a escala real, requirió de un profundo conocimiento tanto del suelo, de los aditivos y las condiciones climáticas y medioambientales de la zona que hicieran posible el diseño de la estrategia de estabilización pertinente al entorno territorial.

Los resultados obtenidos en la implementación y evaluación de tramos piloto evidencian el efecto positivo de los aditivos químicos en el suelo a escala real, lo cual pone de manifiesto la potencialidad de estas soluciones para el mejoramiento de vías no pavimentadas y de bajo volumen de tránsito del país; además, se demostró la facilidad de los procesos constructivos, los cuales solo requieren de un kit básico de maquinaria: máquina motoniveladora, retroexcavadora y vibrocompactador, tanto para aditivos líquidos como aditivos sólidos, encontrándose además una buena relación costo efectividad.

## **5.3. Productos de investigación**

- **Participación como ponente en eventos científicos**

Simposio “sistemas alternativos para mantenimiento de vías de bajo volumen de tránsito” en las XI Jornadas Internacionales de Investigación: Redes de Investigación conectando conocimiento. Ponencia: DESARROLLO DE NUEVOS MATERIALES PARA INFRAESTRUCTURA VIAL SOSTENIBLE EN VÍAS TERCARIAS. Universidad de Medellín, Medellín, Colombia, 2015

V Congreso Internacional de Ingeniería Química, Biotecnológica y Alimentaria (CIIQBA2016). Ponencia: EFECTOS DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA Y LA HUMEDAD EN LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DE SUELOS ESTABILIZADOS QUÍMICAMENTE CON CAL Y ACEITE SULFONADO. Palacio de Convenciones de La Habana, Cuba 2016

XIX Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto – CILA. Ponencia: REHABILITACIÓN DE CARRETERAS NO PAVIMENTADAS, APLICACIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE DIAGNÓSTICO. Medellín, Colombia 2017

3° simposio internacional de caminos, III Expoconvia Perú 2017. Ponencia: ESTUDIO, SELECCIÓN Y ESTRUCTURACIÓN DE SISTEMAS TECNOLÓGICOS ALTERNATIVOS PARA MEJORAMIENTO Y ESTABILIZACIÓN DE SUELOS VIALES. Lima, Perú 2017

VII congreso internacional de ingeniería Civil, ISSN: 2145-0048. Ponencia: CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA Y MECÁNICA DE UN SUELO ARCILLOSO TRATADO CON ADITIVOS QUÍMICOS. Universidad Santo Tomás Seccional Tunja. Tunja, Colombia 2019

II Congreso Iberoamericano de Biodiversidad e infraestructura Viaria – CIBIV. Ponencia: EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS VIALES EMPLEANDO INTEMPERISMO ACELERADO. UNA ESTRATEGIA DE ANÁLISIS DE IMPACTOS SOBRE LA BIODIVERSIDAD. Medellín, Colombia 2019

Congreso Conferencia Internacional de Ingeniería INGENIO 2020. Ponencia: EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DE UN SUELO VIAL ADITIVADO CON PRODUCTOS QUÍMICOS. Medellín, Colombia 2020

Segundo Encuentro Nacional de Estudiantes de Doctorado en Ingeniería, ENEDI 2020. Ponencia. EFECTO DEL INTEMPERISMO SOBRE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS, EL DESEMPEÑO Y LA DURABILIDAD DE SUELOS VIALES ADITIVADOS CON ESTABILIZANTES QUÍMICOS. Medellín, Colombia 2020

I Seminario Internacional de Construcción, Rehabilitación y Mantenimiento de Carreteras. Día del camino 2020. Ponencia. “ESTRATEGIAS DE ARTICULACIÓN INTERINSTITUCIONAL PARA LA INTERVENCIÓN SOSTENIBLE DE VÍAS DE BAJOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO. (EXPERIENCIA COLOMBIA)”. Perú, 2020.

- **Publicaciones**

ESTUDIO, SELECCIÓN Y ESTRUCTURACIÓN DE SISTEMAS TECNOLÓGICOS ALTERNATIVOS PARA MEJORAMIENTO Y ESTABILIZACIÓN DE SUELOS VIALES. Revista especializada PERUVIAS, Edición 34, Octubre de 2017, pp 8-11

EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS VIALES EMPLEANDO INTEMPERISMO ACELERADO. UNA ESTRATEGIA DE ANÁLISIS DE IMPACTOS SOBRE LA BIODIVERSIDAD. TecnoLógicas Revista es una científica indexada de acceso abierto, Edición 49 Vol. 23, septiembre de 2020

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DE UN SUELO VIAL ADITIVADO CON PRODUCTOS QUÍMICOS. Capítulo de libro “Desarrollo e Innovación en Ingeniería”. ISBN 978-958-52333-4-8. DOI <http://doi.org/10.5281/zenodo.4031208>

- **Contribución en formación de recursos humanos**

Yonny Alexander Saldarriaga Herrera. Trabajo de grado como requisito para optar al título de: Ingeniero Químico. DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS POR SINERGIAS DE ESTABILIZANTES QUÍMICOS FORMULADOS A PARTIR DE RESIDUOS INDUSTRIALES. 2018

Dairo Leon Vanegas. Trabajo de grado como requisito para optar al título de: Ingeniero Sanitario. EVALUACIÓN AMBIENTAL DEL EFECTO DEL USO DE ADITIVOS QUÍMICOS EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS VIALES. 2020

- **Contribución en la elaboración de una regulación técnica para el uso de estabilizantes químicos en Colombia**

Generación de conocimiento técnico y científico que requiere el país para el establecimiento de políticas públicas y protocolos para adoptar la regulación técnica de nuevas tecnologías para la infraestructura vial.

## 5.4. Recomendaciones y trabajos futuros

Se recomienda validar el desempeño de los productos evaluados sobre diferentes tipos de suelos y variar las dosificaciones de los aditivos, para identificar el potencial uso de esta metodología en suelos con propiedades diferentes y en dosificaciones diferentes a las aquí estudiadas. Asimismo, se recomienda evaluar los materiales sometidos a tiempos de curado más prolongados.

Como complemento de este estudio, se recomienda evaluar el desempeño y la durabilidad de estos materiales a mayores tiempos de exposición tanto en ambientes simulados en laboratorio como en condiciones naturales.

El monitoreo y seguimiento de suelos aditivados por períodos de tiempo más largos, puede evidenciar interacciones químicas que generen cambios en las propiedades de los suelos tratados, al igual que modificaciones en su desempeño mecánico.

En este trabajo se realiza la composición elemental del material particulado, generado por los sistemas mixtos de suelo con los aditivos, solo para un tiempo de curado, sería interesante realizar un seguimiento de este parámetro a diferentes tiempos de envejecimiento para evaluar que no haya generación de compuestos potencialmente tóxicos.

Sería de gran utilidad evaluar posibles mezclas entre los diferentes aditivos que puedan potencializar la afinidad o desempeño con los suelos naturales, generando sinergias y obteniendo mejores resultados para un objetivo en particular.

Para determinar la viabilidad económica para el uso generalizado de estos productos, es necesario realizar un estudio detallado que compare, relacione y correlacione los costos y los beneficios de aplicar cada uno de los materiales evaluados en vías de bajos volúmenes de tránsito y contrastarlo con las soluciones tradicionalmente usadas teniendo en cuenta su desempeño y durabilidad.

## 5.5. Perspectivas

Los resultados obtenidos en este trabajo servirán de guía para la evaluación del desempeño de productos y/o tecnologías mediante la implementación de la metodología propuesta, lo cual potencializara el uso de tecnologías alternativas para infraestructura vial en el país

La implementación de esta metodología tiene como objetivo estandarizar el uso de técnicas de laboratorio adecuadas para evaluar el desempeño y la durabilidad de suelos viales aditivados con productos químicos estabilizantes.

La investigación realizada tiene gran pertinencia tecnológica puesto que a nivel nacional hay un gran campo de aplicación debido a la magnitud de la red terciaria, las vías de bajo volumen de tránsito y las carreteras no pavimentadas existentes, que constituyen un gran reto de mejora para generar impactos positivos en las zonas rurales del país.

En el escenario actual en el que confluyen: un mercado de escala nacional e internacional, una problemática exigente de soluciones innovadoras y un país en una carrera de grandes proporciones para la mejora de su infraestructura vial, los resultados de esta investigación promueve estrategias para consolidar procesos de Investigación, Desarrollo e Innovación I+D+i para la asertiva provisión de soluciones tecnológicas para los caminos rurales y vías de bajos volúmenes de tránsito.

---

## REFERENCIAS

---

AAMA 2603, Voluntary specification, performance requirements and test procedures for pigmented organic coatings on aluminum extrusions and panels (with coil coating appendix). American Architectural Manufacturers Association. USA (2017). Recuperado el 11 de enero de 2020 de [https://infostore.saiglobal.com/en-us/Standards/AAMA-2603-2017A-25\\_SAIG\\_AAMA\\_AAMA\\_50/](https://infostore.saiglobal.com/en-us/Standards/AAMA-2603-2017A-25_SAIG_AAMA_AAMA_50/)

AATCC -TM 111, Resistencia a la intemperie de los textiles. USA (2015). <https://members.aatcc.org/store/tm111/522/>

ABNT NBR 15380:2015, Tintas para construção civil — Método para avaliação de desempenho de tintas para edificações não industriais — Resistência à radiação UV e à condensação de água pelo ensaio acelerado. Brasil (2015). Recuperado el 11 de enero de 2020 de <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=345825>

AbouKhadra, A., Zidan, A. F., & Gaber, Y. (2018). Experimental evaluation of strength characteristics of different Egyptian soils using enzymatic stabilizers. *Cogent Engineering*, 5(1), 1–11. <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1517577>

Alazigha, D. P., Indraratna, B., Vinod, J. S., & Heitor, A. (2018). Mechanisms of stabilization of expansive soil with lignosulfonate admixture. *Transportation Geotechnics*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.11.001>

Al-Mukhtar, M., Khattab, S., & Alcover, J.-F. (2012). Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. *Engineering Geology*, 139(140), 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.04.004>

Al-Taie, A., Disfani, M. M., Evans, R., Arulrajah, A., & Horpibulsuk, S. (2016). Swell-Shrink Cycles of Lime Stabilized Expansive Subgrade. *Advances in Transportation Geotechnics 3. The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016)*, 143, 615–622. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.083>

Amini, O., & Ghasemi, M. (2019). Laboratory study of the effects of using magnesium slag on the geotechnical properties of cement stabilized soil. *Construction and Building Materials*, 223, 409–420. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.011>

Anagnostopoulos, C. A. (2015). Strength properties of an epoxy resin and cement-stabilized silty clay soil. *Applied Clay Science*, 114, 517–529. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.07.007>

Andrade, J., Fernández-González, V., López-Mahía, P., & Muniategui, S. (2019). A low-cost system to simulate environmental microplastic weathering. *Marine Pollution Bulletin Journal*, 149, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110663>

AASHTO T 267-86. (2008). Standard Method of Test for Determination of Organic Content in Soils by Loss on Ignition | Engineering360. AASHTO. <https://standards.globalspec.com/std/13053342/AASHTO T 267>

Angelone, S., Garibay, M. T., & Cauhapé, M. (2006). PERMEABILIDAD DE SUELOS. In Universidad Nacional de Rosario, Colombia. Recuperado el 06 de julio de 2020 de [https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiygeotecnia/Permeabilidad en Suelos.pdf](https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiygeotecnia/Permeabilidad%20en%20Suelos.pdf)

ASTM C1589 / C1589M, Standard Practice for Outdoor Weathering of Construction Seals and Sealants (2018). <https://www.astm.org/Standards/C1589.htm>

ASTM C732, Standard Test Method for Aging Effects of Artificial Weathering on Latex Sealants (2017). <https://www.astm.org/Standards/C732.htm>

ASTM D1556. (2015). Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by Sand-Cone Method. [https://doi.org/10.1520/D1556\\_D1556M-15E01](https://doi.org/10.1520/D1556_D1556M-15E01)

ASTM D1670 / D1670M - 11(2018), Standard Test Method for Failure End Point in Accelerated and Outdoor Weathering of Bituminous Materials (2018). <https://www.astm.org/Standards/D1670.htm>

ASTM D1883. (2016). ASTM-D1883–16: Standard Test Method for California Bearing Ratio test of Lab Compacted Soil. ASTM International, D1883 (16), 1–14. <https://doi.org/10.1520/D1883-16>

ASTM D2166. (2016). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. [https://doi.org/10.1520/D2166\\_D2166M-16](https://doi.org/10.1520/D2166_D2166M-16)

ASTM D2487. (2017). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM Standards. <https://doi.org/10.1520/D2487-17>

ASTM D3282. (2015). Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. ASTM Standards, D3282 – 15(November 1993), 1–6. <https://doi.org/10.1520/D3282-09>.

ASTM D3987. (2012). Standard Practice for Shake Extraction of Solid Waste with Water, ASTM International, West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/D3987-12>

ASTM D422. (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. D422 – 63(Reapproved), 1–8. <https://doi.org/10.1520/D0422-63R07E02.2>

ASTM D4318. (2005). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. Report, 04, 1–14. <https://doi.org/10.1520/D4318-10>.

ASTM D4329, Standard Practice for Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus Exposure of Plastics (2013). <https://www.astm.org/Standards/D4329.htm>

ASTM D4587 - 11(2019) e1, Standard Practice for Fluorescent UV-Condensation Exposures of Paint and Related Coatings (2019). <https://www.astm.org/Standards/D4587.htm>

ASTM D4799 / D4799M, Standard Practice for Accelerated Weathering Test Conditions and Procedures for Bituminous Materials (Fluorescent UV, Water Spray, and Condensation Method) (2017). <https://www.astm.org/Standards/D4799.htm>

ASTM D4944. (2018). Standard Test Method for Field Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Calcium Carbide Gas Pressure Tester. <https://doi.org/10.1520/D4944-18>

ASTM D5010, Standard Guide for Testing Printing Inks and Related Materials (2008). <https://www.astm.org/Standards/D5010.htm>

ASTM D5084-16a. (2016). Designation: D5084 – 16a Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter 1. <https://doi.org/10.1520/D5084-16A>

ASTM D516. (2016). Standard Test Method for Sulfate Ion in Water. American Society for Testing And Materials, 95(Reapproved), 3–6. <https://doi.org/10.1520/D0516-16>

ASTM D5208, Standard Practice for Fluorescent Ultraviolet (UV) Exposure of Photodegradable Plastics (2014). <https://www.astm.org/Standards/D5208.htm>

ASTM D5272 - 08(2013). (2013). Standard Practice for Outdoor Exposure Testing of Photodegradable Plastics. <https://www.astm.org/Standards/D5272.htm>

ASTM D5550. (2014). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. 1–8. <https://doi.org/10.1520/D0854-10>.

ASTM D559. (2015). Standard test methods for wetting and drying compacted soil-cement Mixtures (No. D559-96). 1–6. <https://doi.org/10.1520/D0560-03>.

ASTM D5819, Standard Guide for Selecting Test Methods for Experimental Evaluation of Geosynthetic Durability (2021). <https://www.astm.org/Standards/D5819.htm>

ASTM D698. (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction of Soil Using Standard Effort. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0698-12E01>

ASTM E2835. (2015). Standard Test Method for Measuring Deflections using a Portable Impulse Plate Load Test Device. <https://doi.org/10.1520/E2835-11R15>

ASTM F1164, Standard Test Method for Evaluation of Transparent Plastics Exposed to Accelerated Weathering Combined with Biaxial Stress (2019). <https://www.astm.org/Standards/F1164.htm>

ASTM G154. (2016). Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials. <https://doi.org/10.1520/G0154-16>

ASTM G169. (2013). Standard Guide for Application of Basic Statistical Methods to Weathering Tests 1. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/G0169-01R13>

Barbieri, D. M., Hoff, I., & Mai Britt, E. M. (2019). Organosilane and lignosulfonate as innovative stabilization techniques for crushed rocks used in road unbound layers. *Transportation Geotechnics*, 22(2020), 100308. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100308>

Bauzá Castelló, J. D. (2015). EL TRATAMIENTO DE LOS SUELOS ARCILLOSOS CON CAL. COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y EVOLUCIÓN A LARGO PLAZO ANTE CAMBIOS DE HUMEDAD. Universidad de Sevilla, Tesis Doctoral. <https://idus.us.es/handle/11441/32957>

Besoain, E. (1985). Mineralogía de arcillas de suelos. In Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura IICA (Ed.), Serie de libros y materiales educativos (No. 60) (Bib. Orton). Centro Interamericano de Documentación e Información Agrícola.

Bielza Feliú, A. (1999). Manual de técnicas de mejora del terreno (E. Gráfico (Ed.)).

Braja M Das. (2013). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (C. Learning (Ed.); Cuarta Ed).

Branyikova, I., Filipenska, M., Urbanova, K., Ruzicka, M. C., Pivokonsky, M., & Branyik, T. (2018). Physicochemical approach to alkaline flocculation of *Chlorella vulgaris* induced by calcium phosphate precipitates. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 166, 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.03.007>

Brinkgereve, R. B. J. (2004). Plaxis Versión 8 Manual de Referencia. DELFT University of Technology & PLAXIS BV. . Recuperado el 06 de junio de 2020 de [https://www.civil.iitb.ac.in/~ajuneja/Plaxis%20program/Version%208%20Introductory/Manuals/English/V84-3\\_Reference.pdf](https://www.civil.iitb.ac.in/~ajuneja/Plaxis%20program/Version%208%20Introductory/Manuals/English/V84-3_Reference.pdf)

Buol, S. W., Southard, R. J., Graham, R. C., & McDaniel, P. A. (2011). Soil Genesis and Classification: Sixth Edition. In Wiley-Blackwell (6th Edition). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9780470960622>

Cabezas, R., & Cataldo, C. (2019). Influence of chemical stabilization method and its effective additive concentration (EAC) in non-pavement roads. A study in andesite-based soils. *Cogent Engineering*, 6(1), 1–17. <https://doi.org/10.1080/23311916.2019.1592658>

Camacho Tauta, J., Reyes Ortiz, Ó. J., & Mayorga Antolínez, C. (2008). Curado natural y acelerado de una arcilla estabilizada con aceite sulfonado. *Ingeniería y Desarrollo*, 24, 48–62. <http://www.scielo.org.co/pdf/inde/n22/n24a05.pdf>

Camacho Tauta, J., Reyes Ortiz, O. J., & Mayorga, C. (2010). Efecto de la radiación UV en arcillas expansivas tratadas con aceite sulfonado. *Ingeniería y Competitividad*, 12(2), 41–50. <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/3439/1/Art03-41.pdf>

Capel Martínez, J., Linares González, J., & Huertas García, F. (2013). La arcilla como material cerámico. Características y comportamiento. Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada, 8(1983), 479–490. <https://doi.org/10.30827/cpag.v8i0.1224>

Cardoso Malko, J. A., Brazetti, R., Casagrande, M. D. T., & de Albuquerque e Silva, B. H. (2014). Application of Enzymes for Stabilization of Soils in Paving. Key Engineering Materials, 668(November), 150–159. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.668.150>

Carrero, G. M., & Ramirez, M. P. (2020). Efecto de la adición del PET en la resistencia CBR de la subrasante con fines de mejoramiento para pavimentación en la Prolongación Jr. Manuel del Águila Cdra. 05, Moyobamba – 2020. Universidad César Vallejo, Trabajo de Grado. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/57744>

Cedeño Plaza, D. (2013). Investigación de la estabilización de suelos con enzima aplicado a la sub-rasante de la avenida Quitumbe - Ñan, Cantón Quito. Universidad Central del Ecuador, Trabajo de Grado. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Cepeda Dovala, J. M. (2007). Química de suelos (Segunda edición). Trillas.

Chee, S. S., Jawaid, M., Sultan, M. T. H., Alothman, O. Y., & Chuah Abdullah, L. (2019). Accelerated weathering and soil burial effects on colour, biodegradability and thermal properties of bamboo/kenaf/epoxy hybrid composites. Polymer Testing, 79, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106054>

Chen, H., & Wang, Q. (2006). The behaviour of organic matter in the process of soft soil stabilization using cement. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 65(4), 445–448. <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0030-1>

Colciencias. (2018). Informe Final “Programa de Investigación e Innovación Tecnológica en Nuevos Materiales y Procesos Constructivos para Infraestructura Vial Red INNOVIAL”. Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación. Colombia.

Colmenares Roldán, G. J. (2015). Desarrollo de estabilizantes de suelos para la construcción de infraestructura vial a partir de subproductos de la explotación minera. Universidad de Antioquia, Trabajo de Grado de Maestría. <http://opac.udea.edu.co/cgi-lib/?infile=details.glu&luid=1415194&rs=13226129&hitno=3>

Corzo Dardón, C. C. (2013). 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. Universidad de San Carlos de Guatemala, Trabajo de Grado. [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_1329\\_Q.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1329_Q.pdf)

Croll, S. G. (2019). Reciprocity in weathering exposure and the kinetics of property degradation. Progress in Organic Coatings, 127, 140–150. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.10.003>

Cuipal Chávez, B. K. (2018). Estabilización de la subrasante de suelo arcilloso con uso de polímero sintético en la carretera Chachapoyas – Huancas, Amazonas. Universidad César Vallejo, Trabajo de Grado. <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/25124>

Cuisinier, O., Auriol, J. C., Le Borgne, T., & Deneele, D. (2011). Microstructure and hydraulic conductivity of a compacted lime-treated soil. *Engineering Geology*, 123(3), 187–193. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.07.010>

Currin, D. D., Allen, J. J., & Little, D. N. (1976). Validation of Soil Stabilization Index System with Manual Development (Defense Technical Information Center (Ed.)). Seiler Research Laboratory, United States Air Force Academy.

Daniels, J. L., & Hourani, M. S. (2009). Soil Improvement with Organo-Silane. *Advances in Ground Improvement*, 217–224. [https://doi.org/10.1061/41025\(338\)23](https://doi.org/10.1061/41025(338)23)

Dash, S. K., & Hussain, M. (2012). Lime Stabilization of Soils: Reappraisal. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(6), 707–714. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000431](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000431)

Departamento Nacional de Planeación. (2018). Ficha de caracterización territorial del municipio de Valencia, Córdoba. Recuperado el 05 de abril de 2020 de <https://terridata.dnp.gov.co/index-app.html#/perfiles/23855>

Eaton, R. A., & Beaucham, R. E. (1992). Technical manual. Unsurfaced road maintenance management (Vol. 92, Issue 26, pp. 1–50). US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory.

Echeverría, M., & Echeverría, C. A. (2007). Estudio y evaluación de materiales compuestos de matriz asfáltica modificado con polímeros (MAP) para su aplicación como recubrimientos anticorrosivos. Universidad de Matanzas, Trabajo de Grado.

Fabre, V. E., Bizzotto, M. B., & Tirner, J. C. (2010). Comportamiento Resistente de Suelos Orgánicos Estabilizados con Tanino. *Información Tecnológica*, 21(2), 103–112. <https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4147it.08>

Faria, F. C. de. (2015). Produção de tintas naturais para construção civil: testes de preparação, aplicação e avaliação do intemperismo acelerado. Universidade Federal Do Paraná, Trabajo de Grado de Maestría.

Farouk, A., & Shahien, M. M. (2013). Ground improvement using soil-cement columns: Experimental investigation. *Alexandria Engineering Journal*, 52, 733–740. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.08.009>

Fasihnikoutalab, M. H., Asadi, A., Unluer, C., Huat, B. K., Ball, R. J., & Pourakbar, S. (2017). Utilization of Alkali-Activated Olivine in Soil Stabilization and the Effect of Carbonation on Unconfined Compressive Strength and Microstructure. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(6), 06017002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001833](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001833)

Fechine, G. J. M., Santos, J. A. B. dos, & Rabello, M. S. (2006). Avaliação da fotodegradação de poliolefinas através de exposição natural e artificial. *Química Nova*, 29(4), 674–680. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422006000400009>

Franco Urquiza, E. A., & Maspoch Rulduà, M. L. (2009). Estructura general de las arcillas utilizadas en la preparación de nanocompuestos poliméricos - Dialnet. *Ingenierías*, 12(44), 35–41. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3015926>

Fuentes-Talavera, F. J., Silva-Guzmán, J. A., Quintana-Uscamayta, F., Turrado-Saucedo, J., Cárdenas Oscanoa, A. J., Rodríguez-Anda, R., & Robledo-Ortiz, J. R. (2015). Comportamiento al intemperismo natural de compositos polipropileno-madera. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(27), 102–113.

Gao, T., He, Z., Hihara, L. H., Mehr, H. S., & Soucek, M. D. (2019). Outdoor exposure and accelerated weathering of polyurethane/polysiloxane hybrid coatings. *Progress in Organic Coatings*, 130, 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.01.046>

García Gonzales, A. (2016). Determinación de la resistencia de la subrasante incorporando cal estructural en el suelo limo arcilloso del sector 14 Mollepampa de Cajamarca. Universidad Privada del Norte, Trabajo de Grado. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/7327>

Garnai Hirsch, S., Barel, B., & Segal, E. (2019). Characterization of surface phenomena: probing early stage degradation of low-density polyethylene films. *Polymer Engineering and Science*, 59(S1), E129–E137. <https://doi.org/10.1002/pen.24886>

GM-9125P, Procedures for Laboratory Accelerated Exposure of Automotive Materials. USA (2011). <https://www.document-center.com/standards/show/GM-9125P>

Georgees, R. N., Hassan, R. A., & Evans, R. P. (2017). A potential use of a hydrophilic polymeric material to enhance durability properties of pavement materials. *Construction and Building Materials*, 148(1), 686–695. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.086>

Ghobadi, M. H., Abdilor, Y., & Babazadeh, R. (2013). Stabilization of clay soils using lime and effect of pH variations on shear strength parameters. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 611–619. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0563-7>

Gigat, Sennova, & Sena. (2018) Guía interactiva para el desarrollo de proyectos de innovación. Recuperado el 11 de febrero de 2020 de <https://www.gidpi.com/#/Login>

Gil, A. P., Mascorro, A. G., Banda, A. E., Agüero, H. J. M., & Cantú, D. J. (2003). Dosis de nitrógeno y número de riesgo en el rendimiento y calidad de la semilla de algodón. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 26(2), 95–99. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61026204>

Gobernación de Antioquia, S. (2015). *Informe final proyecto “Estudio, selección y estructuración de sistemas tecnológicos alternativos para estabilización y tratamiento de la red vial secundaria departamental. Desarrollo de pruebas piloto en subregiones de Antioquia.”* Secretaría de Infraestructura Física de la Gobernación de Antioquia, Colombia.

González Hernández, O. (2013). Germinación y longevidad de semillas de genotipos de Pitahaya (*Hylocereus* spp) y Pitahaya (*Stenocereus* spp). Colegio de Postgraduados, Trabajo de Grado de Maestría.

Harshita, S. (2018). Soil Stabilisation using Lime. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 887, 2321–9653. [www.ijraset.com](http://www.ijraset.com)

Hausmann, M. R. (1990). *Engineering principles of ground modification* (McGraw-Hill (Ed.); Ilustrada). McGraw-Hill.

He, S., Yu, X., Banerjee, A., & Puppala, A. J. (2018). Expansive Soil Treatment with Liquid Ionic Soil Stabilizer. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2672(52), 185–194. <https://doi.org/10.1177/0361198118792996>

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2010). *Metodología de la investigación* (S. A. D. C. V. McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES (ed.); 5ta Ed). McGraw-Hill. [www.FreeLibros.com](http://www.FreeLibros.com)

Hidalgo Benavides, D. I. (2016). Análisis comparativo de los procesos de estabilización de suelo con enzimas orgánicas y suelo-cemento, aplicado a suelos arcillosos de sub-rasante. Universidad Técnica de Ambato, Trabajo de Grado. [https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/24610/1/Tesis\\_1090 - Hidalgo Benavides Deivys Ismael.pdf](https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/24610/1/Tesis_1090_-_Hidalgo_Benavides_Deivys_Ismael.pdf)

Hildebrand, R., Keskinen, E., & Navarrete, J. A. R. (2008). Vehicle vibrating on a soft compacting soil half-space: Ground vibrations, terrain damage, and vehicle vibrations. *Journal of Terramechanics*, 45(4), 121–136.

Horpibulsuk, S., Rachan, R., Chinkulkijniwat, A., Raksachon, Y., & Suddepong, A. (2010). Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations. *Construction and Building Materials*, 24(10), 2011–2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.011>

Hoyos Palacio, L. M., Espinel Blanco, E., & Quintero, M. Y. (2015). Caracterización físicoquímica de cuarzo en el municipio de La Playa de Belén, departamento de Norte de Santander. *Tecnura*, 19(45), 41–51. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a03>

Ideam. (2011). MAPAS DE PRECIPITACIÓN PROMEDIO EN COLOMBIA (p. 15). Grupo de Climatología y Agrometeorología Subdirección de Meteorología - Ideam Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Colombia. Recuperado el 05 de abril de 2020 de <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/seguimiento>

Ikeagwuani, C. C., & Nwonu, D. C. (2019). Emerging trends in expansive soil stabilisation: A review. In *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* (Vol. 11, Issue 2, pp. 423–440). Chinese Academy of Sciences. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.013>

Ingles, O. G., & Metcalf, J. B. (1973). *Soil stabilization: principles and practice* (Ed Butterworths (Ed.)). Butterworth and Company Publishers Limited.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi, I. (2006). *Métodos analíticos de laboratorio de suelos* (IGAC (Ed.); Sexta Ed). Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC Departamento Administrativo Nacional de Estadística, DANE. Colombia.

Instituto Nacional de Vías, INVÍAS. (2013). *Especificaciones generales de construcción de carreteras. Capítulo 3. Afirmados, Subbases y Bases*. Colombia.

Ismail, A. I. M., & Ryden, N. (2014). The Quality Control of Engineering Properties for Stabilizing Silty Nile Delta Clay Soil, Egypt. *Geotechnical and Geological Engineering* Volume, 32, 773–781. <https://doi.org/10.1007/s10706-014-9756-5>

ISO 11507, Paints and varnishes — Exposure of coatings to artificial weathering — Exposure to fluorescent UV lamps and water 10 (2007). <https://www.iso.org/standard/37489.html>

ISO 13320. (2009). Particle size analysis — Laser diffraction methods. <https://www.iso.org/standard/44929.html>

James, J. (2020). Sugarcane press mud modification of expansive soil stabilized at optimum lime content: Strength, mineralogy and microstructural investigation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(2), 395–402.

Jaramillo, D. F. (2014). *Universidad Nacional de Colombia: El suelo: origen, propiedades, espacialidad* (sede M.-F. de C. Universidad Nacional de Colombia (ed.); segunda ed).

Jayanthi, P. N. V., & Singh, D. N. (2016). Utilization of Sustainable Materials for Soil Stabilization: State-of-the-Art. *Advances in Civil Engineering Materials*, 5(1), 46–79. <https://doi.org/10.1520/ACEM20150013>

Jerez, L. D., Gómez, O. E., & Murillo, C. A. (2018). Stabilization of Colombian lateritic soil with a hydrophobic compound (organosilane). *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(6), 639–646. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2018.06.001>

Jha, A. K., & Sivapullaiah, P. V. (2016). Volume change behavior of lime treated gypseous soil - influence of mineralogy and microstructure. *Applied Clay Science*, 119, 202–212. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.09.017>

Jones, D., & Surdahl, R. (2014). New Procedure for Selecting Chemical Treatments for Unpaved Roads. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2433(1), 87–99. <https://doi.org/10.3141/2433-10>

Junco del Pino, C., Mario, J., & Piusseaut, T. (2013). Consideraciones acerca de la actividad de las arcillas en la estabilización de suelos con sales cuaternarias de amonio. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 7(3), 1–12. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193930080004>

Kestler, M. (2009). Stabilization selection guide for aggregate-and native-surfaced low-volume roads (p. 10). U.S. Department of Agriculture (USDA) Forest Service.

Khan, T. A., & Taha, M. R. (2015). Effect of Three Bioenzymes on Compaction, Consistency Limits, and Strength Characteristics of a Sedimentary Residual Soil. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2015/798965>

Katz, L. E., Rauch, A. F., Liljestrand, H. M., Harmon, J. S., Shaw, K. S., & Albers, H. (2001). Mechanisms of soil stabilization with liquid ionic stabilizer. *Transportation Research Record*, 1757, 50–57. <https://doi.org/10.3141/1757-06>

Kolay, Aminur, M. R., Taib, S. N. L., & Zain, M. I. S. M. (2011). Stabilization of Tropical Peat Soil from Sarawak with Different Stabilizing Agents. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29, 1135–1141. <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9441-x>

Kolay, Aminur, M., & Taib, S. (2013). Effect of alkali on tropical peat stabilized with different stabilizers. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 5(2), 189–197. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2011.05.02.189-197>

Kumano, N., Mori, K., Kato, M., & Ishii, M. (2019). Degradation of scratch resistance of clear coatings by outdoor weathering. *Progress in Organic Coatings*, 135, 574–581. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.06.034>

Kushwaha, S. S., Kishan, D., Chauhan, M. S., & Khetawath, S. (2018). Stabilization of Red mud using eko soil enzyme for highway embankment. *Materials Today: Proceedings*, 5, 20500–20512. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.427>

Kuvshinnikova, O., Boven, G., & Pickett, J. E. (2018). Weathering of aromatic engineering thermoplastics: Comparison of outdoor and xenon arc exposures. *Polymer Degradation and Stability*, 160, 177–194. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.12.011>

Lara Lopez, T. (2002). Estudio físicoquímico de la modificación de suelos arcillosos. Universidad Autónoma de Querétaro, Tesis Doctoral.

Latifi, N., Horpibulsuk, S., Meehan, C. L., Abd Majid, M. Z., Tahir, M. M., & Mohamad, E. T. (2017). Improvement of problematic soils with biopolymer-an environmentally friendly soil stabilizer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2), 1–11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001706](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001706)

Latifi, N., Safuan, A., Rashid, A., Siddiqua, S., Zaimi, M., & Majid, A. (2016). Strength measurement and textural characteristics of tropical residual soil stabilised with liquid polymer. *Measurement*, 91, 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.05.029>

Lekha, B. M., Ravi Shankar, a. U., & Sarang, G. (2013). Fatigue and Engineering Properties of Chemically Stabilized Soil for Pavements. *Indian Geotechnical Journal*, 43(1), 96–104. <https://doi.org/10.1007/s40098-012-0031-5>

Liu, J., Chen, Z., Prasanna Kanungo, D., Song, Z., Bai, Y., Wang, Y., Li, D., & Qian, W. (2019). Topsoil reinforcement of sandy slope for preventing erosion using water-based polyurethane soil stabilizer. *Engineering Geology*, 252, 125–135. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.03.003>

Lizárraga Laborín, L. L., Quiroz Castillo, J. M., Encinas, J. C., Castillo Ortega, M. M., Burruel Ibarra, S. E., Romero García, J., Torres Ochoa, J. A., Cabrera German, D., & Rodríguez Felix, D. E. (2018). Accelerated weathering study of extruded polyethylene/poly (lactic acid)/chitosan films. *Polymer Degradation and Stability*, 155, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.06.007>

Little, D. N., & Nair, S. (2009). Recommended practice for stabilization of subgrade soils and base materials (p. 67). Texas Transportation Institute, National Cooperative Highway Research Program NCHRP. [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp\\_w144.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_w144.pdf)

Llano, E., Ríos, D., Obando, J. E., & Gloria, R. (2017). Rehabilitación de carreteras no pavimentadas. Aplicación y evaluación de una metodología de diagnóstico. Congreso Ibero-Latinoamericano Del Asfalto.

López-Lara, T., Bosco Hernández-Zaragoza, J., Horta-Range, J., Coronado-Márquez, A., & Castaño-Meneses, V. M. (2010). Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 11(3), 159–168. <http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/MAY10/lopez.pdf>

Ma, C., Chen, B., & Chen, L. (2016). Effect of organic matter on strength development of self-compacting earth-based construction stabilized with cement-based composites. *Construction and Building Materials*, 123, 414–423. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.018>

Mai Anh Bui, T., Vuong Nguyen, T., Mai Nguyen, T., Ha Hoang, T., Thanh Huong Nguyen, T., Hoan Lai, T., Nga Tran, T., Hau Nguyen, V., Hai Hoang, V., Lu Le, T., Lam Tran, D., Chien Dang, T., Trung Vu, Q., Nguyen-Tri, P., Quoc Viet, H., Giay, C., & Nam, V. (2020). Investigation of crosslinking, mechanical properties and weathering stability of acrylic polyurethane coating reinforced by SiO<sub>2</sub> nanoparticles issued from rice husk ash. *Materials Chemistry and Physics*, 241, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122445>

Mallela, J., Von Quintus, H., & Smith, K. L. (2004). Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design.

Markou, I. N., & Droudakis, A. I. (2013). Factors Affecting Engineering Properties of Microfine Cement Grouted Sands. *Geotechnical and Geological Engineering*, 31, 1041–1058. <https://doi.org/10.1007/s10706-013-9631-9>

Marto, A., Latifi, N., & Sohaei, H. (2013). Stabilization of laterite soil using GKS soil stabilizer. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18(18), 521–532.

Mayers, J. J., Landels, A. R., Allen, M. J., & Albers, E. (2019). An energy and resource efficient alkaline flocculation and sedimentation process for harvesting of *Chromochloris zofingiensis* biomass. *Bioresource Technology Reports*, 9(2020), 100358. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100358>

Menapace, I., Yiming, W., & Masad, E. (2017). Chemical analysis of surface and bulk of asphalt binders aged with accelerated weathering tester and standard aging methods. *Fuel*, 202, 366–379. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.042>

Mitchell, J. (1981). Soil improvement-state of the art report. 11th Int. Conf. on SMFE, 509–565. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10007810242/>

Mousavi, S. E., & Karamvand, A. (2017). Assessment of strength development in stabilized soil with CBR PLUS and silica sand. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 4(4), 412–421. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.02.002>

Mutaz, E., Shamrani, M. A., Puppala, A. J., & Dafalla, M. A. (2011). Evaluation of Chemical Stabilization of a Highly Expansive Clayey Soil. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2204(1), 148–157. <https://doi.org/10.3141/2204-19>

Naeini, S. A., Naderinia, B., & Izadi, E. (2012). Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(6), 943–949. <https://doi.org/10.1007/s12205-012-1388-9>

Negi, A. S., Faizan, M., Siddharth, D. P., & Singh, R. (2013). Soil stabilization using lime. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2(2), 448–453.

Nicholson, P. G. (2015). Admixture Soil Improvement. In P. G. Nicholson (Ed.), *Soil Improvement and Ground Modification Methods* (pp. 231–288). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-408076-8.00011-X>

Nieto Leal, A., Camacho Tauta, J. F., & Ruiz Blanco, E. F. (2009). Determinación de parámetros para los modelos elastoplásticos mohr-coulomb y hardening soil en suelos arcillosos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 75–91. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75012333008>

Nizy Eujine, G., Chandrakaran, S., & Sankar, N. (2017). Influence of enzymatic lime on clay mineral behavior. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(454), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3238-z>

Nshimiyimana, P., Fagel, N., Messan, A., Wetshondo, D. O., & Courard, L. (2020). Physico-chemical and mineralogical characterization of clay materials suitable for production of stabilized compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 241(2020), 118097. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118097>

NTC 5264. (2018). Calidad de suelo. Determinación del pH. ICONTEC

NTC 5268. (2014). Calidad de suelo. Determinación de la capacidad de intercambio catiónico. ICONTEC

NTC 5596. (2008). Calidad de suelo. Determinación de la conductividad eléctrica. Resultados y análisis. ICONTEC

Obianyoye, I. I., Onwualu, A. P., & Soboyejo, A. B. O. (2020). Mechanical behaviour of lateritic soil stabilized with bone ash and hydrated lime for sustainable building applications. *Case Studies in Construction Materials*, 12, 1–12. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2020.E00331>

Önal, O. (2015). Lime Stabilization of Soils Underlying a Salt Evaporation Pond: A Laboratory Study. *Marine Georesources & Geotechnology*, 33(5), 391–402. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2014.909297>

Onyejekwe, S., & Gurmel, G. (2015). Soil stabilization using proprietary liquid chemical stabilizers: sulphonated oil and a polymer. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74, 651–665. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0667-8>

Orobio, A. (2011). Consideraciones para el diseño y construcción de vías en afirmado estabilizadas con cloruro de calcio. *Dyna*, 78(165), 93–100

Orozco Esponisa, D. (2010). Diseño y construcción de una cámara de envejecimiento acelerado por temperatura para polímeros. Instituto Politécnico Nacional, Trabajo de Grado.

Panova, I. G., Khaydapova, D. D., Ilyasov, L. O., Umarova, A. B., & Yaroslavov, A. A. (2020). Polyelectrolyte complexes based on natural macromolecules for chemical sand/soil stabilization. *Colloids and Surfaces A*, 590, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124504>

Paolini, R., Terraneo, G., Ferrari, C., Sleiman, M., Muscio, A., Metrangolo, P., Poli, T., Destailats, H., Zinzi, M., & Levinson, R. (2020). 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. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 205, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110264>

Patel, A. (2019). Geotechnical Investigations and Improvement of Ground Conditions. In W. Publishing (Ed.), *Geotechnical Investigations and Improvement of Ground Conditions (Ilustrada)*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/c2018-0-01307-9>

Peng, H. T., Su, H. T., Zhang, X. P., & Wang, J. (2011). An Experimental Comparison of Compressive Strengths of Soils Stabilized with Enzyme and Ground Quicklime. *Advanced Materials Research*, 280, 9–12. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.280.9>

Petry, T. M., & Little, D. N. (2002). Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures. History, practice, and future. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14, 447–460.

Pickett, J. E., Kuvshinnikova, O., Sung, L.-P., & Ermi, B. D. (2019). Accelerated weathering parameters for some aromatic engineering thermoplastics. *Polymer Degradation and Stability*, 166, 135–144. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.05.028>

Pooni, J., Giustozzi, F., Robert, D., Setunge, S., & O'donnell, B. (2019). Durability of enzyme stabilized expansive soil in road pavements subjected to moisture degradation. *Transportation Geotechnics*, 21, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100255>

Ravines Merino, M. A. (2010). Pruebas con un producto enzimático como agente estabilizador de suelos para carreteras, Universidad de Piura, Trabajo de Grado. [http://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/1354/ICI\\_185.pdf?sequence=1](http://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/1354/ICI_185.pdf?sequence=1)

Reyes Ortiz, O. J., & Camacho Tauta, J. F. (2008). Effect of ultraviolet radiation on an asphalt mixture's mechanical and dynamic properties. *Ingeniería e Investigación*, 28(3), 22–27.

Restrepo, G., Henao, R., & García, A. (2017). Plan Piloto Putumayo: una estrategia de articulación interinstitucional para la intervención de vías terciarias utilizando tecnologías alternativas. Congreso Ibero-Latinoamericano Del Asfalto.

Rezaeimalek, S., Huang, J., & Bin-Shafique, S. (2017). Evaluation of curing method and mix design of a moisture activated polymer for sand stabilization. *Construction and Building Materials*, 210–220. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.093>

Rezaeimalek, S., Nasouri, A., Huang, J., Bin-Shafique, S., & Gilazghi, S. T. (2017). Comparison of short-term and long-term performances for polymer-stabilized sand and clay. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 4(2), 145–155. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.01.003>

Rico Rodríguez, A., & Castillo, H. del. (1998). La ingeniería de suelos en las vías terrestres (L. (Noriega Editores) (Ed.); volumen 2).

Rivera, J. F., Aguirre-Guerrero, A., Mejía de Gutiérrez, R., & Orobio, A. (2020). Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión). *Informador Técnico*, 84(2), 43–67. <https://doi.org/10.23850/22565035.2530>

Rodríguez Pardo, P. A. (2017). Evaluación del potencial de suelos lateríticos (ripió) para obras de infraestructura vial en el Vichada. Universidad Nacional de Colombia. Trabajo de Grado de Maestría.

Rojas Esparza, F. A., & Camargo Sánchez, A. (2004). Estabilización físico-química de suelos finos para subrasantes de vías rurales. Universidad Industrial de Santander, Trabajo de Grado.

Rudramurthy, G., Ramasamy, P., & Rajendran, A. (2019). Stabilization of Clayey Soil Using Lime and Prosopis Fibers. *Conference of the Arabian Journal of Geosciences: Recent Advances in Geo-Environmental Engineering, Geomechanics and Geotechnics, and Geohazards*, 259–261. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-01665-4\\_60](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01665-4_60)

Sadler, E. J., & Vecere, A. (1995). Silane treatment of mineral fillers practical aspects. *Plastic Rubber and Composites Processing and Applications*, 24, 271–275.

Sahoo, J. P., & Pradhan, P. K. (2010). Effect of Lime Stabilized Soil Cushion on Strength Behaviour of Expansive Soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 28(6), 889–897. <https://doi.org/10.1007/s10706-010-9332-6>

Saiyouri, N., Tessier, D., & Hicher, P. Y. (2004). Experimental study of swelling in unsaturated compacted clays. *Clay Minerals*, 39(4), 469–479. <https://doi.org/10.1180/0009855043940148>

Salimi, M., & Ghorbani, A. (2019). Mechanical and compressibility characteristics of a soft clay stabilized by slag-based mixtures and geopolymers. *Applied Clay Science*, 184, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105390>

Shao, L., Liu, J., & Ding, Y. (2013). Influence of organic matter on the stabilization soft soil with cement mixed method. In A. B. Zhao (Ed.), *Advances in Civil Engineering and Building Materials-Chang, Al Bahar & Zhao (Eds)* (pp. 761–764). Taylor & Francis Group.

Sharma, L. K., Sirdesai, N. N., Sharma, K. M., & Singh, T. N. (2017). Experimental study to examine the independent roles of lime and cement on the stabilization of a mountain soil: A comparative study. *Applied Clay Science*, 152, 183–195. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.11.012>

Silva-Yumi, J., Cazorla Martínez, R., Medina Serrano, C., & Chango Lescano, G. (2021). ALOFÁN, UNA NANOPARTÍCULA NATURAL PRESENTE EN ANDISOLES DEL ECUADOR, PROPIEDADES Y APLICACIONES. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de La Vida*, 33(1), 53–66. <https://doi.org/10.17163/LGR.N33.2021.05>

Sleiman, M., Chen, S., Gilbert, H. E., Kirchstetter, T. W., Berdahl, P., Bibian, E., Bruckman, L. S., Cremona, D., French, R. H., Gordon, D. A., Emiliani, M., Kable, J., Ma, L., Martarelli, M., Paolini, R., Prestia, M., Renowden, J., Revel, G. M., Rosseler, O., ... Destailats, H. (2015). Soiling of building envelope surfaces and its effect on solar reflectance-Part III: Interlaboratory study of an accelerated aging method for roofing materials. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 143, 581–590. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.07.031>

Soltani-Jigheh, H., Bagheri, M., & Amani-Ghadim, A. R. (2018). Use of hydrophilic polymeric stabilizer to improve strength and durability of fine-grained soils. *Cold Regions Science and Technology*, 157, 187–195. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.10.011>

Soltani, A., Deng, A., Taheri, A., & Mirzababaei, M. (2019). A sulphonated oil for stabilisation of expansive soils. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(11), 1285–1298. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1408270>

Songt, K., & Sandí, G. (2001). Characterization of montmorillonite surfaces after modification by organosilane. *Clays and Clay Minerals*, 49(2), 119–125.

Sosa, M., Caldo, A., Halles, F., & Thenoux, G. (2019). Guía para la evaluación y selección de aditivos estabilizadores de materiales granulares y suelos en caminos de bajo tránsito - Caso Paraguay (p. 90). Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado el 11 de junio de 2020 de <http://www.iadb.org>

Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater, 23rd. 5310 B. Total Organic Carbon (TOC)—High-Temperature Combustion Method, (2017). <https://doi.org/10.2105/SMWW.2882.104>

Suárez-Corrales, X. I., Villar-López, R. V., Corvo-Pérez, F. E., & Marrero, R. (2014). Resistencia al clima tropical de aceros galvanizados con y sin recubrimiento. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 15(1), 29–40.

Suárez Landeo, E. R., Gonzáles Mora, H. E., Cárdenas Oscanoa, A. J., & Gago Campusano, J. J. (2019). Efectos del intemperismo acelerado en las propiedades físico-mecánicas de compuestos plástico-bambú. *Revista Xilema*, 29(1), 54–76. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21704/x.v29i1.1351>

Tao, J., Lin, W., Luo, X., Qiu, X., & Wu, J. (2016). Compressive strength analysis of ionic soil stabilizer improving soil. *Key Engineering Materials*, 667, 341–346. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.667.341>

Taslimi Paein Afrakoti, M., Janalizadeh Choobbasti, A., Ghadakpour, M., & Soleimani Kutanaei, S. (2020). Investigation of the effect of the coal wastes on the mechanical properties of the cement-treated sandy soil. *Construction and Building Materials*, 239, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117848>

Terashi, M., & Juran, I. (2000, November 19). Ground Improvement - State Of The Art. In *ISRM International Symposium*. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.

Tingle, J. S., Newman, J. K., Larson, S. L., Weiss, C. A., & Rushing, J. F. (2007). Stabilization mechanisms of nontraditional additives. *Transportation Research Record*, 2(1989), 59–67. <https://doi.org/10.3141/1989-49>

Tonoz, M. C., Gokceoglu, C., & Ulusay, R. (2006). Lime stabilization of expansive Ankara clay with lime. In *Expansive soils: recent advances in characterization and treatment* (pp. 316–339). Taylor and Francis Group.

Tremblay, H., Duchesne, J., Locat, J., & Leroueil, S. (2002). Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(3), 535–546. <https://doi.org/10.1139/t02-002>

Urias, J. C. T., Rosa, A. B. de la, Velázquez, R. F., & Ambríz, A. C. (2002). Vida útil de dos barnices para exteriores mediante intemperismo artificial en madera de aile, pino y encino. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 8(1), 83–90.

Valle Arenas, W. A. (2010). Estabilización de suelos arcillosos plásticos con mineralizadores en ambientes sulfatados o yesíferos. Universidad Politécnica de Madrid, Trabajo de Grado de Maestría.

Valverde Otárola, J. C. (2011). Efectos del intemperismo en el color y calidad de superficie de la madera de *Acacia mangium*, *Cedrela odorata* y *Tectona grandis* con tres acabados. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Trabajo de Grado.

Verruijt, A. (2018). *An Introduction to Soil Mechanics* (T. N. S. Majid Hassanizadeh, Department of Earth Sciences, Utrecht University, Utrecht (ed.); Vol. 30). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-61185-3>

White, C. C., White, K. M., & Pickett, J. E. (2017). Service Life Prediction of Polymers and Plastics Exposed to Outdoor Weathering. In Elsevier (Ed.), *Service Life Prediction of Polymers and Plastics Exposed to Outdoor Weathering*. Matthew Deans.

Witucki, G. L. (1993). Back to Basics a Silane Primer : Chemistry and Applications of Alkoxy Silanes. *Journal Of Coatings Technology*, 65, 57–60.

Xiameter from Dow Corning. (2009). *A Guide to Silane Solutions The Basics of Silane Chemistry*. Recuperado el 11 de enero de 2020 de [www.xiameter.com](http://www.xiameter.com)

Xiang, W., Cui, D., Liu, Q., Lu, X., & Cao, L. (2010). Theory and practice of ionic soil stabilizer reinforcing special clay. *Journal of Earth Science*, 21(6), 882–887. <https://doi.org/10.1007/s12583-010-0141-x>

Yi-min, W., & Xiao-lan, L. I. U. (2011). Tests of ionic soil stabilizer reinforcing expansive soil. *Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*. IEEE, 40672178, 2663–2666. <https://doi.org/10.1109/MACE.2011.5987532>

Zapata Hernández, R. D. (2004). *Química de la acidez del suelo*. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. <http://www.bdigital.unal.edu.co/1735/>

Zhang, M., Zhao, M., Zhang, G., Nowak, P., Coen, A., & Tao, M. (2015). Calcium-free geopolymer as a stabilizer for sulfate-rich soils. *Applied Clay Science*, 108, 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.02.029>

Zhang, T., Cai, G., & Liu, S. (2018). Application of Lignin-Stabilized Silty Soil in Highway Subgrade: A Macroscale Laboratory Study. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(4), 1–16. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002203](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002203)

Zhao, H., Ge, L., Petry, T. M., & Sun, Y.-Z. (2013). Effects of Chemical Stabilizers on an Expansive Clay. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(10), 1009–1017. <https://doi.org/10.1007/s12205-013-1014-5>

Zhou, C., Zhao, S., Huang, W., Li, D., & Liu, Z. (2019). Study on the Stabilization Mechanisms of Clayey Slope Surfaces Treated by Spraying with a New Soil Additive. *Applied Sciences*, 9(6), 1245. <https://doi.org/10.3390/app9061245>

Zolfeghari Far, S. Y., Kassim, K. A., Eisazadeh, A., & Khari, M. (2013). An evaluation of the tropical soils subjected physicochemical stabilization for remote rural roads. *Procedia Engineering*, 54, 817–826. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.075>

Zuluaga Angel, D. F. (2005). El uso de la cal en la estabilización de suelos derivados de cenizas volcánicas (Andosoles). Un caso particular. Universidad Nacional de Colombia, Trabajo de Grado Especialización. <http://www.bdigital.unal.edu.co/2283/>