

## *Evaluación de la temperatura como método de estabilización de arcillas*

Hugo Alexander Rondón Quintana<sup>1</sup>, Edgar Antonio Vargas Castro<sup>2</sup> y Luis Ángel Moreno Anselmi<sup>3</sup>

Recibido: 30 de octubre de 2009

Arbitrado y aceptado: 15 de diciembre de 2009

### **Resumen**

En el artículo se presentan los resultados experimentales de ensayar dos tipos de arcillas, con el fin de evaluar la influencia de la temperatura en sus propiedades índices y mecánicas, y el potencial de expansión. El objetivo general de la investigación es determinar si la aplicación de temperatura puede ser utilizada como mecanismo de estabilización de arcillas. En la primera fase de la investigación, las muestras de arcilla fueron sometidas a tres temperaturas (150, 225 y 300°C) y tiempos de exposición diferentes (1, 7 y 15 días) para evaluar el cambio que experimentan en sus índices de consistencia (límites líquido, plástico y de contracción), resistencia a la compresión inconfiada y potencial de expansión (índice de hinchamiento, expansión libre y en consolidómetro). Los resultados muestran que el potencial de expansión de las arcillas ensayadas disminuye y la resistencia a la compresión simple aumenta cuando se eleva la temperatura de las muestras entre 150 y 300°C.

**Palabras clave:** *arcillas expansivas, estabilización, temperatura.*

## *Temperature evaluation as a method of stabilization of clays*

### **Abstract**

Laboratory tests were used to evaluate the effect on the index properties, volumetric behavior and monotonic uniaxial strength of two clays due to the application of temperature during different time periods. Mean objective of this research project is to evaluate if the application of temperature in clays can be a good stabilization method in a future. In this first phase of the project, three temperatures (150, 225, 300°C) and time expositions of the samples (1, 7 and 15 days) were used in order to measurement the evolution of the properties in the clays. Results shows that expansion potential decrease and monotonic uniaxial strength increase when the temperature raise on the samples.

**Key words:** *expansive clays, stabilization, temperature.*

---

<sup>1</sup> Doctor en Ingeniería de la Universidad de los Andes y la Ruhr Universitat Bochum de Alemania. Investigador adscrito al grupo Indetec de la Universidad de la Salle. Contacto: [harondon@unisalle.edu.co](mailto:harondon@unisalle.edu.co)

<sup>2</sup> Ingeniero Civil de la Universidad La Gran Colombia. Investigador adscrito al grupo Gigup de la Universidad Piloto de Colombia.

<sup>3</sup> Magíster en Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes. Docente adscrito a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Colombia, investigador del Grupo Pavimentos y Materiales de Ingeniería.

## Introducción

Colombia es un país ubicado en una zona tropical caracterizada por fuertes cambios en sus condiciones climáticas, es decir, regímenes de lluvia, evaporación, radiación solar, entre otros, correspondientes a la zona ecuatorial, y una gran diversidad en sus formaciones geológicas, que son relativamente recientes. Estas condiciones han dado lugar a la depositación de suelos altamente susceptibles a cambios químicos y físicos en presencia de agua. En algunas ocasiones, estas variaciones pueden ser indeseables desde el punto de vista técnico de la ingeniería, como por ejemplo las de tipo volumétrico y la pérdida de capacidad estructural que experimentan los suelos cuando se incrementa el contenido de agua (humedad). Estos suelos son generalmente indeseables en cualquier proyecto de ingeniería. Sin embargo, en la mayor parte de los mismos es imposible, en los aspectos económico y técnico, lograr un retiro completo y, por lo tanto, deben ser utilizados como suelo de fundación. Para tomar como modelo el caso de un pavimento, su comportamiento estructural y funcional puede verse afectado cuando el material de subrasante es una arcilla con altos índices de plasticidad y potencial de expansión. Los cambios volumétricos que producen estos suelos cuando se someten a diversas condiciones de humedad, así como la disminución que experimentan en su resistencia al corte y rigidez en presencia de agua, pueden ocasionar el deterioro casi total de las estructuras si estas circunstancias no se tienen en cuenta de manera adecuada.

Para contrarrestar los fenómenos expuestos, en Colombia y el mundo se han realizado diferentes investigaciones con el fin de mejorar el comportamiento físico-mecánico de los suelos en presencia de agua (estabilización). Las técnicas de estabilización de suelos se basan en el principio de modificar las propiedades del material existente con el fin de que éste sea apto para cumplir con las especificaciones exigidas por las entidades o instituciones que así lo demanden en cada país.

Las propiedades de los suelos que más frecuentemente se estudian en problemas de mejoramiento o estabilización son la estabilidad volumétrica (contracción y expansión), resistencia y compresibilidad.

Desde la perspectiva del desarrollo experimental sobre procesos de estabilización de suelos, en Colombia la mayor parte de las investigación se ha concentrado en estudiar diversas técnicas de mejoramiento químico, debido, principalmente, a que es de amplio conocimiento el efecto que tiene en dichos suelos la mezcla con materiales como la cal, el cemento hidráulico, derivados de los crudos del petróleo (por ejemplo cemento asfáltico, emulsiones asfálticas, asfalto espumado y aceite sulfonado), sulfatos, cloruros, enzimas y cenizas volantes. Algunos estudios sobre el tema pueden ser consultados en GAITÁN (1976), ANGARITA Y DÍAZ (1995), LÓPEZ (1995), PÉREZ Y OTROS (1997), DELGADO Y SUÁREZ (2000), CELEDÓN Y LASCANO (2001), ALVARADO Y TORRES (2002), ARIAS (2002), DÍEZ Y MONTES (2002), GARNICA Y OTROS (2002), PINZÓN (2002), LIME (2006) Y MERCHÁN (2007). Estas investigaciones han buscado, especialmente, encontrar los porcentajes óptimos de material estabilizante que se debe agregar a un determinado tipo de suelo para mejorar una característica en particular, generalmente su resistencia al corte, y disminuir el grado de susceptibilidad al cambio volumétrico.

Con el ánimo de no elaborar estudios similares a los que se han realizado ampliamente sobre procesos de estabilización química y mecánica, en esta investigación se propone modificar las propiedades de dos arcillas sometiéndolas a altas temperaturas (150, 225, 300°C) durante distintos periodos de tiempo (1, 7 y 15 días). El principio físico que motiva este estudio es simple: cuando las arcillas experimentan altas temperaturas, sus propiedades mecánicas varían, aumenta su resistencia mecánica y anula los cambios volumétricos en presencia de agua. Un ejemplo de este proceso es el que se observa en la fabricación de ladrillos.

Sobre las arcillas se realizaron ensayos tendientes a evaluar sus propiedades físicas, de expansión y contracción, plasticidad y resistencia mecánica: límites de contracción, plástico y líquido, compresión inconfínada, expansión libre y en consolidómetro.

## Materiales y metodología

Las arcillas utilizadas para el desarrollo de la investigación provienen de la sabana de Bogotá, Colombia, y serán denominadas arcillas 1 y 2 a partir de este momento. La arcilla 2 fue construida a partir de la arcilla 1, reemplazando el 25% de su masa por bentonita con el fin de aumentar su potencial de expansión. La arcilla 1 tiene color café oscuro con tonos grises y es clasificada como CL de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS por su nombre en inglés). En la tabla 1 se presentan los resultados de los ensayos típicos que se realizaron para caracterizar las arcillas.

**TABLA 1.** Resultados de los ensayos de caracterización de las arcillas.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR	
			ARCILLA 1	ARCILLA 2
Humedad natural	$\omega_n$	%	51	-
Límite líquido	LL	%	76	151
Límite plástico	LP	%	37,2	56,45
Índice de plasticidad	IP	%	38,8	94,6
Límite de contracción	LC	%	28,2	21,5
Gravedad específica	Gs	-	2,66	2,68
Fracción de arcilla (<0,002 mm)	C	%	54	-
Actividad	A	-	0,72	-

Con el fin de determinar la capacidad de cambio volumétrico de las arcillas en presencia de agua, se realizaron ensayos para evaluar el índice de hinchamiento y la expansión libre y en consolidómetro (aplicando una presión vertical de 7 kPa). Adicionalmente, se realizaron ensayos de compresión inconfínada con el fin de evaluar su resistencia uniaxial bajo carga monótonica  $q_u$  (tabla 2).

**TABLA 2.** Resultados de los ensayos para evaluar potencial de cambio volumétrico y la resistencia bajo compresión inconfínada de las arcillas.

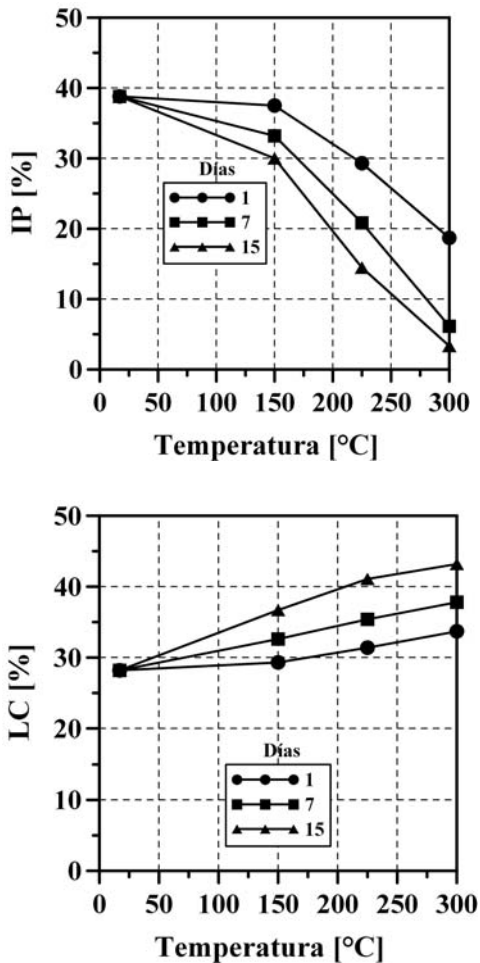
PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR	
		ARCILLA 1	ARCILLA 2
Índice de hinchamiento	MPa	0,0188	0,0756
Expansión libre	%	55	115
Expansión en consolidómetro	%	12	28
Compresión inconfínada	MPa	0,177	0,073

Los parámetros utilizados en esta primera fase de la investigación para evaluar la influencia de la temperatura en el comportamiento de las arcillas, fueron: IP, LC,  $q_u$ , índice de hinchamiento y expansión libre y en consolidómetro. Los ensayos fueron realizados siguiendo los lineamientos exigidos por la especificación del Instituto Nacional de Vías (Invías) en 2007. Se calentaban las muestras hasta obtener una temperatura de 150, 225 y 300°C, durante 1, 7 y 15 días. Se tomaron muestras inalteradas y alteradas. Para la extracción de las muestras inalteradas se utilizó un equipo de perforación manual. Las muestras fueron extraídas de una profundidad de un metro por debajo de la superficie del terreno natural.

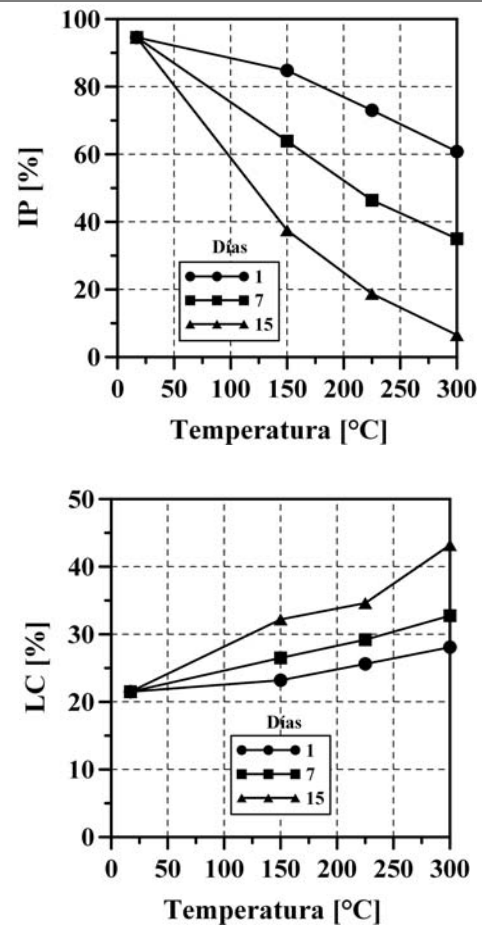
## Resultados

**ÍNDICES DE CONSISTENCIA.** En las figuras 1 y 2 se presenta la evolución del índice de plasticidad (IP) y del límite de contracción (LC) de las arcillas 1 y 2. En ambas se observa disminución y aumento del IP y del LC, respectivamente, cuando se incrementa la temperatura de las muestras. La mayor disminución del IP (91,4% y 93,2% para las arcillas 1 y 2, respectivamente) e incremento del LC (53,2% y 100% para las arcillas 1 y 2, respectivamente) se presenta cuando se someten las muestras a una temperatura de 300°C durante 15 días. El comportamiento que experimentan las arcillas sometidas a altas temperaturas puede deberse a que en temperaturas entre los 200 y los 400 °C la rehidratación se torna imposible, tal como ha sido ampliamente identificado por otros

investigadores, entre ellos ALFONSO RICO Y HERMILO DEL CASTILLO (2006), HIGHWAY RESEARCH BORRAD (1970) y SABORÍO Y ZARATE (1964).



**FIGURA 1.** Evolución del IP (arriba) y LC (abajo) cuando se somete la arcilla 1 a diferentes temperaturas y tiempos de exposición.



**FIGURA 2.** Evolución del IP (arriba) y LC (abajo) cuando se somete la arcilla 2 a diferentes temperaturas y tiempos de exposición.

**EXPANSIÓN.** En las figuras 3, 4 y 5 se observa que el potencial de cambio volumétrico de las arcillas disminuye cuando se aumenta la temperatura de las muestras. La mayor disminución ocurre cuando se someten las muestras a una temperatura de 300°C durante 15 días. Con esta temperatura y tiempo de exposición de las muestras, el índice de hinchamiento disminuye 59.04% y 84,79% para las arcillas 1 y 2, respectivamente. En el caso de la expansión libre y en consolidómetro, esta disminución es de 91% para ambos tipos de arcilla.

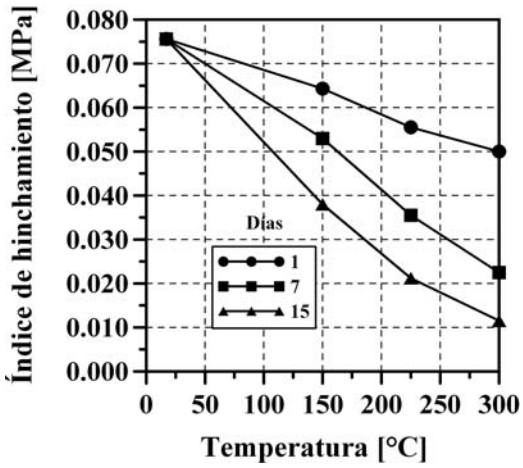
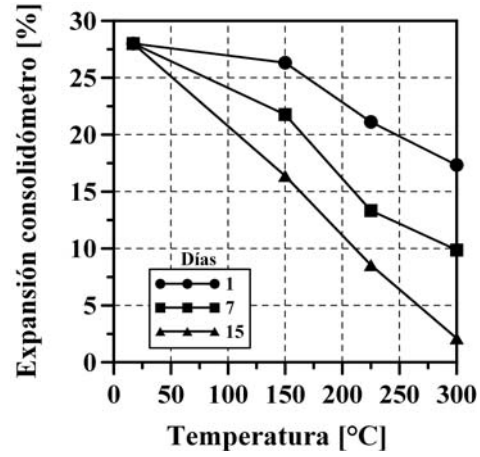
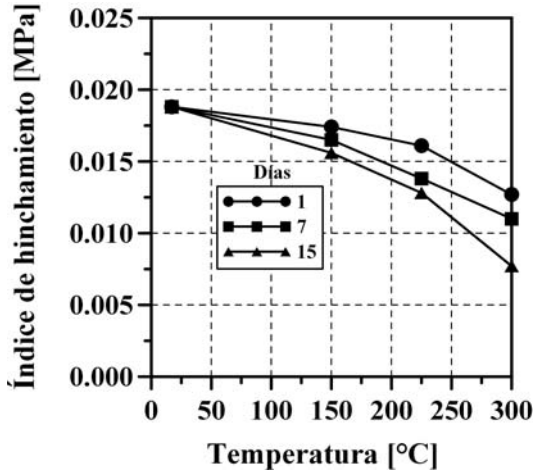


FIGURA 4. Evolución de la expansión en consolidómetro cuando se someten las arcillas 1 (izquierda) y 2 (derecha) a diferentes temperaturas y tiempos de exposición.

FIGURA 3. Evolución del índice de hinchamiento cuando se someten las arcillas 1 (arriba) y 2 (abajo) a diferentes temperaturas y tiempos de exposición.

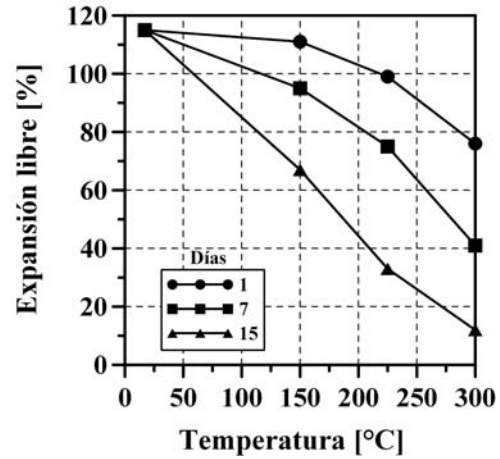
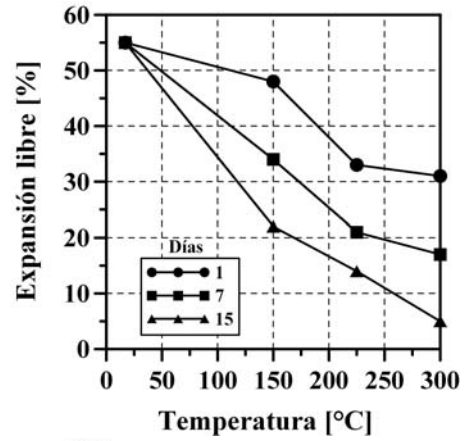
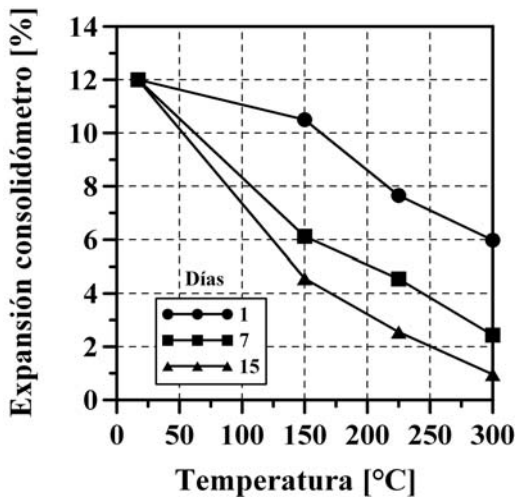


FIGURA 5. Evolución de la expansión libre cuando se someten las arcillas 1 (arriba) y 2 (abajo) a diferentes temperaturas y tiempos de exposición.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA ( $q_u$ ). Cuando las arcillas son sometidas a altas temperaturas, tienden a rigidizarse y aumentar su resistencia mecánica bajo carga monotónica. En la figura 6 se observa que la resistencia a la compresión confinada ( $q_u$ ) de las arcillas aumenta conforme se incrementan la temperatura y el tiempo de exposición de las muestras. El mayor aumento en el valor de  $q_u$  de ambas arcillas ocurre cuando las muestras se someten a una temperatura de 300°C durante 15 días. Este aumento es de 95 y 78 veces el valor inicial alcanzado a la humedad natural de las muestras de arcilla 1 y 2, en cada caso.

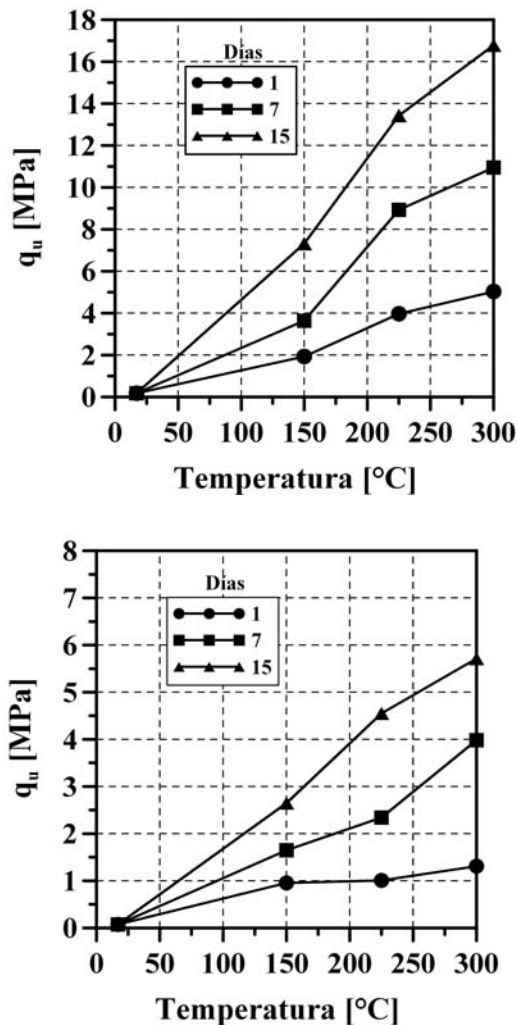


FIGURA 6. Evolución de la resistencia a la compresión confinada ( $q_u$ ) cuando se someten las arcillas 1 (arriba) y 2 (abajo) a diferentes temperaturas.

## Conclusiones

Las dos arcillas estudiadas experimentaron fuertes cambios en sus propiedades índices, potencial de expansión y resistencia a la compresión confinada cuando fueron solicitadas en un rango de temperatura de 150 a 300°C durante un periodo entre 1 y 15 días. En el caso de los límites de consistencia se tendió a disminuir el IP y a aumentar el LC al incrementarse la temperatura y los tiempos de exposición. De la misma forma, el potencial de expansión disminuye y la resistencia a la compresión confinada aumenta de manera drástica en estas condiciones. Lo anterior hace prever que se podría aplicar temperatura a arcillas in situ para modificar de manera benéfica propiedades que pueden ser indeseables cuando este tipo de material se utiliza como elemento para cimentar estructuras de obras civiles.

Las fases futuras de la investigación evaluarán características dinámicas de las arcillas, como el módulo resiliente, y la evolución de las propiedades químicas con la temperatura, con el fin de entender la ocurrencia de los cambios en los parámetros reportados en el presente artículo. Adicionalmente, algunas de las muestras expuestas a los gradientes de temperatura serán colocadas nuevamente en condiciones reales de temperatura y humedad con el fin de evaluar si son capaces de recuperar parcial o totalmente sus propiedades (fenómeno de tixotropía).

## Referencias

- ALVARADO, J. Y TORRES, C. *Estabilización de una arcilla blanca con cemento*. Tesis para optar al título de ingeniero civil. Pontificia Universidad Javeriana: Bogotá, 2002.
- ANGARITA LACOUTURE, HELOISA Y DÍAZ GONZÁLEZ, HÉCTOR IVÁN. *Uso de enzimas orgánicas como alternativa de estabilización de subrasantes y sub-bases en Santafé de Bogotá*. Tesis para optar al título de

- ingeniero civil. Pontificia Universidad Javeriana: Bogotá, 1995.
- ARIAS, O. *Métodos de estabilización de suelos de subrasante para pavimentos utilizados en Bogotá*. Tesis para optar al título de ingeniero civil. Universidad de los Andes: Bogotá, 2002.
- CELEDÓN SIMÓN, JORGE Y LASCANO TINOCO, GONZALO. *Arcillas expansivas y su tratamiento en subrasantes de vías y aeropuertos*. Tesis para optar al título de especialista en Diseño de Pavimentos para Carreteras. Universidad Católica de Colombia: Bogotá, 2001.
- DELGADO CASTRO, RICARDO Y SUÁREZ NOVOA, ALEJANDRO. *Estabilización de materiales granulares teniendo como guía la norma INVIAS (artículo 340) con emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta y diferentes porcentajes de cemento*. Tesis para optar al título de ingeniero civil. Pontificia Universidad Javeriana: Bogotá, 2000.
- DÍEZ BARRERO, LEONARDO Y MONTES OCAMPO, OSWALDO. *Estudio de la estabilización de subrasantes con productos químicos*. Tesis para optar al título de magister en Ingeniería Civil. Universidad de los Andes: Bogotá, 2002.
- GAITÁN, F. *Estabilización electrotérmica de suelos cohesivos en Colombia*. Tesis para optar al título de ingeniero civil. Universidad de los Andes: Bogotá, 1976.
- GARNICA ANGUAS, PAUL, PÉREZ SALAZAR, ALFONSO Y OTROS. *Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres*. Publicación Técnica No. 201. Instituto Mexicano del Transporte: Sanfandila, Qro, 2002.
- HIGHWAY RESEARCH BOARD. *Construction of embankments. Synthesis of Highway practices* No. 88: Washington, D.C., 1970.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVÍAS). *Normas de ensayos de materiales para carreteras*. Bogotá, 2007.
- LÓPEZ, R. *Estabilización de arcillas expansivas en la sabana de Bogotá con el aceite sulfonado Adiclay*. Tesis para optar al título de ingeniero civil. Universidad Católica de Colombia: Bogotá, 1995.
- MERCHÁN, S. D. *Comportamiento de un suelo fino estabilizado con columnas de cal, suelo y cemento, análisis con modelo experimental*. Tesis para optar al título de ingeniero civil. Pontificia Universidad Javeriana: Bogotá, 2007.
- NATIONAL LIME ASSOCIATION. *Manual de estabilización de suelo tratado con cal*. Boletín 326, traducido en 2006.
- PÉREZ, B., PLAZAS, R. Y PINZÓN, J. *Estabilización de suelos con asfalto – cemento*. Tesis para optar al título de ingeniero civil. Universidad Católica de Colombia: Bogotá, 1997.
- PINZÓN, J. *Mejoramiento de subrasantes arcillosas mediante la adición de cal y cenizas volantes del carbón*. Tesis para optar al título de ingeniero civil. Universidad Católica de Colombia: Bogotá, 2002.
- RICO RODRÍGUEZ, ALFONSO Y DEL CASTILLO, HERMILO. *La ingeniería de suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas*. Vol. 2. Editorial Limusa: México, 2006. 643 p.
- SABORÍO, J. Y ZÁRATE, M. *Métodos de control rápido de la compactación y la humedad en terraplenes*. Secretaría de Obras Públicas de México: México, D.F., 1964.