

# Correlación de Resultados Entre el Ensayo Equivalente de Arena y Azul de Metileno (Método de la Mancha) en Materiales Granulares

Octavio Coronado García\* / Maria Fernanda Mena Castellanos\*\* /  
Didier Ferley Micán Bacca\*\* / Diego Alfonso García Puerto\*\*

## RESUMEN

La naturaleza de los materiales provenientes de las distintas fuentes de material (canteras) presenta diferencias en la cantidad y composición de los finos (Pasa tamiz N°.200). Las especificaciones técnicas hacen referencia al ensayo equivalente de arena como un indicador cualitativo de dicha característica. Sin embargo, es indispensable definir la nocividad de estos finos. Cuando un material no cumple con este requisito es necesario mejorar su idealización mediante ensayos o técnicas de caracterización. El ensayo de azul de metileno es una técnica actual, rápida y útil de control de calidad de la fracción fina como un indicador de contenido de arcillas presentes en una muestra de material. La presente investigación define la correlación entre los ensayos de equivalente de arena, azul de metileno (método de la mancha) y límites de Atterberg. Estos ensayos arrojaron relaciones exponenciales, lineales y potenciales manifestando la incidencia perjudicial de la fracción arcillosa en un material granular. Fue factible observar esta incidencia mediante el ensayo de azul de metileno (método de la mancha).

**Palabras clave:** arcilla, porcentaje de finos (Pasa tamiz N°.200), equivalente de arena y azul de metileno.

## CORRELATION OF RESULTS BETWEEN THE TEST SAND'S EQUIVALENT AND METHYLENE BLUE SPOT TEST IN GRANULAR MATERIALS

### ABSTRACT

The nature of the materials coming from different material sources (quarries) presents differences in the quantity and composition of the fines (it passes sieve No.200). The technical specifications make reference to the sand equivalent test like a qualitative indicator of this characteristic. However it is indispensable to define the harmfulness of these fines. When a material doesn't fulfill this requirement it is necessary to improve its idealization by means of tests or techniques of characterization. The methylene blue spot test is a current, quick and useful technique of quality control of the fine fraction as an indicator of presence of clays in a material sample. The present investigation defines the correlation among the following tests: sand equivalent, methylene blue (spot test) and Atterberg limits. These tests showed exponential, potential and lineal relations and the clay fraction detrimental incidence in a granular material. It was feasible to observe this incidence through the methylene blue spot test.

**Key Words:** clay, fines percentage (sieve N°. 200), sand equivalent and methylene blue tests.

\* Ingeniero Civil de la Universidad de los Andes. MSc de la Universidad de los Andes. PhD de la Ecole Centrale de Paris. Francia. Profesor de la Universidad de La Salle.

\*\* Estudiante Ingeniería Civil Universidad de La Salle

Recibido: 1 de febrero de 2007.

Aceptado: 2 de abril de 2007.

## INTRODUCCIÓN

La base y subbase granular desempeñan una función estructural específica. El normal funcionamiento de un pavimento está directamente relacionado con el correcto desempeño de éstas bajo condiciones normales de servicio. Dicho desempeño es definido por las características físicas, químicas y mecánicas del material granular y sobre las cuales es preciso definir un control.

La fracción fina de los materiales granulares y, en particular, de la fracción arcillosa define en forma relevante el comportamiento mecánico del conjunto. Por ello es necesario caracterizarla y clasificarla mediante métodos cuantitativos que permiten tener un criterio más claro de la naturaleza cualitativa de la misma. Esta investigación relaciona los resultados obtenidos de dos ensayos uno tradicional y empírico (equivalente de arena) con uno actual y cuantitativo (azul de metileno) sobre material granular proveniente de fuentes de material específicas de la sabana de Bogotá.

## DESCRIPCIÓN

La experiencia actual de clasificación de suelos ha evolucionado a través del siglo XX, definiéndose las distintas clasificaciones de los suelos (sistema unificado de clasificación de suelos SUCS, sistema de la American Association of State Highway & Transportation Officials AASHTO, método propuesto por la Federal Aviation Administration FAA, sistema de US Department of Agriculture USDA, y la taxonomía del Eurocódigo, entre otros) que intentan capturar y describir este complejo material en función de aplicaciones específicas y sus correspondientes necesidades: construcción de caminos y pavimentos, agricultura, geomecánica o minería.

Los métodos empíricos tradicionales utilizados rutinariamente en la clasificación de materiales granulares son: límites de Atterberg, valores de granulometría y equivalente de arena, los cuales tienen una

base teórica bien definida pero con ciertas limitaciones en cuanto a la relación directa de propiedades fisicoquímicas de las partículas.

La prueba de equivalente de arena es una buena herramienta de control de cantidad y calidad de fracción fina; sin embargo, su valor empírico no es preciso cuando existe un elevado porcentaje de finos en una muestra de suelo. La utilización de técnicas complementarias permite reconocer parámetros que no han sido considerados o de poca relevancia en las distintas clasificaciones, dando un mejor entendimiento del comportamiento de los suelos y, en particular, de la fracción fina.

La técnica de adsorción de azul de metileno se caracteriza por ser sencilla, económica y conveniente para cualquier laboratorio (Schaeffner, 1989). Determina la presencia de elementos arcillosos en los materiales finos, como arenas naturales o de trituración, polvos minerales, etc., empleados en la construcción de carreteras. El catión de azul de metileno posee una forma prismática de dimensiones  $17\text{Å} \times 7,6\text{Å} \times 3,25\text{Å}$  (Tourenq *et al.*, 1989).

La superficie máxima cubierta por un catión de azul de metileno es  $130\text{Å}$ , aunque puede ser menor dependiendo de la orientación del catión con respecto a la superficie de la arcilla que lo absorbe. Los cationes de una solución acuosa de cloruro de azul de metileno son absorbidos por las cargas negativas de la superficie de la arcilla.

## FUENTES DE MATERIAL Y METODOLOGÍA

La Sabana de Bogotá está constituida geológicamente por formaciones sedimentarias de edades cretácicas, terciarias y cuaternarias. Las formaciones más antiguas se depositaron en ambientes marinos (Cretácico Superior), sobre los cuales reposan rocas procedentes de ambientes litorales, transicionales y continentales de edad terciaria (González *et al.*, 2001).

## CAJICÁ

Cajicá se encuentra ubicado en la sabana centro a 39 Km de la ciudad de Bogotá. Esta zona es montañosa y presenta un relieve ondulado, con una altitud de 2558 metros y un clima aproximado de 14 °C (Gobernación de Cundinamarca, 2006).

En el sector de sabana central (Cajicá) afloran rocas pertenecientes a las formaciones Arenisca Dura (areniscas grises con cemento silíceo), Plaeners (limolitas silíceas, lodolitas silíceas y cherts) y Labor y Tierna del Grupo Guadalupe (arenitas de color gris claro, cuarzosas y con estratificación gruesa), así como las formaciones Guaduas, Cacho, Bogotá y Sabana. Los principales materiales que se extraen en el sector corresponden a las gravas, seguidos por las arcillas y los recebos (González et al., 2001). En este municipio (Cajicá) se estudiaron materiales granulares de tres canteras: Albania, El Boquerón y El maná.

## MOSQUERA

Se encuentra ubicado en la Sabana Occidente a 23 Km de la ciudad de Bogotá. Esta zona es montañosa y presenta un relieve ondulado, con una altitud de 2516 metros y un clima aproximado de 14 °C (Gobernación de Cundinamarca, 2006).

Los principales materiales extraídos en la Sabana occidental (Mondoñedo) corresponden a arenas, piedra y recebo, pertenecientes geológicamente al área, afloran rocas de las formaciones Plaeners y Labor y Tierna del Grupo Guadalupe. Por su parte, la formación Plaeners se caracteriza por la presencia de lilitas fracturadas y contiene niveles que son explotados para recebo; en algunas localidades su grado de meteorización es extremo, y llega a formar depósitos de caolín (González et al., 2001). Canteras estudiadas: Pinar de Vista Hermosa (Mosquera) y San Fernando.

## SOACHA

Municipio ubicado a unos 18 Km al Sur Occidente de la ciudad de Bogotá. Esta zona presenta cierta cantidad de montañas, con una altitud de 2519 metros y un clima aproximado de 14 °C (Gobernación de Cundinamarca, 2006).

Soacha es bastante importante en el abastecimiento de materiales de construcción para Bogotá; dentro de los materiales se destacan las arcillas, arenas, recebos y las piedras para cimientos y estructuras. Las arcillas explotadas pertenecen a las formaciones Guaduas (arcillolitas grises a amarillas y arenitas cuarzosas a feldespáticas de grano fino, arenitas cuarzosas de color gris claro, de grano fino a grueso, con alternancia de arcillolitas y mantos de carbón, arcillolitas grises oscuras y de colores abigarrados cuando están alteradas) y Bogotá y son utilizadas en la producción de ladrillos, tubos y tejas. Las arenas y los recebos proceden de las formaciones Arenisca Dura, Plaeners, Labor y Tierna y Regadera (González et al., 2001). Canteras estudiadas: Pinar de Vista Hermosa (Soacha) y El Ricaurte.

## CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES GRANULARES

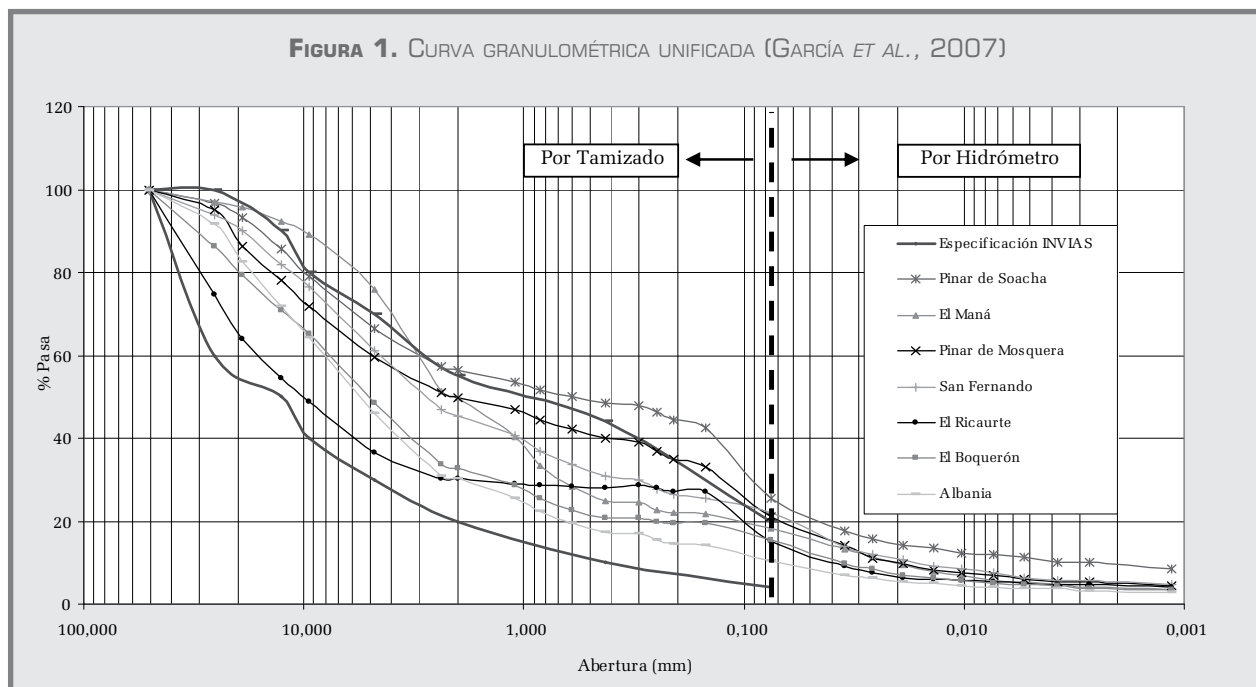
Se realizó la caracterización de cada uno de los materiales granulares extraídos de las diferentes fuentes de material (canteras), éstos se conocen en el campo de la ingeniería civil como B-200, utilizados principalmente en la construcción de subbases granulares de una estructura de pavimento.

Cada una de las siete muestras obtenidas fue preparada por cuarteo (INVE-104) para la obtención de cantidades representativas utilizadas en cada uno de los ensayos descritos anteriormente. Estos fueron efectuados bajo normativa Instituto Nacional de Vías (INVIAS); sin embargo, el ensayo de azul de metileno (método de la mancha) fue realizado mediante normalización francesa AFNOR (P18-592). Los resultados obtenidos están descritos en la Tabla 1.

**TABLA 1.** RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES GRANULARES ANALIZADOS (GARCÍA ET AL., 2007)

	Contenido de Humedad (%)	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)	Equivalente de Arena (%)	Desgaste Máquina de Los Ángeles (Método B) %		Peso Específico (Tamiz 200)	% Finos	% Arcilla	V. A (g/100g)
						Método B	Método C				
<b>Norma INV</b>	<b>E-122</b>	<b>E-125</b>	<b>E-126</b>	<b>E-126</b>	<b>E-133</b>	<b>E-218</b>		<b>E-235</b>			<b>E-235</b>
Albania	3.36	23.24	18.23	5.02	23	21.22	20.94	2.90	15.20	3.00	1.06
El Boquerón	4.11	25.71	19.32	6.39	21	41.44	37.84	2.94	20.00	3.90	1.10
El Maná	4.33	23.94	17.27	6.67	16	42.76	39.16	2.75	23.30	4.00	1.40
El Pinar de Mosquera	7.39	19.88	12.32	7.56	9	35.42	37.04	2.75	30.90	5.00	1.50
El Pinar de Soacha	6.69	31.64	18.22	13.43	4	46.64	47.74	2.72	37.50	9.40	1.80
El Ricarte	5.24	28.32	20.31	8.01	9	62.44	59.96	2.78	20.60	4.50	1.55
San Fernando	7.65	31.05	21.45	9.60	8	50.72	48.06	2.77	31.90	5.10	1.70
Arena de Peña	1.32	26.08	24.09	2.00	60	----	----	----	6.68	0.70	0.82
Caolinita	2.47	42.00	18.00	24.00	0	----	----	----	100.00	----	1.90
Arena de Río	0.00	N.L	N.P	N.A	97	----	----	----	0.00	0.00	0.50

**FIGURA 1.** CURVA GRANULOMÉTRICA UNIFICADA (GARCÍA ET AL., 2007)



## ANÁLISIS DE RESULTADOS

**TABLA 2.** CLASIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS ESTUDIADAS  
(GARCÍA ET AL., 2007)

	AASHTO	SUCS	
		Fracción Fina	Fracción Gruesa
Albania	A-2-4	ML	SC
El Boquerón	A-2-4	CL	SC
El Maná	A-2-4	CL	SC
El Pinar de Mosquera	A-2-4	CL	SC
El Pinar de Soacha	A-2-6	CL	SC
El Ricaurte	A-2-4	CL	GC
San Fernando	A-2-4	CL	SC

Según la clasificación AASHTO las muestras estudiadas se encuentran en el grupo A-2 el cual comprende una gran variedad de material granular que contiene menos del 35% del material fino.

Se observa que la mayoría de las muestras pertenecen al subgrupo A-2-4, que incluyen suelos gravosos y arenosos (arena gruesa). Al igual que los materiales del subgrupo A-2-4, el material que pertenece al A-2-6 incluye suelos gravosos y arenosos; sin embargo, a diferencia de los anteriores éstos tienen una plasticidad y límite líquido mucho mayor (Juárez, 1998).

El sistema de clasificación SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) para los grupos GC (Gravas arcillosas) y SC (Arenas arcillosas) el contenido de finos de estos grupos es mayor del 12% en peso; sin embargo, en estos grupos los finos presentan una mediana o alta plasticidad, teniéndose además en cuenta la condición de que el índice de plasticidad sea mayor de 6%. Estos grupos presentan las siguientes características: compac-

tibilidad buena o regular, compresibilidad y expansión ligera, impermeables pero a la vez presentan un mal drenaje, como material de terraplén es estable, como subrasante es buena y como base es regular a buena.

Para el grupo CL (Arcillas de baja compresibilidad), el límite líquido (LL) debe ser menor del 50% e índice de plasticidad (IP) mayor del 6%. Este grupo presenta las siguientes características: compactibilidad regular a buena, compresibilidad y expansión media, impermeables y no drena, como material de terraplén es bueno, como subrasante es regular a mala y como base no debe usarse (Juárez, 1998).

El grupo ML (Limo de baja compresibilidad) está definido por límite líquido menor del 50% e índice de plasticidad menor del 6%. Este grupo presenta las siguientes características: compactibilidad buena a mala, compresibilidad y expansión ligera a media, impermeables pero a la vez presentan un mal drenaje, como material de terraplén es inestable si no está muy compacto, como subrasante regular a mala y como base no debe usarse.

De acuerdo con las especificaciones generales de construcción de carreteras, los resultados obtenidos del ensayo equivalente de arena de suelo y agregados finos I.N.V. E -133 reflejan que son suelos plásticos y sus valores no cumplen con éstas ( $EA > 25\%$  para subbase granular).

Por otra parte, con base en el ensayo de resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm. ( $1\frac{1}{2}$ " por medio de la Máquina de los ángeles I.N.V. E- 218, la mayoría de las muestras cumplen la especificación de desgaste para afirmado y subbase granular (Desgaste  $< 50\%$ ) a excepción de la cantera El Ricaurte que manifiesta un desgaste del 59.92 – 62.44%.

Según se aprecia en la Figura 1, las curvas granulométricas propias de cada muestra se encuentran en

un alto porcentaje dentro de los rangos establecidos por el Artículo 320 de las Especificaciones antes mencionadas lo cual es satisfactorio para prevenir segregaciones y garantizar los niveles de compactación y resistencia exigidos. Sin embargo, la curva definida por la muestra de Pinar de Soacha se encuentra fuera de dichos límites, presentando una gran cantidad de finos (37.5%) en cuanto a la totalidad de la muestra.

## INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

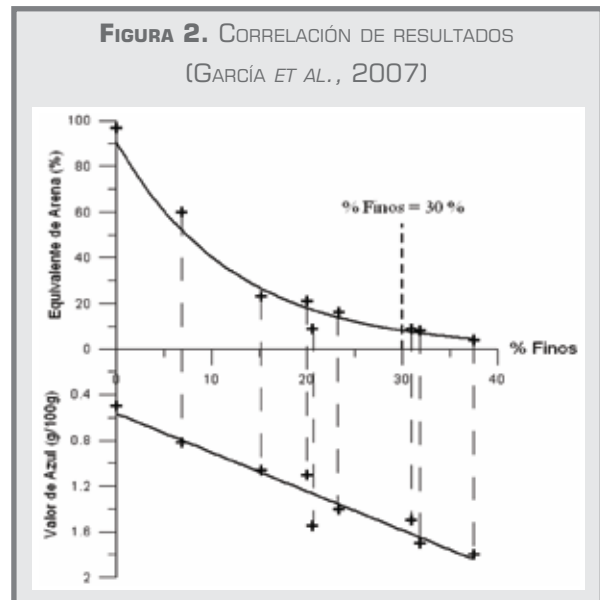
Los resultados del ensayo equivalente de arena, azul de metileno (método de la mancha) e índice de plasticidad están directamente relacionados con el porcentaje de la fracción fina contenido en una muestra de material. A continuación se establece las respectivas correlaciones.

### VARIACIÓN DEL VALOR DE AZUL Y EL EQUIVALENTE DE ARENA EN FUNCIÓN DEL % FINOS

La Figura 2 refleja que a medida que el % finos de un material granular aumenta, el equivalente de arena decrece de forma exponencial ( $EA=97e^{-0.084F}$ ) y el valor de azul aumenta de manera lineal ( $VA=0.037F+0.5$ ). Definiendo así, que para % finos menores al 30% el valor de azul varía entre 0.5 y 1.6 g/100g, y el equivalente de arena entre 10% y 97 %.

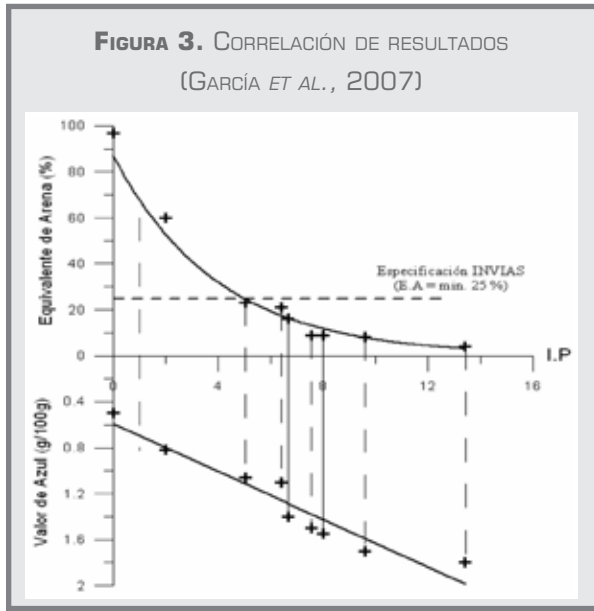
El valor de equivalente de arena no es preciso al relacionarlo con materiales de más de 30% de finos ya que se obtienen valores de equivalente menores al

10%, obteniéndose, en ocasiones, lecturas de arena inferiores a la escala numérica establecida en el procedimiento práctico del ensayo I.N.V. E-133 equivalente de arena de suelo y agregados finos.



### VARIACIÓN DEL VALOR DE AZUL Y EL EQUIVALENTE DE ARENA EN FUNCIÓN DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD

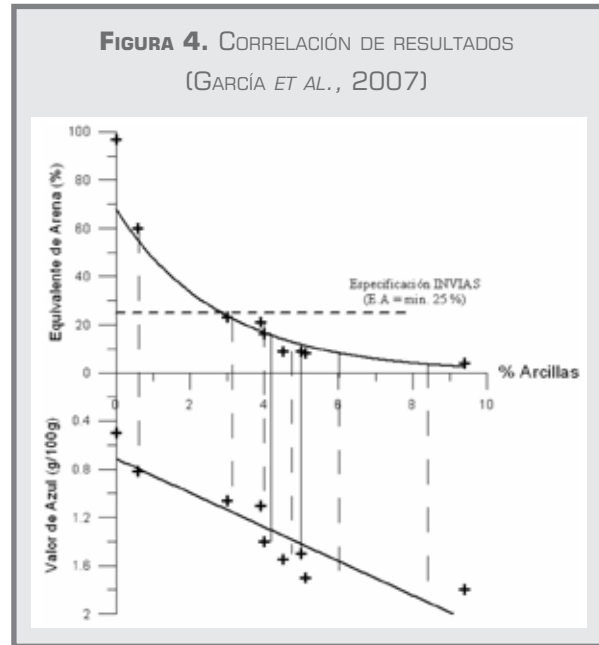
En la Figura 3 se observa que a medida que el índice de plasticidad de un material granular aumenta el equivalente de arena decrece de forma exponencial ( $EA=97e^{-0.2631.P}$ ) y el valor de azul aumenta de manera lineal ( $VA=0.115I.P+0.5$ ). Para índices de plasticidad comprendidos entre 4 y 14% se relacionan equivalentes de arena que varían 6 y 20%; así mismo, el valor de azul está definido entre 1 – 2 g/100g.



**VARIACIÓN DEL VALOR DE AZUL Y EL EQUIVALENTE DE ARENA EN FUNCIÓN DEL % ARCILLAS**

La Figura 4 muestra la variación del equivalente de arena y el valor de azul con respecto al % arcillas, definidas mediante las ecuaciones  $EA=97e^{-0.402Ac}$  y  $VA=0.179Ac+0.5$  respectivamente, en las cuales se define la influencia del % arcillas (valor determinado mediante el ensayo del hidrómetro) en la determinación de los dos índices.

También cabe decir que al aumentar en pequeñas proporciones el % arcillas, el valor de azul tiende a incrementarse en gran proporción. Notándose una gran conglomeración entre los porcentajes de arcilla del 3 al 5.1%.

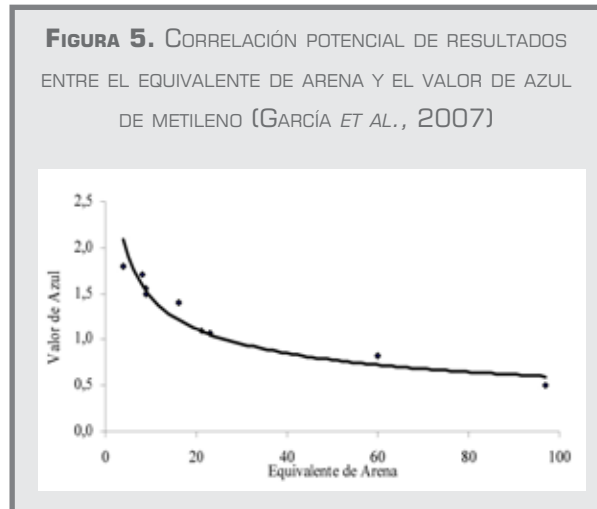


**RELACIÓN ENTRE EL VALOR DE AZUL Y EL EQUIVALENTE DE ARENA**

La Figura 5 define una relación potencial inversa entre el equivalente de arena y el valor de azul. El exponente relacionado al equivalente define un bajo rango de variabilidad del valor de azul con equivalentes de arena superiores al 30%. Es importante definir que para equivalentes de arena inferiores al 30%, el valor de azul que se obtiene define un mejor rango de variabilidad relacionable a altos porcentajes de finos y de arcillas.

Para valores de equivalentes de arena superiores a 30%, el valor de azul tiende a 0.5g/100g valor mínimo definido para materiales sin presencia de partículas arcillosas y/o limosas. Para valores de equivalente de arena comprendidos entre 1% (valor mínimo posible) y 30% se expresa variabilidad de valores de azul superiores a 0.5g/100g definidos por la características arcillosas implícitas en el material fino, dicha variación ha de considerarse perjudicial para valores de azul > 1.0g/100g, correspondiente a materiales granulares no apropiados para subbases granulares, para lo cual es ideal obtener valores de

azul comprendidos entre 0.5 y 1.0g/100g que garantizan un material apto para este tipo de estructura de pavimento.



## CONCLUSIONES

De acuerdo con la Tabla 1, la cual muestra los resultados de los ensayos realizados a los materiales granulares estudiados en este trabajo, podemos decir que la Sabana Centro cuenta con los mejores materiales para la utilización en subbases granulares debido a las buenas características físicomecánicas. La Sabana Occidental presenta un contenido de finos muy altos y un equivalente de arena bajo, sobrellevando a un alto grado de nocividad (contenido de arcillas) del material, siendo preferible su uso en afirmados. La zona de Soacha, presenta muy malas características mecánicas para ser utilizada en estructuras de pavimentos, siendo recomendable su uso como rebase debido a los valores de índice de plasticidad superiores a los exigidos.

Al tener presente las especificaciones constructivas para materiales granulares es considerable tener en cuenta la influencia circunstancial que define el incumplimiento de algún parámetro. Para las muestras expuestas con considerable porcentaje de finos y bajos equivalentes de arena se aprecian valores de azul comprendidos entre 1 – 2 g/100 g, lo cual indica

que la fracción fina de algunos materiales granulares estudiados posee propiedades arcillosas. Además se aprecia que en un pequeño rango de porcentaje de arcillas (3% al 5.1%) el valor de azul varía radicalmente, lo que refleja la incidencia de la arcilla como material nocivo para una subbase granular. Alternamente se empleó muestras de arena para definir valores extremos de equivalente de arena = 60% y 97% y valores de azul = 0.82 g /100 g y 0.50 g/100 g, los cuales brindaron un mejor desarrollo gráfico y matemático de esta correlación.

A pesar de que algunos materiales no cumplen con el valor establecido según especificaciones (EA = min. 25%), estos pueden ser estabilizados en cantera a través de la adición de arena; sin embargo, las propiedades implícitas de la fracción fina no varían, es por ello que el valor de azul (VA) definirá la verdadera condición de dicha fracción.

Teniendo en cuenta la caracterización física y posterior análisis de resultados anteriormente descritos, se establece que las muestras estudiadas no se encuentran dentro de los parámetros exigidos por las especificaciones del IDU (equivalente de arena, índice de plasticidad y valor de azul) para subbases granulares, lo cual revela que se debe tener un manejo cuidadoso en cuanto al lugar de utilización y colocación de los materiales granulares como parte de una estructura de pavimento, debido a la influencia de factores hidrológicos en materiales con características expansivas.

Este trabajo estableció que la correlación entre el ensayo equivalente de arena y azul de metileno (método de la mancha) está representada por una línea de tendencia potencial inversa expresada mediante la ecuación  $V.A = 3.604 E.A^{-0.392}$ , sugiriendo que para valores de equivalente de arena menores al 30% existe una mayor incertidumbre de la verdadera condición nociva de un material granular debido a que éstos están relacionados a valores de azul mayores a



1.0g/100g (valor máximo exigido por las especificaciones del IDU). Por lo tanto, la nocividad (elevado contenido de arcillas) es representativa en equivalentes de arena inferiores a 30% y su magnitud ha de definirse mediante la prueba de azul de metileno (método de la mancha), ya que este ensayo muestra fácilmente el contenido de partículas nocivas (arcilla) de la fracción fina, aceptando o descartando un material granular para uso en subbases granulares u otras capas en una estructura de pavimento.

Para condiciones prácticas en campo el equivalente de arena es un ensayo rápido y sencillo; sin embargo, para materiales con elevados porcentajes de finos la prueba de azul de metileno (método de la mancha) ofrece mayor confianza técnica para la idealización la fracción fina de un material granular, debido a que refleja la presencia real de fracción arcillosa perjudicial para una estructura de pavimento.

## BIBLIOGRAFÍA

- García, D., M. Mena, M. y Micán, D. “Correlación de resultados entre el ensayo Equivalente de Arena y Azul de Metileno (Método de La Mancha) en Materiales Granulares”. Trabajo de Grado. Universidad de La Salle, 2007.
- Gobernación de Cundinamarca (2006) <[http://www.cundinamarca.gov.co/cundinamarca/municipios/frm\\_iniciomunicipio.asp](http://www.cundinamarca.gov.co/cundinamarca/municipios/frm_iniciomunicipio.asp). Municipios de Cundinamarca>.
- González, L., Cárdenas, J y G. Parrado. Materiales de construcción en La Sabana de Bogotá: Ingeominas, 2001.
- Instituto Nacional de Vías INVIAS. Normas INVIAS. Tomo I y II. Bogotá, Colombia: Instituto Nacional de Vías, 1998.

## RECOMENDACIONES

La presente investigación puede ser complementada utilizando un mayor número de muestras, las cuales difieren de la fuente de material (aledaños a Bogotá u otros lugares de Colombia), tipo de material (empleo en estructuras de pavimento) y materiales alterados física o mecánicamente.

## AGRADECIMIENTOS

A Rosa Amparo Ruiz Saray, asesora metodológica, por todo el apoyo brindado durante el desarrollo de la investigación. A José Luis Rozo por la colaboración en el desarrollo experimental del proyecto en los laboratorios de la Universidad de La Salle. A Alejandro Peña por su interés en el desarrollo práctico del trabajo y su constante disposición para atender dudas.

Juárez Badillo, E. y Rico Rodríguez, A. *Mecánica de suelos*. México: Limusa, 1998.

Schaeffner, M. “Introduction de la valeur de bleu de methylene d’un sol dans la classification des sols de la recommandation pour les terrassements routiers”. *Bull. Liaison Labo P. et Ch.* Vol. 163, (1989): 9 - 16.

Tourenq, C.; Ngoc Lan, Tran. Mise en évidence des argiles par l’essai au bleu de methylene. Application aux sols, roches et granulats. *Bull. Liaison Labo P. et Ch.* Vol. 159 (1989): 79 - 92.