

NUEVOS MATERIALES PARA INFRAESTRUCTURA FÉRREA EN BELENCITO, BOYACÁ

NEW MATERIALS FOR RAILWAY INFRASTRUCTURE IN BELENCITO, BOYACÁ

Dilver Argedis Esquivel Albarracín¹
J&C Ingeniería Vial S.A.S²

1 Ingeniero Civil. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Especialista en Geotecnia Vial y Pavimentos. Contacto: ingdilver@hotmail.com

2 J&C Ingeniería Vial S.A.S. Empresa de Ingeniería Vial, especializada en Mantenimiento, Rehabilitación y Construcción de Vías Férreas y demás obras de Infraestructura Vial. Cámara de Comercio de Sogamoso. Contacto: oficina.jcingeneria@hotmail.com

RESUMEN

La explotación del mineral de hierro en la empresa Acerías Paz del Río y su movilización por transporte férreo ha traído la incógnita si este material puede usarse como capa de balasto en infraestructura férrea. Aunque se usa como materia prima para la fabricación de acero, con esta investigación se buscó establecer la posibilidad de utilizar o no este material como capa de asiento. El mineral de hierro grueso al ser extraído de la mina se deposita en un patio de cargue y luego se carga utilizando vehículos especiales, dichos vehículos se movieron a lo largo del corredor para regar el material sobre la vía y así tener un tramo de prueba para analizarlo en campo.

Por la abundancia de este material y las pobres características de otros materiales de la región como la caliza, esta puede ser una excelente alternativa para este corredor en especial. Lo que se pretende con este proyecto de investigación es dar una posible alternativa al utilizar como capa balasto un material nuevo, ya que, de servir, se tiene que analizar el valor de adquisición de dicho material con respecto a la caliza. Los ensayos de laboratorio que se desarrollaron para caracterizar el mineral de hierro fueron: desgaste en la máquina de los Ángeles, equivalente de arena, índice de alargamiento y aplanamiento, porcentaje de caras fracturadas y límites de Atterberg.

Palabras claves: Balasto, mineral de hierro, transporte férreo.

ABSTRACT

The iron ore mining company in Paz del Río and the mobilization for rail transport, has brought the unknown if this material can be used as roadbed in rail infrastructure. Although it used as raw material for steel making, this study aimed to establish the possibility of not using this material as a layer or seat. Coarse ore to be mined iron is deposited in a courtyard of charge and then loaded using special vehicles, such vehicles moved along the corridor to spread the material on the track and thus have a test section analyze field.

The abundance of this material and poor characteristics of other materials such as limestone region, this can be an excellent alternative for this particular corridor. The aim with this research project is to give a possible alternative to ballast layer used as a new material since serving, you have to analyze the acquisition value of the material with respect to the limestone. Laboratory tests that were developed to characterize the iron ore were: Wear on the machine angels, sand equivalent, lengthening and flattening index, percentage of fractured faces and Atterberg limits.

Keywords: Ballast, Iron ore, rail transportation.

INTRODUCCIÓN

Con la realización del presente proyecto, se avanzó en la obtención de una posible alternativa para que un material de uso no convencional sea usado como capa de balasto en la construcción y mantenimiento de infraestructura ferroviaria. Al utilizar el material en la misma zona donde se explota (Minas Paz del Río), se reducen los tiempos de transporte del material, los cuales pueden ser aprovechados en otras actividades. Además, se reduce contaminación debido a que se acortan los viajes que se deben hacer en tren para desplazar el material.

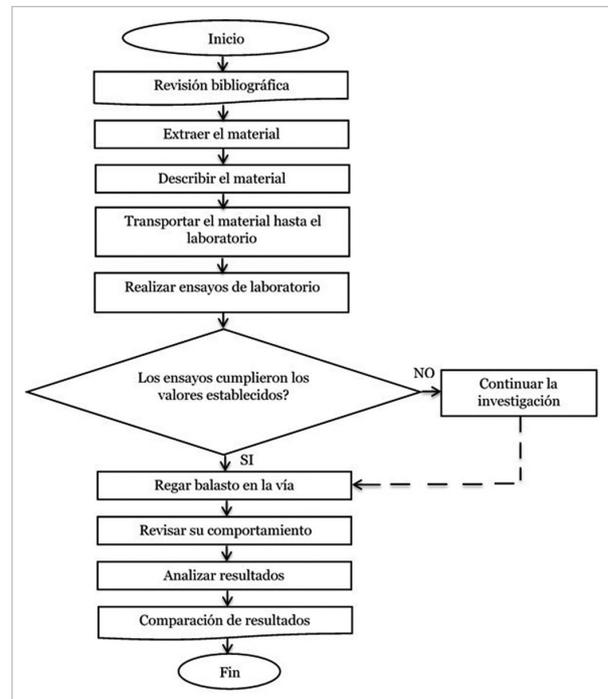
En este proyecto se realizaron pruebas de laboratorio en general para muestras de mineral de hierro grueso y fino. Además, se realizó una simulación en campo, la cual constó de dos vías internas en la planta de Belencito, regando en dos tramos de vía de 25 metros lineales cada uno mineral de hierro, con el fin de observar su comportamiento como capa de balasto. Se evaluó durante 6 meses su comportamiento. Esta prueba en campo se realizó como compensación a la falta de algunos ensayos de laboratorio que no se pudieron realizar por falta de disposición de los equipos. Con esta prueba empírica se pretendió simular condiciones de permeabilidad y resistencia del material.

Los resultados obtenidos se compararon con la norma nacional INVIAS dando como resultado la aceptación del material. De igual manera, con normatividad internacional, donde no es viable el mineral de hierro, presentan especificaciones mucho más exigentes debido a que ven el ferrocarril un medio de transporte convencional, productivo y rentable. A

pesar de que su costo de construcción es elevado, una vez terminado, el costo de mantenimiento es inferior, comparándolo con cualquier otro modo de transporte.

METODOLOGÍA

Figura 1. Flujoograma metodológico.



Fuente: Autores del proyecto.

1. Caracterización del material

Resistencia al desgaste de los agregados gruesos de tamaños mayores de 19 mm (3/4”) por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles (inv-e-219-13).

Ensayo que tiene por objeto determinar la resistencia a la degradación de agregados gruesos de tamaños mayores de 19 mm (3/4”).

$$\%p\u00e9rdidas = \frac{P1 - P2}{P1}$$

Donde,

P1: Masa de la muestra seca antes del ensayo (g).

P2: Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre tamiz de 1.70 mm (g).

Tabla 1. Cálculos ensayo desgaste.

	Granulometrías		
	1	2	3
P1 (g)	10.049,0	10.099,8	10.109,0
P2 (g)	6.797,0	6.814,2	6.196,8
% Desgaste (i)	32,36%	32,53%	38,70%
		% pérdidas	35%

Fuente: autores del proyecto.

Figura 2. Ensayo desgaste en la máquina de los ángeles.



Fuente: autores del proyecto.

2. Equivalente de arena en suelos y agregados finos (inv-e-133-13).

Ensayo que tiene por objeto determinar bajo condiciones normalizadas las proporciones relativas de material arcilloso en agregados finos de tamaño inferior a 4.75 mm.

$$EA = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} * 100$$

Donde,

EA: Equivalente de arena (%).

Tabla 2. Cálculos ensayo equivalente de arena.

Muestra	Lectura de Arena (plg)	Lectura de Arcilla (plg)	Equivalente de Arena (%)
No. 1	12,6	10,2	25,49%
No. 2	12,5	10,1	24,75%
No. 3	12,6	11,0	23,64%
		EA	25%

Fuente: Autores del proyecto.

Figura 3. Ensayo equivalente de arena.



Fuente: Autores del proyecto.

3. Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras (inv-e-230-13)

Ensayo que tiene por objeto determinar los índices de aplanamiento y alargamiento de los agregados que se van a emplear en la construcción de infraestructura.

$$IA = \frac{M3}{M1} * 100$$

Donde,

IA: Índice de aplanamiento (%)

M3: Sumatoria ni

M1: Sumatoria Ri

Tabla 3. Cálculos ensayo índice de aplanamiento.

Tamiz	Masa inicial de cada fracción (g)	% de cada fracción	Masa de partículas aplanadas (g)	Índice de aplanamiento por fracción (%)
1 1/2"	762	5%	173	23%
1"	12280	82%	1743	14%
3/4"	1844,5	12%	174	9%

Tabla 3 (Cont.)

1/2"	149	1%	12	8%
3/8"	0	0%	-	-
1/4"	0	0%	-	-
	15035,5	100%	2101	
	IA		14%	

Fuente: Autores del proyecto.

Figura 4. Ensayo índice de aplanamiento.



Fuente: Autores del proyecto.

$$IL = \frac{M3}{M1} * 100$$

IL: índice de alargamiento (%)

M3: Sumatoria ni

M1: Sumatoria Ri

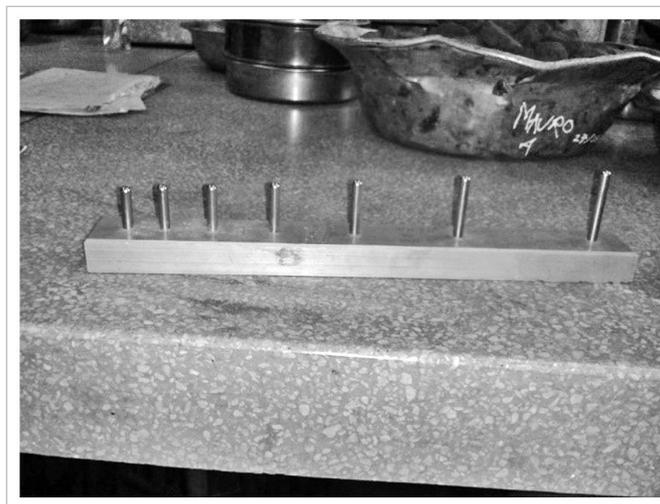
Donde,

Tabla 4. Cálculos ensayo índice de alargamiento.

Tamiz	M1 masa inicial de cada fracción (gr)	% de cada fracción	M3 masa de partículas alargadas (gr)	Índice de aplanamiento por fracción (%)
1 1/2"	762	5%	0	0%
1"	12280	82%	835	7%
1/2"	1844,5	12%	230	12%
3/8"	149	1%	54	-
1/4"	0	0%	-	-
	15035,5	100%	1118	
	IL		7%	

Fuente: Autores del proyecto.

Figura 5. Ensayo índice de alargamiento.



Fuente: Autores del proyecto.

4. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (inv-e-227-13).

tienen un número especificado de caras fracturadas.

Ensayo que tiene por objeto determinar el porcentaje, en masa o por conteo, de partículas de un agregado grueso que

La norma INVIAS cita que para un tamaño máximo nominal de 63mm o 2 1/2" la masa mínima de la muestra es de 30000g.

$$\% \text{ de partículas con número de caras fracturadas} = P = \frac{F}{F + N} * 100$$

Donde,

caras fracturadas especificado.

P: Porcentaje de partículas con el número especificado de caras fracturadas (%).

N: Masa o número de partículas en la categoría de no fracturadas que no cumplen en el criterio de partículas fracturadas.

F: Masa o número de partículas fracturadas con, al menos, el número de

Tabla 5. Cálculos ensayo porcentaje de caras fracturadas.

Tamiz	Masa retenida (g)	F Masa de partículas fracturadas (g)	N Masa de partículas no fracturadas (g)	% de partículas fracturadas
2 1/2"	2056	1665,36	390,64	81%
2"	8657	7877,87	779,13	91%
1 1/2"	9317	7174,09	2142,91	77%
1"	149	129,63	19,37	87%
3/4"	1986	1290,9	695,1	65%

Tabla 5 (Cont.)

1/2"	7532	6326,88	1205,12	84%
3/8"	543	401,82	141,18	74%
	30240		P	80%

Fuente: Autores del proyecto.

Figura 6. Ensayo caras fracturadas.



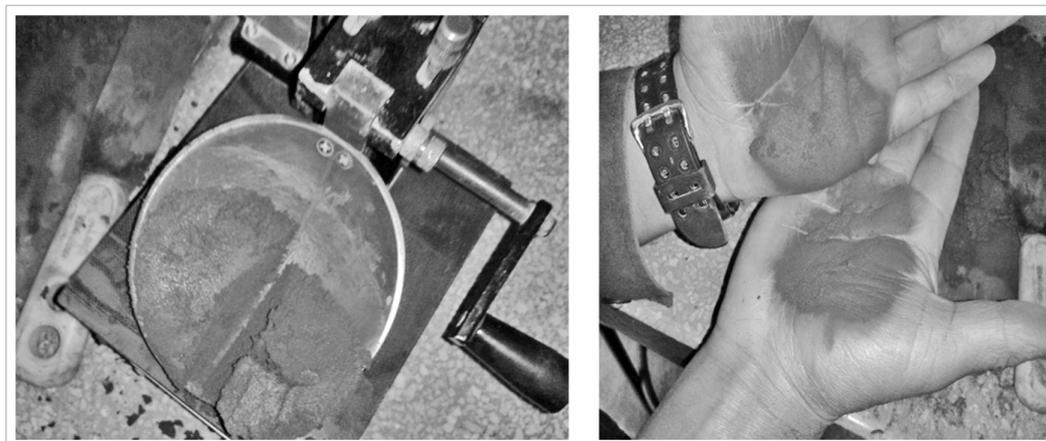
Fuente: Autores del proyecto.

5. Límites de Atterberg - límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad (inv-e-125-126-13)

Al realizar los ensayos de límite líquido, límite plástico e índice plástico (INV - E - 125 - 13 e INV - E - 126 - 13) el mineral

de hierro fino no se dejó trabajar tanto en la realización de la simulación del talud en la cazuela de casa grande como en la realización de los rollos. Esto hace que el mineral de hierro sea un material no plástico.

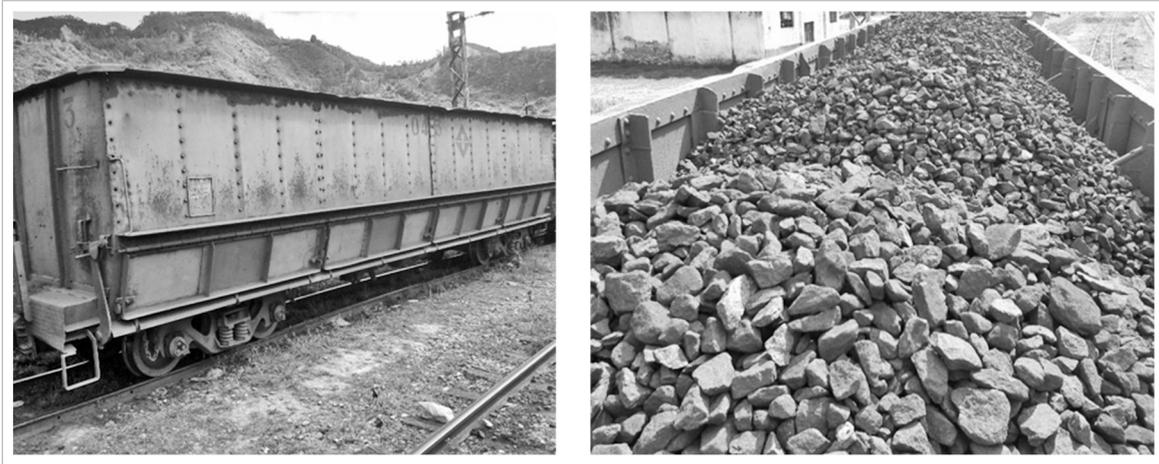
Figura 7. Ensayo límites de Atterberg.



Fuente: Autores del proyecto.

6. Resultados en campo.

Figura 8. Vagón 04-3 para riego de mineral de hierro grueso.



Fuente: Autores del proyecto.

Para analizar el mineral de hierro grueso en campo (Actividad de investigación para simular su comportamiento), se alistó en minas Paz del Río, en el patio de Santa Teresa, un vagón con 35 toneladas de este material y granulometría entre $\frac{3}{4}$ " y $2 \frac{1}{2}$ ". Luego, se procedió a extenderlo en

un tramo de 25 metros lineales en la vía interna de acerías paz del río que conduce al alto horno. Por último, se niveló el tramo de vía y durante 6 meses se realizó seguimiento a este corredor para observar el comportamiento del material.

Figura 9. Comportamiento en campo del mineral de hierro grueso, vía alto horno.



Fuente: Autores del proyecto.

Durante un periodo de 6 meses comprendido entre enero de 2015 a junio

de 2015, se evidenció que el material presentó un sobresaliente comportamiento

como base de asiento en infraestructura ferroviaria. En presencia de agua no se evidenció rastros o acumulaciones de

agua y la vía en el transcurso del tiempo no presentó hundimientos o pérdida de nivelación.

Figura 10. Vagón 02-47 para riego de mineral de hierro fino.



Fuente: Autores del proyecto.

Para analizar el mineral de hierro fino en campo (Actividad de investigación para simular su comportamiento), se alistó en minas Paz del Río, en el patio de Santa Teresa, un vagón con 35 toneladas de este material. Luego, se procedió a extenderlo en un tramo de 25 metros

lineales de vía interna de acerías paz del río que conduce al patio de descargue de materiales. Por último, se niveló el tramo de vía y durante 6 meses se llevó a cabo un seguimiento a este corredor para observar el comportamiento del material.

Figura 11. Comportamiento en campo del mineral de hierro fino, vía patio de descargue de materiales.



Fuente: Autores del proyecto.

Igualmente, durante los 6 meses de estudio del material, comprendido entre enero de 2015 a junio de 2015, se

evidenció que el material no presentó el mejor comportamiento como capa de balasto en infraestructura ferroviaria.

Aunque en presencia de lluvia no se evidenciaron rastros o acumulaciones de agua, la vía presentó hundimientos y deformaciones que se observaron fácilmente por la pérdida de nivelación, a lo largo del tramo en estudio. Cuando se realizó el riego y emparejado de balasto se hizo una nivelación general, pero a lo largo de los seis meses ésta se había perdido especialmente en las juntas donde se unen rieles de 75 lb/yd con eclisas y tornillería de 7/8 x 5". Además, por el tamaño del material, la presencia de agua en el lugar y el peso de los trenes sobre esta vía, el material se dispersó presentando pérdidas elevadas cercanas al 20% del material regado inicialmente.

A diferencia del mineral de hierro grueso, el riego de este material se hizo en un tramo de vía, la cual tiene traviesas de madera (algarrobo). Esto con el fin de observar las diferencias que se puede tener en un tramo de vía con traviesas de concreto como lo fue el tramo de la vía al

alto horno. Como resultado, la vía a patio de descargue de materiales presentó pérdida de inestabilidad, ya que la madera cedió, lo que provocó que la vía férrea aumentará su medida de ancho de trocha. Además, facilitó la pérdida de nivelación por el movimiento de los rieles al paso del tren teniendo en cuenta que los elementos de fijación (clavos) de estas traviesas no son estables y pierden presión con el paso del tiempo.

No es frecuente ni aconsejable estudiar materiales finos para tenerlos como alternativa como capa de balasto, pero por la oportunidad en planta de realizar el trabajo como tema de investigación para su análisis, se decidió hacer una prueba en campo por petición de la parte directiva del Ferrocarril en Acerías Paz del Río. Para capa de balasto siempre se ha de pensar utilizar materiales granulares de tamaños entre 3/4" y 1 1/2" que, preferiblemente, no sean permeables para garantizar el flujo del agua a la capa inferior o sub-balasto.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla 6. Comparación resultados obtenidos en laboratorio del mineral de hierro Vs. requisitos de los agregados para sub-base granular.

Característica	Mineral de hierro vs Sub base Granular				
	Norma de ensayo	Clase A	Clase B	Clase B	Resultados obtenidos
Desgaste en la máquina de los ángeles, máximo - (%)	E-219	50	50	50	35
Límite líquido, máximo (%)	E-125	25	25	25	0
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	6	6	6	0
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	25	25	25	25

Fuente: Autores del proyecto.

Comparando los resultados de los ensayos de laboratorio con la norma INVIAS, se deduce que el mineral de

hierro puede trabajar como material de sub-base granular. Debido a que está en el rango de valores admisibles para ser

aceptado, siendo el valor más crítico el resultado del ensayo de equivalente de arena (25%) ya que está en el límite que exige la especificación. Al no presentar plasticidad el mineral de hierro, se hace atractivo desde el punto de vista de mantenimiento y construcción de infraestructura férrea, porque el material no cambia sus condiciones originales ante la presencia de agua. El valor de desgaste en la máquina de los ángeles (35%) está por debajo del valor admisible (40%) y es un indicativo importante, ya que, la mayoría de bibliografía lo cita dentro de los 3 ensayos más importantes para caracterizar el balasto, debido a que se hace importante la resistencia del material a la degradación por acción de agentes climáticos y del tránsito.

Como el objeto principal de esta investigación es observar la viabilidad del mineral de hierro como capa de balasto, se comparan los valores obtenidos en laboratorio con valores encontrados en bibliografía principalmente normatividad internacional para el recibo del material. Cabe aclarar que la normatividad internacional es muy exigente con los resultados de ensayos de materiales que van a ser utilizados como balasto. Esto debido a que en la mayoría de estos países las vías férreas son de alta velocidad y necesitan en la mayoría de las ocasiones materiales de altísima calidad. Con el fin de asegurar el paso de los trenes por toda la infraestructura férrea nacional. La clasificación internacional que se le puede dar al corredor Belencito - Paz del Río es la clasificación F, porque es una vía que permite una velocidad de operación menor o igual a 30 Km/hora.

Tabla 7. Comparación resultados obtenidos en laboratorio vs normatividad internacional.

Característica	Norma de ensayo INVIAS	Manual de calidad para materiales en la sección estructural - Instituto Mexicano del Transporte	Ministerio de fomento de España	Empresas privadas cantera horizonte - Venezuela	Universidad tecnológica nacional Argentina	Empresa de Ferrocarriles del Estado (EFE) - Chile	Resultados obtenidos
Desgaste en la máquina de los ángeles, máximo - 500 revoluciones (%)	E-219	40	15	18	30	30	35
Límite líquido, máximo (%)	E-125	25	0	35	-	-	0
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	6	0	-	-	-	0
Índice de aplanamiento, máximo (%)	E-229	-	-	3	-	-	14
Índice de alargamiento, máximo (%)	E-230	-	-	3	-	-	7
Porcentaje de caras fracturadas, mínimo (%)	E-227	90	-	97	-	-	80
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	40	-	40	10	10	25

Fuente: Autores del proyecto.

La realización de ensayos de laboratorio y pruebas en campo, permite identificar de manera individual el comportamiento del mineral de hierro grueso y el mineral de hierro fino. Cada uno analizado en laboratorio y en tramos de vía de 25 metros lineales. La idea de estudiar paralelamente el mineral de hierro fino se debe a que, como no se evidencio acumulación de agua en el mineral de hierro grueso ante la presencia de lluvia, se quería indagar, si el material fino tenía el mismo comportamiento, además que había voluntad de la empresa Acerías Paz del Río de prestar material y una vía adicional para analizar de forma pionera este material fino en campo.

El mineral de hierro fino es utilizado de forma habitual por su presencia cercana en planta como material de relleno en paso a niveles, que por algún motivo no fueron construidos en concreto. Dando como resultado por lo menos fluidez al

tráfico que allí transita. Cabe resaltar que en estos lugares no se presenta pérdida de material debido a la compactación que se logra por la repetición de pasadas de los ejes de los vehículos.

Se permite plantear la hipótesis que, este material de mineral de hierro fino, puede ser usado como capa de balasto o material de relleno en los pasos a nivel, brindando protección a las traviesas de madera y/o concreto que se instalan allí para asegurar rieles y contra rieles. Además de brindar seguridad a los usuarios de otros medios de transporte que por allí circulan, ya que, el material al compactarse permite el flujo de vehículos sin ningún problema.

Analizando costos de materiales dentro de Acerías Paz del Río, teniendo como proveedor a Minas Paz del Río, el costo por tonelada del mineral de hierro grueso es de \$79.522 y la tonelada de caliza de granulometría 30-50 es de \$58.760.

Tabla 8. Comparación precio caliza vs mineral de hierro grueso.

Precio de caliza de granulometría 30-50	Precio mineral de hierro grueso
\$58.760 / tonelada (No incluye costo de transporte)	\$79.522 / tonelada (No incluye costo de transporte)

Fuente: Autores del proyecto.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados de laboratorio para el mineral de hierro grueso hacen de este un material viable para ser utilizado como agregado en sub-bases granulares y como capa de asiento (balasto) en infraestructura ferroviaria. Se tiene como soporte principal, el cumplimiento del valor de resistencia al desgaste de los agregados (35%), 5% por

debajo del valor de la especificación que exige un desgaste máximo del 40% para este tipo de materiales.

La no plasticidad del mineral de hierro fino hace práctico el uso de este material en los pasos a nivel del corredor férreo Belencito - Paz del Río, ya que, en esta vía la presencia de agua superficial generada por las lluvias y agua subterránea, provocada por la escorrentía de los taludes es considerable, por ser zona de sub-

páramo. Esto se presenta especialmente al paso por los municipios de Tasco y Betétiva.

La falta de realización de algunos ensayos importantes de laboratorio, por motivos logísticos y de disponibilidad del laboratorio de la universidad, se compensaron con la realización de pruebas en campo mediante el riego de mineral de hierro grueso y fino. Posteriormente, se realizó emparejado y nivelación de dos tramos de vía de 25 metros lineales cada uno, dando como resultado un panorama más cercano y ajustado a la realidad y, de forma empírica, acercándose a los resultados que no se pudieron realizar en laboratorio (permeabilidad y resistencia del material). El trabajo en campo no dio una luz de información exacta como la que se pudo obtener en laboratorio, pero sí, la suficiente para determinar visualmente comportamientos que el material presentó cuando se estuvo evaluando.

Por costos es más viable utilizar como capa de asiento para infraestructura férrea la caliza debido a su precio por tonelada ya que presenta un ahorro de \$20.762 / tonelada en comparación al mineral de hierro grueso. Al respecto, la caliza está en las mismas instalaciones de la empresa y se explota en minas aledañas; entonces, los costos de transporte son bajos para el corredor férreo de influencia Belencito - Paz Del Río.

Con el uso de mineral de hierro como capa de asiento en la zona de Paz de Río y en los 3 Km siguientes a este municipio, se compensan los costos adicionales que hay con respecto a la caliza, debido a que en este municipio es donde se explota el

mineral. Pero, cuando se tiene que mover material a distancias mayores de 3 Km, la utilización de dicho material no se hace viable por lo que se recomienda trabajar en esta franja de vía con caliza que se extrae de Belencito. Además, es el material típico que se usa para esta actividad.

Los trenes que operan en el corredor férreo Belencito - Paz del Río, se mueven por medio de locomotoras eléctricas. Al lograr que estas recorran longitudes más cortas durante el transporte de material de capa de asiento, se economiza el consumo de corriente eléctrica, transportada por la línea de contacto aéreo (catenaria), que conduce 30.000 V provenientes de una sub estación eléctrica y que transfiere la corriente a la locomotora por medio de un pantógrafo.

Se recomienda, con el desarrollo de este proyecto, generar investigaciones adicionales, en especial, con el análisis y caracterización del mineral de hierro fino en los pasos a nivel, el cual nunca antes ha sido considerado materia de investigación, pero que, debido a experiencias accidentales en campo, puede ser una alternativa valiosa para donde pueda considerarse necesario.

AGRADECIMIENTOS

Al director del proyecto Cesar David López por sus consejos y constante colaboración para la realización del presente trabajo de grado. A los Ingenieros Néstor Rafael Perico y Manuel Orlando Hernández por su ayuda ante la gestión del préstamo del laboratorio de Geotecnia de la universidad y el seguimiento durante las sesiones de clase.

A las empresas Acerías Paz del Río y J&C Ingeniería Vial por la facilitación del material y el préstamo de sus instalaciones y de su parque de material rodante para las pruebas en campo en dos de sus principales vías férreas.

Al señor Abadía Mendoza y a las cuadrillas de mantenimiento de vía férrea por su trabajo en campo y continuo acompañamiento en el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

Argueso, M y Tamborero, J. (2006). *Infraestructuras ferroviarias: Mantenimiento preventivo*, Nota técnica de prevención número 958, España.

Cerda, H. (1995). *Los elementos de la investigación*, 2ª edición, Bogotá, Colombia: Editorial el búho.

Gómez, B. Mora, A. Blanco, P. Quirós, B y Bonilla, D. (2012). *Resistencia a la abrasión mediante la prueba de la máquina de los ángeles*, Costa Rica.

Instituto Nacional de Vías. (2013). *Especificaciones generales de construcción de carreteras*, Bogotá, Colombia.

Martínez, R y Gutiérrez, LI. (2008). *Investigación sobre el comportamiento de los diferentes tipos de balasto ante la aplicación de los criterios de las diferentes normativas*, Madrid, España.

Organización Rio Tinto. (2010). *Mineral de hierro. 1ª edición*, Australia: Editorial Rio Tinto limited.

Servicio Nacional de Aprendizaje. (2006). *Caracterización ocupacional transporte férreo*, Bogotá, Colombia.

Ucros, J. (2009). *Propuesta para la implementación de instrumentos de política ambiental en la planta siderúrgica de Acerías Paz del Río S.A.* Bogotá, Colombia.

Universidad Tecnológica de Pereira. (2003). *Desgaste de materiales*, Pereira, Colombia.