



AVANCES EN CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA DE LAS LAJAS RÚSTICAS UTILIZADAS EN CONSTRUCCIONES PATRIMONIALES DE LOS DEPARTAMENTOS DE BOYACÁ Y CUNDINAMARCA - COLOMBIA.

Javier Eduardo Becerra Becerra

Geólogo D.Sc, Docente Investigador.

Grupo de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería Civil GIFIC

Facultad de Ingeniería Civil- Universidad Santo Tomás. Bogotá D.C/Colombia.

E-mail: javierbecerra@usantotomas.edu.co

RESUMEN

Rocas areníticas conocidas coloquialmente como lajas rústicas, han sido utilizadas en la construcción del patrimonio histórico y arquitectónico de ciudades como Bogotá, Tunja y otras del oriente colombiano, presentando además gran demanda para proyectos recientes de ingeniería y arquitectura. La extracción artesanal e indiscriminada, genera residuos que superan el 70% del volumen producido, con impacto negativo en el paisaje, suelo y los recursos hídricos. Los avances en la investigación realizada por el GIFIC de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás, muestran que, a pesar de que las lajas se encuentran en capas superpuestas aparentemente homogéneas, estas presentan diferencias en mineralogía y propiedades texturales, que determinan la dinámica de circulación de fluidos, sus propiedades mecánicas y susceptibilidad al desarrollo de procesos patológicos. Es posible determinar los segmentos que contienen materiales realmente aptos para su uso en obras arquitectónicas, de ingeniería y trabajos de restauración, lo cual permitiría restringir la explotación a los niveles más apropiados, reduciéndose así la generación de residuos y su impacto sobre el medio ambiente.

Palabras-Clave: Areniscas, lajas rústicas, patrimonio, restauración, minería.

1. INTRODUCCION

Las rocas naturales han sido materiales fundamentales en la construcción del patrimonio histórico y arquitectónico colombiano. Las rocas areníticas, en forma de bloques se han utilizado para la construcción de elementos importantes del patrimonio arquitectónico de ciudades del oriente colombiano como Bogotá, Tunja, Villa de Leyva, Barichara y otras. Su utilización como lajas rústicas en revestimientos internos y externos, pavimentos de plazas y calles de poblaciones coloniales ha sido muy frecuente en los departamentos de Boyacá y Cundinamarca, así como también su uso en la forma de agregados pétreos de obras de ingeniería construidas desde el período colonial hasta la actualidad.

Un ejemplo de la utilización de rocas naturales en diversos usos tanto en obras civiles como en arquitectura, es el de las Areniscas de la Formación Une, de edad Albiano Cenomaniano, según Hubach [1] y Campbell [2]. Esta unidad consta de areniscas cuarzosas de color gris claro a blanco amarillento, de grano fino a grueso, localmente conglomeráticas, algo micáceas, con estratificación convergente en capas delgadas a gruesas. El segmento superior de la unidad se caracteriza por capas de arenita de cuarzo y líticos estratificada en capas medias y delgadas, con delgadas intercalaciones arcillosas, que sirven como planos de debilidad que permiten la separación de las capas de arenisca en capas delgadas, conocidas coloquialmente como "lajas rústicas" (Fig. 1A).



Estas lajas rústicas fueron utilizadas desde la época de la Colonia en la construcción del espacio urbano de municipios como Tibasosa, Pesca, Sogamoso, Duitama, Choachí y Bogotá D.C (Fig. 1B y 1C). Hoy día son muy utilizadas en la restauración de esos espacios urbanos históricos y en la construcción, especialmente en lugares turísticos que recrean la arquitectura colonial (Fig. 1D). Su uso se extiende también a espacios urbanos como calles con tránsito vehicular y peatonal, plazas, caminos rurales y también como elementos estructurales y decorativos. Su gran demanda ha dinamizado la actividad minera, existiendo en el momento una gran cantidad de frentes de extracción artesanales, que generan importantes recursos para comunidades campesinas dedicadas a su extracción y comercialización.



Figura 1 - (A) Cantera de producción de lajas rústicas de arenitas de la Formación Une, en la cantera del Barrio San Antonio Norte (Duitama- Boyacá). (B): Utilización de lajas rústicas como pavimentación del parque municipal (Pesca – Boyacá). (C) Utilización en enchape de paredes de iglesias coloniales. (Choachí – Cundinamarca). (D): Utilización en lugares turísticos recreando la arquitectura típica colonial. Pueblito Boyacense (Duitama – Boyacá).

La producción de grandes volúmenes de materiales en varias canteras localizadas en el Altiplano Cundiboyacense, especialmente para trabajos de restauración de patrimonio arquitectónico, se realiza sin ningún apoyo técnico ni estudios que muestren que los materiales extraídos realmente presentan las características apropiadas para su uso en restauración o para revestimientos externos e internos, pisos y pavimentos urbanos, o aún como elementos decorativos. Tampoco se



considera el impacto generado por la extracción indiscriminada sobre los recursos hídricos, el suelo y el medio ambiente en general. El volumen de residuos producidos por la actividad minera en ocasiones supera el 70% del material extraído (Fig. 2A), con graves efectos sobre la estabilidad de los terrenos circundantes, lo cual ha resultado en la generación de graves procesos de remoción en masa, como el deslizamiento ocurrido en mayo de 2011, que dejó incomunicada a la ciudad de Duitama con la Provincia del Norte y Gutiérrez, el departamento de Arauca y Norte de Santander, ocasionando grandes daños a la economía local y regional y alterando significativamente el paisaje (Fig. 2B).

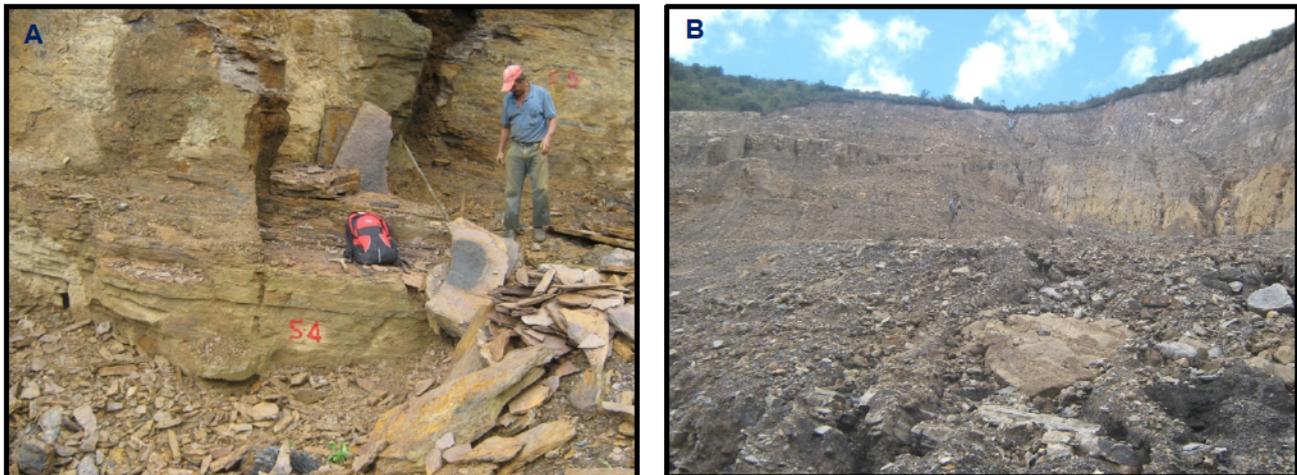


Figura 2 - (A) Explotación de lajas rústicas de arenitas de la Formación Une en el barrio San Antonio Norte (Duitama) con producción de gran volumen de residuos. (B) Proceso de remoción en masa debido a la actividad minera indiscriminada en la vía Duitama – Santa Rosa de Viterbo.

En desarrollo del proyecto “Unidades Geológicas con Potencial para Rocas Ornamentales en los Departamentos de Boyacá, Cundinamarca y sur del Departamento de Santander” (Becerra *et al*) [3] se hizo una inspección de campo en varias canteras de extracción de lajas de la Formación Une. En la cantera cercana al Sauna La Frontera, Barrio San Antonio Norte (Duitama), se presentan varios niveles de extracción en los estratos de areniscas, en los cuales se observan diferencias texturales, de espesor, color y resistencia mecánica entre las diversas capas de arenisca extraídas, relacionadas con características propias de las rocas, como madurez textural, contenido de minerales arcillosos y otras características mineralógicas (Fig. 3). Estas diferencias en sus características serían incidentes en la calidad de los materiales cuando son utilizados en trabajos de restauración o en obras civiles o arquitectónicas y explicarían en gran parte el desarrollo de procesos patológicos, especialmente al usarse diferentes materiales en el mismo espacio, sin ningún proceso de selección y sin tener en cuenta sus particularidades.

Dentro del proyecto de investigación realizado por el Grupo de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería Civil – GIFIC, de la Universidad Santo Tomás de Bogotá, se determinan las propiedades mineralógicas, químicas, texturales, mecánicas y de dinámica de circulación de fluidos en todas las diversas capas de roca explotadas en los procesos mineros en el área Duitama – Santa Rosa de Viterbo, Departamento de Boyacá (Colombia). El problema de investigación se centra en determinar cuáles son los horizontes realmente aprovechables para extracción minera, en los que los materiales pétreos tengan las mejores propiedades para su uso en trabajos de restauración de construcciones, plazas y espacios urbanos de municipios históricos de los departamentos de Boyacá y Cundinamarca, y en obras civiles o arquitectónicas. Determinando los niveles que presentan potencial real de aprovechamiento, se disminuirá considerablemente la producción de residuos sólidos, lo cual impactaría positivamente el paisaje y el medio ambiente. Estos niveles serían los que presenten las mejores características físicas, químicas y tecnológicas para su uso. El trabajo de investigación permitirá saber si realmente las lajas de la Formación Une sirven para su uso indiscriminado en obras viales, en restauración de



revestimientos internos y externos etc., o si hay restricciones para su uso. Los resultados ayudarían a direccionar su uso correcto con un impacto positivo para las comunidades dedicadas a la actividad minera y a la economía local en general.



Figura 3 - Diferencias cromáticas y texturales en lajas rústicas producidas en dos segmentos de la cantera del Barrio San Antonio Norte – Duitama. (A) Lajas de arenitas de cuarzo de color rosado claro, con laminación interna ondulada paralela y escasa matriz arcillosa. (B) Lajas de segmento de arenitas de cuarzo y líticos de color gris oscuro con tonalidades rojizas, con niveles de materia orgánica y fuerte oxidación.

Los trabajos de campo se concentran en el tramo de la vía y las canteras existentes entre Duitama y Santa Rosa de Viterbo en el Departamento de Boyacá, dentro del polígono de coordenadas N:1.137.000 y N:1.140.000; E: 1.117.000 y E:1.120.000 (Plancha Geológica 171 – Duitama). Se dará prelación para el levantamiento de columnas estratigráficas detalladas, muestreo y análisis mecánico del macizo a los puntos levantados dentro del proyecto Unidades Geológicas con Potencial para Rocas Ornamentales en los departamentos de Boyacá, Cundinamarca y sur de Santander (Becerra *et al*) [3], en los cuales se encuentran minas artesanales de extracción de lajas de la Formación Une, correspondientes a las estaciones de campo JEB-107 a JEB-110 y JEB-122 a JEB-128 (Fig. 4).

2. METODOLOGIA

2.1 REVISIÓN Y ACTUALIZACIÓN BIBLIOGRÁFICA

La revisión bibliográfica comprende la compilación de documentos sobre el uso de rocas en la arquitectura y construcción de obras civiles en Colombia, publicaciones sobre diagnóstico de patologías realizadas en monumentos históricos y edificios recientes, bases de datos sobre caracterización tecnológica y también documentos relacionados con procesos industriales para el mejoramiento de la calidad de los materiales rocosos. Para la realización de los ensayos de caracterización tecnológica se tienen en cuenta normas internacionales sobre métodos de ensayos válidos para materiales de construcción y obras civiles.

Se consulta así mismo la Plancha Geológica No 171 – Duitama y su memoria explicativa (Renzoni & Rosas) [4] en relación con las características geológicas de la unidad geológica de estudio (Formación Une). Para entender el entorno donde las rocas en estudio han sido aplicadas y analizar la interacción roca – medio ambiente, se han consultado los datos de calidad del aire en aquellas ciudades donde los procesos de deterioro de las rocas en estudio son más evidentes.

2.2 TRABAJOS DE CAMPO

Comprende la visita a minas activas, previa selección de los lugares con mejores exposiciones, donde se han observado entre otros, los siguientes aspectos:

- Morfología del afloramiento y características geológicas.

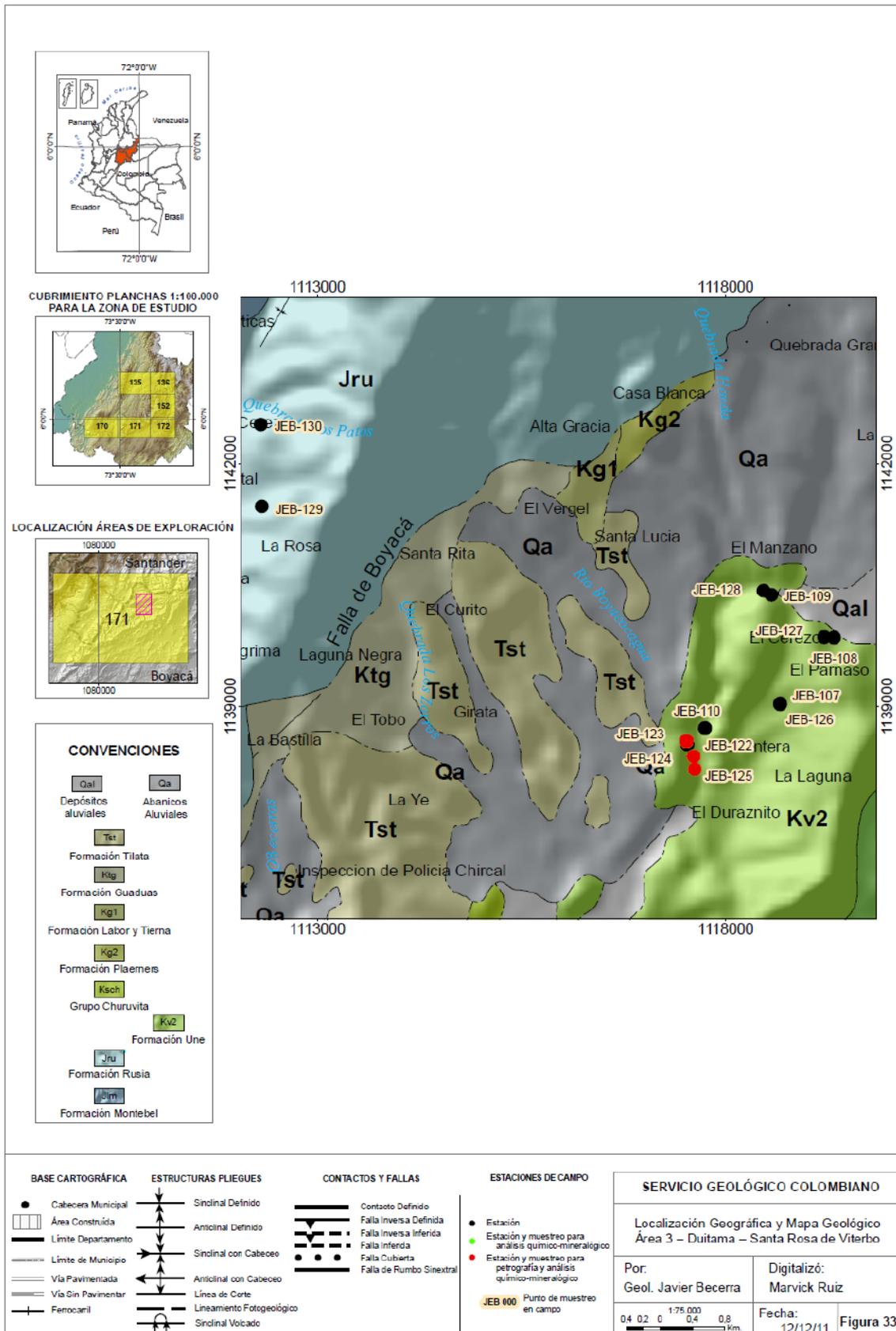


Figura 4 - Localización geográfica y mapa geológico del Área de desarrollo del Proyecto de Investigación. Fuente Renzoni & Rosas 1967.



- Alteración superficial y rasgos texturales y mineralógicos.
- Fracturamiento
- Características de la roca: color, tamaño de grano, textura, homogeneidad etc.
- Características litológicas detalladas de las capas aprovechadas para la producción de lajas en cada uno de los segmentos productivos de la Formación Une.

En cada uno de los niveles donde se observan diferencias sustanciales en las características superficiales de la roca, se ha hecho muestreo sistemático para posteriores ensayos de laboratorio, que incluyen el análisis petrográfico, análisis mineralógicos y químicos y ensayos de caracterización mecánica.

2.3 INVENTARIO DE MATERIALES EN USO Y DIAGNÓSTICO DE PATOLOGÍAS

Se ha realizado el inventario de uso de los materiales investigados y el diagnóstico de patologías en obras civiles donde estos materiales se han utilizado, en ciudades cercanas a las minas donde se extraen los materiales (Duitama y Sogamoso en Boyacá) y en Bogotá D.C.

2.4 TRABAJO DE LABORATORIO

Para el establecimiento de las características mineralógicas, químicas, mecánicas, de susceptibilidad a procesos de alteración (o ensayos de alterabilidad) y establecer los tratamientos industriales, que eventualmente mejorarán las características de las rocas investigadas, se realizan los siguientes ensayos en cada uno de los segmentos diferenciados en el trabajo de campo: análisis petrográfico, determinación de composición mineralógica y química de minerales esenciales, accesorios y de alteración, aplicando técnicas analíticas avanzadas (DRX, FRX, SEM-EDS y Espectroscopia micro-Raman); determinación de densidad, porosidad abierta, total y morfología de poros por porosimetría de mercurio; ensayos de determinación de propiedades hídricas y ensayos de alteración acelerada.

También se realizan los ensayos de caracterización físico-mecánica, estableciendo las propiedades mecánicas de las rocas aprovechadas como lajas rústicas en cada uno de los segmentos identificados con base en las diferencias texturales y mineralógicas, donde se extrae la roca para producción de lajas. De acuerdo a los resultados de la caracterización física y mecánica de las rocas y considerando conjuntamente los resultados de los demás ensayos (análisis químicos, mineralógicos, petrográficos y de dinámica de circulación de fluidos) se podrá determinar el mejor nivel para desarrollar las labores de extracción, limitando de esta forma la producción de residuos sólidos, con una considerable mejoría en las condiciones ambientales de las áreas de extracción y asegurando la producción de los materiales de mejor calidad para su uso en trabajos de restauración y en obras civiles y arquitectónicas.

3. AVANCES Y RESULTADOS

3.1 IDENTIFICACIÓN DE CARACTERÍSTICAS LITOLÓGICAS DE LAS LAJAS RUSTICAS EN LA CANTERA DEL BARRIO SAN ANTONIO NORTE.

La Formación Une (Kiu), de edad Albiano Cenomaniano, es la unidad geológica que ha sido explotada para la extracción de lajas rústicas utilizadas en la construcción del patrimonio histórico y obras civiles de los departamentos de Boyacá y Cundinamarca. Consta de areniscas cuarzosas, de color gris claro a blanco amarillento, grano fino a grueso, localmente conglomeráticas, algo micáceas, con estratificación convergente en capas delgadas a gruesas. Se presentan delgadas intercalaciones de lodolitas negras, las cuales son más frecuentes hacia la parte superior. Tradicionalmente, el aprovechamiento de esta unidad se ha enfatizado en las capas de arenita de cuarzo y líticas estratificadas en forma subhorizontal, en capas delgadas a medias, con intercalaciones lodosas que sirven como planos de arranque, permitiéndose la obtención de lajas



de diferentes formatos tanto en área como en espesor. Las rocas de interés ornamental son las capas de arenita cuarzo y líticas (sublitoarenita), de grano fino, estratificadas en capas tabulares delgadas (3-15cm de espesor), que presentan estructuras sedimentarias internas como laminación interna plana paralela, plana no paralela y ondulada, y frecuentemente con niveles carbonosos en su interior que le dan características texturales y cromáticas especiales.

El desarrollo minero en la cantera artesanal localizada en la vía del Sauna La Frontera al barrio San Antonio Norte de Duitama, se ha realizado en tres bancos de extracción (Fig. 5), en los cuales se extrae el material sin ningún criterio de selección, mezclándose lascas de diferentes capas de roca en cada uno de los bancos y de todos indiferenciadamente, lo cual ha ocasionado que en obras civiles y trabajos de restauración se usen lascas con diferentes propiedades en su composición mineralógica, color, textura y características físico - mecánicas.



Figura 5 - Bancos de explotación de lascas rústicas en la cantera del barrio San Antonio Norte – Duitama.

Como parte de la investigación adelantada por el GIFIC – Universidad Santo Tomás, se hizo el levantamiento estratigráfico en el Banco No 3, determinándose el espesor del paquete de areniscas para la producción de lascas rústicas de 7m, las cuales se extraen mediante arranque manual. Las lascas producidas tienen dimensiones variables entre 0,5 y 2m², con espesores también variables entre 3 y 15cm.

Aunque el material se extrae de todo el espesor aprovechable, en las diferentes capas identificadas en el levantamiento estratigráfico se observan diferencias granulométricas, texturales y cromáticas de base a techo, que permiten dividir el paquete en varios segmentos (Fig. 6):

- **Segmento 1.** De 2,30m de espesor, se caracteriza por ser de arenisca lodosa de cuarzo y líticas, de granulometría arenita muy fina a limo, en capas tabulares de 1-5cm de espesor, con estratificación ondulada paralela continua. La roca presenta color gris marrón, (5YR5/6), con alto contenido de óxidos.



- **Segmento 3.** De 95cm de espesor, está formado por capas de arenita de cuarzo y líticos con matriz limosa, de grano muy fino, que se puede separar en capas muy delgadas de 2 a 5cm de espesor. Color gris marrón (5YR5/6).
- **Segmento 4.** De 1,33m de espesor, constituido por limolita de cuarzo con materia orgánica fuertemente diseminada y cemento ferruginoso, el cual aparece en proporciones mayores a las observadas en los segmentos inferiores. La roca es de color ocre y negro (5G2/1). Presenta partición plana en lajas de hasta 1cm de espesor. Los 51 cm superiores de este segmento son de arenita de cuarzo y líticos finamente laminada, con mayor concentración de materia orgánica respecto al nivel infrayacente y alto contenido de micas. La roca es de color negro
- **Segmento 5.** De 1,95m de espesor, compuesto por arenitas de cuarzo y líticos, estratificada en capas de 1-3cm de espesor con laminación interna ondulada paralela. La roca presenta color gris violáceo (5YR3/4) con niveles de materia orgánica. Los 58cm superiores presentan fuerte enriquecimiento de matriz arcillosa.

Llama la atención, en primer lugar, el cambio de coloración de la roca en los segmentos 4 y 5, relacionados con el aumento en los niveles de materia orgánica, así como las diferencias en granulometría en los diferentes segmentos que varía entre limolita y arena de grano fino.

Una de las ventajas de la utilización de rocas areniscas como lajas, es la posibilidad de uso en formatos irregulares, sin ser necesarios grandes bloques para su aprovechamiento. Sin embargo si es deseable que el tamaño de la laja siga formatos mínimos que permitan su utilización en diferentes ambientes. En la cantera del barrio San Antonio Norte de Duitama, las capas de roca presentan ángulos de inclinación menores de 20°, cortadas por fracturas oblicuas a verticales. El espaciado medio entre fracturas adyacentes es superior a 80cm, lo que aunado al espesor de las capas de 2 a 5cm y a que se encuentran dispuestas en forma subhorizontal, favorece la obtención de lajas o rajones de buenas dimensiones para su utilización en obras civiles o trabajos de restauración (Fig. 7).

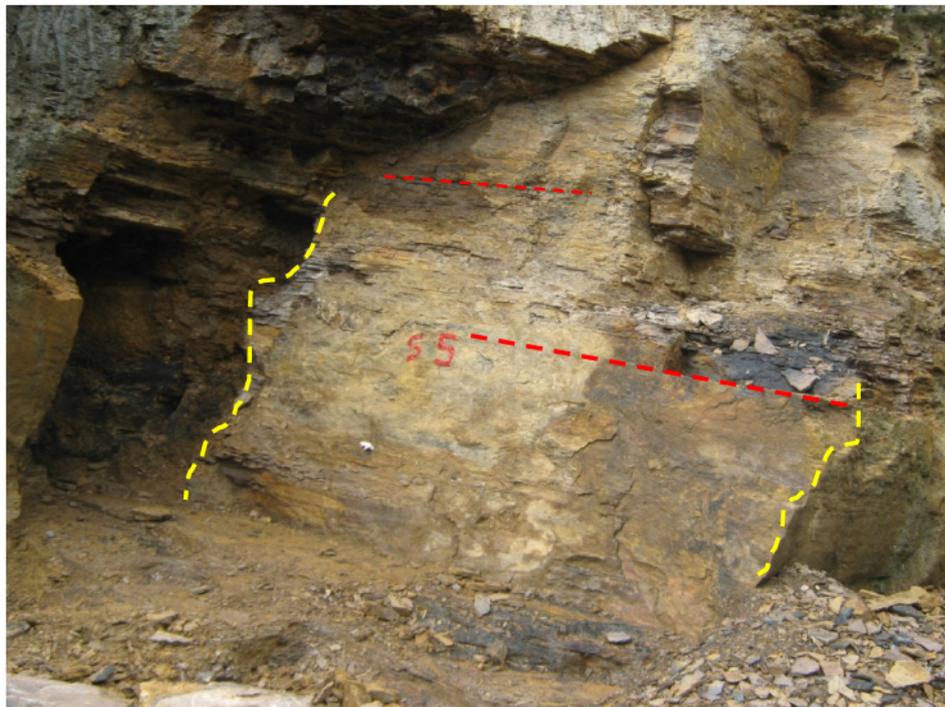


Figura 7 - Segmento 5 del Banco de Producción No 3, mostrando la disposición de los estratos en forma subhorizontal (línea roja) con espesores de arranque aprovechables y las fracturas que limitan el tamaño de los bloques (línea amarilla).



3.2 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS. DENSIDAD, POROSIDAD ABIERTA Y ABSORCIÓN DE AGUA.

Para la determinación de estos parámetros se ha tomado muestras de fragmentos de lajas a intervalos definidos en cada uno de los segmentos en que se dividió el Banco de Explotación No 3, teniendo el cuidado de observar cualquier cambio textural, mineralógico o de color para su posterior correlación con los resultados obtenidos. El promedio de los resultados de los ensayos se basa en los resultados de diez muestras del segmento 1, dos correspondientes al segmento 2, nueve muestras del segmento 3, doce del segmento 4 y veinte del segmento 5, para un total de 53 muestras. Los valores obtenidos (Tabla 1) muestran que las rocas de los segmentos 4 y 5 presentan valores de porosidad significativamente menores que las rocas correspondientes a los segmentos 1 al 3. El coeficiente de absorción de agua también es menor, lo que indicaría una menor susceptibilidad a los procesos de deterioro ocasionado por circulación de fluidos en las lajas correspondientes a estos segmentos. Los segmentos 1, 2 y 3, por el contrario, muestran valores de porosidad y absorción de agua mucho más elevados, que inciden negativamente en la utilización de estos materiales, especialmente en ambientes externos como pavimentos o material de revestimiento.

Tabla 1 - Promedio de resultados de ensayos de laboratorio para muestras de los segmentos 1-5 del Banco de Explotación No 3. Cantera San Antonio Norte (Duitama).

MUESTRAS (10/Segmento)	Segmento 1	Segmento 2	Segmento 3	Segmento 4	Segmento 5
	Arenisca lodosa de cuarzo y líticos, de granulometría arenita muy fina a limo, en capas tabulares de 1-5cm de espesor, con laminación ondulada paralela continua. Color gris marrón (5YR5/6).	Arenita de cuarzo y líticos de grano fino, con fragmentos micáceos en capas tabulares macizas de espesores entre 5 y 10cm, de color gris marrón (5YR5/6). Presenta laminación plana paralela.	Arenita de cuarzo y líticos de grano muy fino, que se puede separar en capas muy delgadas de 2 a 5cm de espesor, con matriz limosa, de color gris marrón (5YR5/6).	Limolita de cuarzo con materia orgánica fuertemente diseminada y cemento ferruginoso. La roca es de color ocre y negro (5G2/1). Presenta partición plana en lajas de hasta 1cm de espesor. Concentración de materia orgánica en los 51cm superiores, dándole a la roca un color negro.	Arenita de cuarzo y líticos, estratificada en capas de 1-3cm de espesor con laminación interna ondulada paralela. La roca presenta color gris violáceo (5YR3/4) con niveles de materia orgánica. Los 58cm superiores presentan un enriquecimiento de matriz arcillosa.
Peso muestra seca (A) gr					
Peso muestra saturada (B) gr					
Peso muestra sumergida (C) gr					
Densidad aparente = A/(B-C)	2,281	2,455	2,460	2,374	2,485
Densidad saturada = B/(B-C)	2,365	2,515	2,491	2,401	2,500
Porosidad = (B-A)/(B-C)*100	8,390	5,979	3,113	2,642	1,518
Absorción = (B-A)/A*100	3,677	2,435	1,266	1,113	0,611

3.3 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS. RESISTENCIA A LA CARGA PUNTUAL.

Los resultados preliminares del ensayo de carga puntual, realizado para determinación de la resistencia a la compresión simple sobre 10 especímenes de cada uno de los segmentos identificados en el Nivel de Extracción No 3, muestran que la resistencia de las muestras de los segmentos 1 y 2 es baja, mientras que la resistencia de las muestras de los segmentos 3, 4 y 5 es



media, según la clasificación de Resistencia de Broch, E & Franklin [5] (Tabla 2). Se puede observar una relación directa entre los parámetros de porosidad y absorción con los de resistencia mecánica, siendo que las muestras de lajas rústicas de los segmentos 4 y 5, que presentan los menores valores de porosidad y absorción de agua, son también los de mayor resistencia mecánica, indicando propiedades favorables al ser utilizadas en los procesos de restauración patrimonial. (Fig. 8). Los menores valores de porosidad y absorción de agua junto con los mayores valores de resistencia mecánica, indicarían una menor susceptibilidad a los procesos de deterioro (Zoghiami et.al) [6] y Galvan, M [7].

Tabla 2 - Resistencia a carga puntual de muestras correspondientes a cada uno de los segmentos del Banco de Explotación No 3.

MUESTRA	PESO (g)	LARGO MAYOR (cm)			LARGO MENOR (cm)			ALTURA (cm)			ALTURA APLICACIÓN CARGA (cm)	CARGA PUNTUAL (KN)
Seg. 1	475,9	13,32	12,54	12,57	6,61	7,09	5,55	3,17	2,88	2,92	2,7	3,8
Seg. 2	367,23	9,81	10,5	10,29	6,48	5,84	6,56	3,13	3,19	3,16	3	5
Seg. 3	581,02	13,42	13,95	13,34	6,62	6,23	5,92	3,66	3,5	3,41	3,3	8
Seg. 4	580	13,10	13,80	13,40	6,60	6,09	5,90	3,67	3,3	3,41	3,0	8
Seg. 5	530,95	16,8	15,64	16,7	6,79	7,09	5,83	2,42	2,2	2,53	2,5	9

MUESTRA	P	P	W	D	A	De ²	Is	dc	Tabla de Clasificación de Resistencia BROCH, E and J.A FRANKLIN
	kN	kg	cm	Cm	mm ²	mm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Menor a 0,3 [kg/cm ²] = muy baja
Seg. 1	3,80	380	6,42	2,70	1732,50	21771,24	1,75	25,26	1,0 a 3,0 [kg/cm ²] = Baja
Seg. 2	5,00	500	6,29	3,00	1888,00	23725,31	2,11	30,61	3,0 a 10,0 [kg/cm ²] = Media
Seg. 3	8,00	800	6,26	3,30	2064,70	25945,79	3,08	44,95	10,0 a 31,0 [kg/cm ²] = Alta
Seg. 4	8,00	800	6,26	3,30	2064,70	25945,79	3,08	44,95	31,0 a 102,0 [kg/cm ²] = Muy Alta
Seg. 5	9,00	900	6,57	2,50	1642,50	20640,26	4,36	62,95	Mayor a 102,0 [kg/cm ²] = Extr. Alta

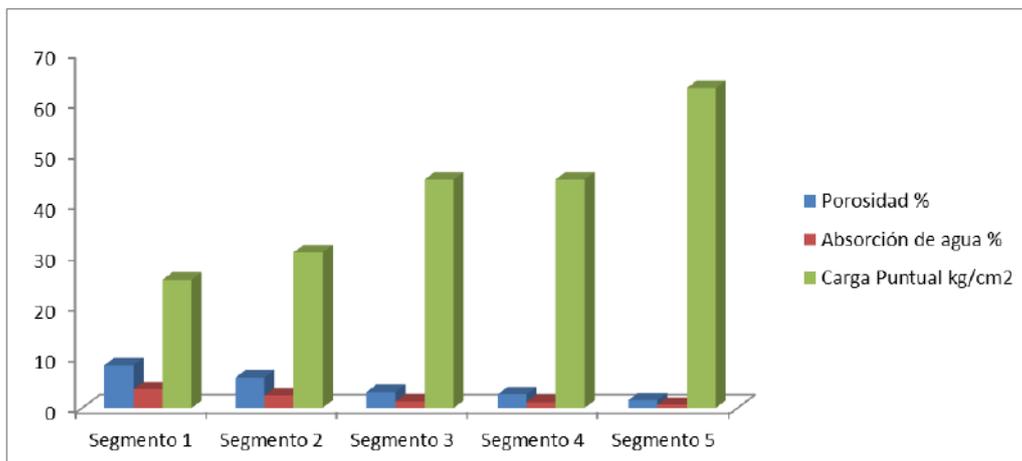


Figura 8 - Relación entre parámetros de porosidad, absorción de agua y carga puntual (resistencia mecánica) en cada uno de los segmentos del banco de producción No 3.

La investigación continúa con una profundización del estudio de la estructura porosa de estos materiales, determinando la clasificación de dichos poros según Choquette y Pray [8] y con la identificación de la porosidad de tipo interpartícula o intergranular y la prosidad intrapartícula o intragranular. Se hará la modelización de las propiedades que dependen del sistema poroso (Benavente) [9], transformando la estructura heterogénea del sistema poroso en los modelos de empaquetamiento de esferas y tubos capilares (Dullien) [10], utilizado para simular permeabilidades en rocas y comprender la dinámica de los procesos de alteración, en particular, en areniscas (André, M.F) [11]. El tratamiento de la porosidad, definiendo los poros de tipo throat o cuello de botella y los poros de tipo chamber, siguiendo la metodología expuesta por Benavente y



su cuantificación por técnicas como la porosimetría de mercurio, el microscopio petrográfico, el MEB-EDS y el análisis de imágenes, permitirán entender los diferentes procesos de alteración que ocurren en las lajas usadas en procesos de restauración y uso en obras civiles.

4. CONCLUSIONES

Los resultados preliminares de la investigación muestran diferencias en propiedades en las lajas rústicas correspondientes a un mismo banco de explotación. Valores diferentes de porosidad y absorción de agua, relacionados a su vez con diferencias en su comportamiento mecánico, determinado inicialmente por el ensayo de carga puntual, muestran que los materiales no son homogéneos y por tanto no pueden ser utilizados indistintamente en trabajos de restauración del patrimonio.

Los resultados hasta ahora obtenidos muestran la importancia de continuar con el estudio detallado de la mineralogía, química y propiedades petrofísicas de las lajas producidas en cada uno de los segmentos. Teniendo en cuenta que los materiales de cada uno de los bancos son utilizados en procesos de restauración sin una clasificación previa, y según los resultados preliminares que muestran diferencias en propiedades como porosidad, absorción y resistencia mecánica, es necesario profundizar en la investigación de sus características para entender el comportamiento frente al desarrollo de procesos patológicos y así escoger sólo aquellos que realmente sean aptos para trabajos de restauración.

5. REFERENCIAS

- [1] Hubach, E. (1957). Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y alrededores. Instituto Geológico Nacional. Bol. Geol., 2. Pp. 93-112.
- [2] Campbell, C. (1962). A section through the Eastern Cordillera of Colombia between Bogotá and Villavicencio. Colombian Society of Petroleum Geologist and Geophysicists, Fourth Annual Field Conference. Pp89-118. Scheibe, R. (1938), Estudios geológicos y paleontológicos sobre la Cordillera Oriental de Colombia. Ministerio de Industrias y Petróleos, Bogotá, 80 pág.
- [3] Becerra, J.E; Montaña, J.H; Escobar, I.E. (2011). Unidades Geológicas con Potencial para Rocas Ornamentales en los Departamentos de Boyacá, Cundinamarca y sur del Departamento de Santander. Servicio Geológico Colombiano S.G.C. Informe final. 247 pág.
- [4] Renzoni, G. y Rosas, H. (1967). Mapa geológico de la Plancha No 171 – Duitama. Escala 1:100.000. Ingeominas. Bogotá.
- [5] Broch E and Franklin, J.A. The Point Load Strength Test. Int. Journal Rock Mech. Min. Sci 9, 1972, Pp. 669-697.
- [6] Zoghiami, D; Gómez-Gras, A and Álvarez, M.P de Luxan (2004). Factores intrínsecos que condicionan el comportamiento físico y la alterabilidad de las areniscas miocénicas utilizadas en la construcción del acueducto romano de Zaghoun – Cartago (Túnez). Revista Materiales de Construcción. Vol.54 no 276. Pp. 34 -49.
- [7] Galvan, M.A. (2011). Estudio del ensayo a Carga Puntual en materiales calizos de la Comunidad Valenciana. Propuesta de modificación del factor de corrección por tamaño y correlación del $I_{s(50)}$ con la resistencia a la Compresión Simple. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. 456pág.
- [8] Choquette, P.W y Pray, L.C. (1970). Geology nomenclature and classification of porosity sedimentary carbonates. AAPG Bulletin, 54. Pp 207-250.
- [9] Benavente, D. (2006). Modelización y estimación de la durabilidad de materiales pétreos porosos frente a la cristalización de sales. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante. 291 pág.
- [10] Dullien F.A.L. (1992). Porous Media Fluid Transport and Pore Structure. Academic Press, San Diego. 574 pág.
- [11] André, MF. (2006). Sandstone weathering rates at the Angkor temples (Cambodia). Proceedings of the International Conference on Heritage, Weathering and Conservation, HWC-2006. Taylor & Francis Editors. Pp 165-175.