



Universidad Industrial de Santander
UIS



**CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y FISICOQUÍMICA DE AGREGADOS
PÉTREOS DEL OCCIDENTE COLOMBIANO, UTILIZADOS EN LA
FABRICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.**

RALPH KENNARD BRACKMAN AMADO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANER
FACULTAD DE FISICOQUIMICA
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA**

2010



**CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y FISICOQUÍMICA DE AGREGADOS
PÉTREOS DEL OCCIDENTE COLOMBIANO, UTILIZADOS EN LA
FABRICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.**

RALPH KENNARD BRACKMAN AMADO

**Trabajo de Grado para optar al título De
Geólogo**

Directores:

LUIS EDUARDO MORENO TORRES

Ingeniero civil, Esp. En ingeniería ambiental.

EDGAR PEÑA

Ingeniero civil, Esp. En vías terrestres.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANER

FACULTAD DE FISICOQUIMICA

ESCUELA DE GEOLOGIA

BUCARAMANGA

2010



DEDICATORIA

**A Nelly Amado Marín, mi madre,
A Ralph Allen Brackman Forbes, mi padre,
A Hollis Allen Brackman Amado, mi hermano,
Y a todos los que siempre han confiado en mí,
A ellos, les doy gracias por apoyarme siempre.
Ralph Kennard Brackman Amado.**



AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la vida y la oportunidad de estudiar Geología.

A mis padres por el sacrificio, el esfuerzo y el apoyo que me han dado.

A la Escuela de Geología y sus docentes, por sus valiosas enseñanzas.

A mis amigos que siempre confiaron en mí, y con quienes compartí momentos inolvidables.

A la corporación para la investigación y Desarrollo en Asfaltos En el Sector Transporte e Industrial. (CORASFALTOS), por brindarme su apoyo y darme la oportunidad de realizar este proyecto.



CONTENIDO

INTRODUCCION	24
1. OBJETIVOS	25
2. MARCO TEORICO.	26
2.1 RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS POR MEDIO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES.	28
2.1.2 Equipo	29
2.1.3 Preparación de la muestra.	32
2.1.4 Procedimiento	33
2.1.5 Cálculos.....	34
2.1.6 Precisión y Tolerancias	35
2.2 PETROGRAFIA EN SECCIÓN DELGADA.....	35
2.2.1 Procedimiento	36
2.2.2 Equipo	36
2.3 DIFRACCION DE RAYOS X (DRX).....	37
2.3.1 procedimiento.....	37
2.3.2 Equipo	38
2.4 ANÁLISIS ELEMENTAL POR ABSORCIÓN ATÓMICA (FRX).....	38
2.4.1 Procedimiento	39
2.4.2 Equipo	39
2.5 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)	39
2.5.1 Procedimiento	39
2.5.2 Equipo	40
3. GEOLOGIA GENERAL DEL AREA DE ESTUDIO.....	41
3.1 MUNICIPIO LA ESTRELLA:	41
3.1.1 Gabro de Romeral.....	41
3.2 ITAGÜÍ:	41
3.2.1 El Stock de Altavista:	41
3.2.2 Depósitos Aluviales:.....	42
3.3 MEDELLIN:	42
3.3.1 Neis La Iguana:	42
3.3.2 Stock de Altavista:.....	43
3.3.3 Batolito Antioqueño:.....	43
3.4 BELLO:.....	43



3.4.1 Anfibolita de Medellín:.....	43
3.4.3 Plutón de Ovejas:.....	44
3.5 COPACABANA:	45
3.5.1 Anfibolita de Medellín:.....	45
3.5.2 Batolito Antioqueño:	45
3.6 GIRARDOTA:.....	45
3.6.1 Anfibolita de Medellín:.....	45
3.7 BARBOSA:.....	46
3.7.1 Batolito Antioqueño:	46
4. DESARROLLO DEL PROYECTO	48
4.1 GENERALIDADES CANTERA A.....	48
4.1.1 Geología de la zona	48
4.1.2 Tectónica.....	50
4.2.1 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando, La Máquina de los Ángeles, 500 revoluciones en seco.....	51
4.2.2 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, Curva de desgaste cada 100 revoluciones.	51
4.2.3 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, Desgaste del árido después de 3 días saturado y superficialmente seco.....	52
4.2.4 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando, La Máquina de los Ángeles, Desgaste del árido después de someterse a alta temperatura.....	53
4.2.5 Análisis petrográfico de agregados.....	54
4.2.6 Difracción De Rayos X (DRX).....	61
4.2.7 Espectrometría De Fluorescencia De Rayos X (FRX).....	65
4.2.8 Microscopía electrónica, SEM	66
4.2 GENERALIDADES CANTERA B.....	77
4.2.1 Geología.....	77
4.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CANTERA B.....	79
4.3.1 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, 500 revoluciones en seco.....	79
4.3.2 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, Curva de desgaste cada 100 revoluciones	79



4.3.3 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, Desgaste del árido después de 3 días saturado y superficialmente seco.....	80
4.3.4 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, Desgaste del árido después de someterse a alta temperatura.....	81
4.3.6 Difracción de rayos X.....	91
4.3.7 Fluorescencia de rayos X.....	95
4.3.8 Microscopía electrónica, SEM.....	96
4.4 GENERALIDADES CANTERA C.....	101
4.4.1 Geología.....	101
4.5.1 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, 500 revoluciones en seco.....	104
4.5.2 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, Curva de desgaste cada 100 revoluciones.....	104
4.5.3 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, Desgaste del árido después de 3 días saturado y superficialmente seco.....	105
4.5.4 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, Desgaste del árido después de someterse a alta temperatura.....	106
4.5.5 Análisis petrográfico de agregados.....	106
4.5.6 Difracción de rayos X.....	116
4.5.7 Fluorescencia de rayos X.....	121
4.5.8 Microscopía electrónica, SEM.....	122
4.6 GENERALIDADES CANTERA D.....	130
4.6.1 Geología.....	130
4.6.2 Tectónica.....	131
4.7 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CANTERA D.....	132
4.7.1 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, 500 revoluciones en seco.....	132
4.7.2 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, Curva de desgaste cada 100 revoluciones.....	132
4.7.3 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, Desgaste del árido después de 3 días saturado y superficialmente seco.....	133



4.7.4 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, Desgaste del árido después de someterse a alta temperatura.....	134
4.7.5 Análisis petrográfico	135
4.7.6 Difracción de rayos X	144
4.7.7 Fluorescencia de rayos X.....	148
4.7.8 Microscopía electrónica, SEM	149
5. COMPARATIVO DE RESULTADOS DE RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASION EN LA MAQUINA DE LOS ANGELES.	163
5.1 RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑO MENOR DE 37,5 MM UTILIZANDO LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES, 500 REVOLUCIONES EN SECO	163
5.2 RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑO MENOR DE 37,5 MM UTILIZANDO LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES, CURVA DE DESGASTE CADA 100 REVOLUCIONES.....	164
5.3 RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑO MENOR DE 37,5 MM UTILIZANDO LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES, DESGASTE DEL ÁRIDO DESPUÉS DE 3 DÍAS SATURADO Y SUPERFICIALMENTE SECO.....	167
5.4 RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑO MENOR DE 37,5 MM UTILIZANDO LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES, DESGASTE DEL ÁRIDO DESPUÉS DE SOMETERSE A ALTA TEMPERATURA.....	168
6. RESUMEN DE RESULTADOS POR CANTERA.....	169
7. CONCLUSIONES	172
8. RECOMENDACIONES	173
9. BIBLIOGRAFIA	174



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. esquema de la máquina de los ángeles. Tomado de INVIAS 2007. NORMA INV E218-4	31
Figura 2. Diagrama de flujo mostrando los procedimientos para la elaboración de la sección delgada (SD)	36
Figura 3. Fotografía representativa del material en el sitio de explotación	49
Figura 4. Secciones delgadas	54
Figura 5. Microfotografías de agregados bajo el microscopio petrográfico mostrando: Basalto (Bas) con matriz (Mt) devitrificada y fenocristal alterado de plagioclasa (Plg), visto con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (A y B) . Basalto (Bas) holocristalino alterado, visto con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (C y D) . Arena fina en sección delgada entre las cuales se resaltan fragmentos de basaltos (Bas) y cuarcita (Cua), vistos con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (E y F)	57
Figura 6. Microfotografías de agregados bajo el estéreo microscopio mostrando: A. Cuarcita (Cua) con cristales de mica muscovita (Msc). B. Basalto (Bas).....	58
Figura 7. Microfotografías de agregados bajo el microscopio petrográfico mostrando: Alteración severa de un basalto (Bas) con vidrio (Vid) volcánico, visto con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (A y B) . Alteración moderada de una tonalita (Ton) con plagioclasa (Plg) sericitizada, vista con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (C y D)	60
Figura 8: Difractograma obtenido en el análisis de la muestra total por DRX (método del polvo) ..	63
Figura 9: Difractograma obtenido en el análisis de arcillas por rayos x (tratamiento K y calentamiento a 550°C).....	64
Figura 10. Microfotografías mostrando: A. Microfotografía del primer agregado tipo basalto bajo el estéreo microscopio. Se destaca la matriz con textura holohialina de tonalidad verde y los fenocristales de plagioclasa color claro y hornblenda de color oscuro, entre otros B. Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Se destaca la matriz en color oscuro y los fenocristales en color claro. C. Áreas analizadas con la microsonda de rayos X, en un sector de la matriz (recuadro amarillo) y en un fenocristal (recuadro rojo) D: Detalle del sector de la matriz analizado. A1 representa el análisis areal para la determinación de la composición química de la matriz. E. Detalle del fenocristal analizado A2 análisis areal para composición química del cristal.	66
Figura 11. Espectros de emisión de rayos X de los análisis Areales A1 y A2.....	67



- Figura 12.** Microfotografía del segundo agregado tipo basalto bajo el estéreo microscopio. Se destaca la matriz con textura holohialina de tonalidad verde y los fenocristales hornblenda de color oscuro..... 68
- Figura 13. Microfotografías mostrando:** **A.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Se destaca la matriz en color oscuro (recuadro amarillo) y la forma de un poro (recuadro rojo) presente en la muestra analizada con la microsonda de rayos X. **B.** Detalle del sector de la matriz analizado. A3 representa el análisis areal para la determinación de la composición química de la matriz. **C.** Detalle de la textura del poro. A4 análisis areal para composición química del material presente en el interior del poro..... 68
- Figura 14.** Espectros de emisión de rayos x de los análisis Areeales A3 y A4 69
- Figura 15. Microfotografías mostrando:** **A.** Fotografía a través del microscopio de luz polarizada en el cual se observa un fragmento de basalto con vidrio volcánico en su matriz, resaltándose su alteración severa (tonos marrones), además se indica los sitios de análisis (recuadros amarillo y rojo) relacionados con los fenocristales presentes en el agregado y la alteración de la matriz, vistos en nicoles paralelos. **B.** La misma imagen anterior, pero con nicoles cruzados..... 70
- Figura 16. Microfotografías mostrando:** **A.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Se destaca posible mineral en color oscuro (recuadro amarillo) y sectores claros y oscuros de la matriz con alteración severa (recuadro rojo) en la muestra analizada con la microsonda de rayos X. **B.** Detalle del mineral analizado. A5 representa el análisis areal para la determinación de la composición química del cristal. **C.** Detalle de los sectores en la matriz analizados. A6 y A7 análisis areales para composición química de la matriz. 71
- Figura 17.** Espectros de emisión de rayos x de los análisis areales A5, A6 y A7 72
- Figura 18. Microfotografías mostrando:** **A.** Fotografía a través del microscopio de luz polarizada en el cual se observa un cristal de plagioclasa con diferentes grados de alteración, leve (recuadro amarillo) y severo (recuadro rojo), siendo éstos los sitios de análisis, vistos en nicoles paralelos. **B.** La misma imagen anterior, pero con nicoles cruzados. 73
- Figura 19. Microfotografías mostrando:** **A.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Se destaca el sector con alteración leve (recuadro amarillo) y el sector con alteración severa (recuadro rojo) presente en la muestra analizada. **B.** Detalle del sector con alteración leve. A8 representa el análisis areal para la determinación de la composición química del sector. **C.** Detalle del sector con alteración severa (zonas claras). A9 análisis areal para composición química del producto de alteración. 74
- Figura 20.** Espectros de emisión de rayos x de los análisis areales A8 y A9..... 75



- Figura 21.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Se destaca las microfracturas presentes en el cristal de plagioclasa. 76
- Figura 22.** Fotografía representativa de los depósitos donde se realiza la extracción de los agregados. 78
- Figura 23.** Secciones delgadas de la cantera B. 81
- Figura 24.** Microfotografías de agregados bajo el estéreo microscopio del tamiz No 4 mostrando **A.** Toba (Tob). **B-C.** Andesitas (An) **D.** Tonalita (Ton) **E.** Neiss (Ne). **F.** Cuarzita (Cu). 84
- Figura 25.** Microfotografías de agregados del tamiz No 10 bajo el microscopio petrográfico mostrando: Toba (Tob) con textura holohialina y matriz con alteración severa, y vesículas rellenas de clorita, en 4 aumentos vista con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (**A y B**). Andesita (An) hipocristalina con matriz microlítica y fenocristal de plagioclasa (Plg), en 4 aumentos vista con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (**C y D**) Tonalita (Ton) con cristales de plagioclasa y cuarzo, en 4 aumentos visto con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (**E y F**). 85
- Figura 26.** Microfotografías de agregados bajo el microscopio petrográfico mostrando: Cuarzita (Cu) del tamiz No 10 en 4 aumentos, vistas con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (**A y B**). Agregados del tamiz No 200, en 10 aumentos, entre los cuales se resaltan hornblendas (Hb), plagioclasas (Plg) y fragmentos alterados (Falt), entre otros, vistos con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (**C y D**). 86
- Figura 27.** Microfotografías de agregados del tamiz No 4 bajo el estéreo microscopio mostrando una toba (Tob) y una andesita (An) con porosidad baja (ϕ). (**A y B**). 87
- Figura 28.** Microfotografías de agregados del tamiz No 4 alterados bajo el estéreo microscopio, mostrando: **A.** Tonalita (Ton) con alteración leve. **B.** Toba (Tob) con alteración severa. 89
- Figura 29.** Microfotografías de agregados bajo el microscopio petrográfico mostrando: Alteración severa de un Tonalita (Ton) con vidrio (Vid) volcánico, del tamiz No 10, visto con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (**A y B**). Alteración moderada de una plagioclasa (Plg-alt) sericitizada, del tamiz No 40 vista con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (**C y D**). 90
- Figura 30:** Difractograma obtenido en el análisis de la muestra total por DRX (método del polvo) 93
- Figura 31:** Difractograma obtenido en el análisis de arcillas por rayos x (tratamiento K y calentamiento a 550°C). 94
- Figura 32.** Microfotografías mostrando: **A** Microfotografía una toba bajo el estéreo microscopio. Se destaca la matriz con textura holohialina de tonalidad verde clara, fenocristales de plagioclasa de color blanco, fenocristales oxidados de color naranja y poros en la muestra, entre otros **B.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Se



destaca la textura de los poros en la muestra, además las áreas analizadas con la microsonda de rayos X, en un sector de la muestra (recuadro amarillo) y en un poro (recuadro rojo) **C**: Detalle del sector del analizado. A1, A2 y A3 representa los análisis areales para la determinación de la composición química. **D**. Detalle y textura del interior del poro analizado A4 análisis areal para composición química del material interno del poro..... 96

Figura 33. Los espectros de emisión de rayos x de los análisis areales A1, A2, A3 y A4 98

Figura 34. Microfotografías mostrando: **A.** Fotografía a través del microscopio de luz polarizada en el cual se observa un fragmento de toba con vidrio volcánico en su matriz, resaltándose su alteración severa (tonos marrones), además se indica los sitios de análisis (recuadros amarillo, rojo y azul) relacionados con la alteración de la matriz y de los minerales, vistos en nicoles paralelos. **B.** La misma imagen anterior, pero con nicoles cruzados. **C.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Se destaca los sectores de análisis con la microsonda de rayos X. **D.** Detalle del sector de la matriz con venillas mineralizadas analizadas. A5 representa el análisis areal para la determinación de la composición química. **E.** Detalle de un sector de la matriz analizado. A6 análisis areal para composición química. **F.** Detalle de mineral analizado. A7 análisis areal para composición química. 99

Figura 35. Los espectros de emisión de rayos x de los análisis areales A5, A6 y A7 100

Figura 36. Perfil representativo de los depósitos en el sitio de explotación. 103

Figura 37. Secciones delgadas de la cantera C. 106

Figura 38: Microfotografías de agregados bajo el estereo microscopio del tamiz #4. Mostrando A. Andesita (An), B.Toba (Tob), C.Tonalitas(Ton), E.neiss (Ne), F.cuarcita (Cu). 112

Figura 39: microfotografías de agregados del tamiz #10, bajo el microscopio petrografico mostrando: Toba (Tob) con textura holoialina y fenocristal de lagioclasa (plg), moderadamente alterada a sericita, en cuatro aumentos vista con nicoles paralelos y nicoles cruzados respectivamente.(AyB). Andesita (An), hipocristalina con matriz microlítica y fenocristal de plagioclasa(plg).en 4 aumentos vista con nicoles paralelos y cruzados respectivamente. (CyD).Cuarcita, en 4 aumentos visto con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (E y F)..... 113

Figura 40. Microfotografías de agregados bajo el microscopio petrográfico mostrando: Agregados del tamiz No 40 en 4 aumentos, entre los cuales ser resaltan algunas tobas (Tob), neises (Ne), plagioclasas (Plg) y feldespato potásico (Fk), entre otros, vistos con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (**A y B**) Agregados del tamiz No 200, en 10 aumentos, entre los cuales ser resaltan hornblendas (Hb), plagioclasas (Plg) y cuarzo (Qz), entre otros, vistos con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (**C y D**)..... 114



Figura 41. Microfotografías de agregados del tamiz No 4 bajo el estéreo microscopio mostrando tobas (Tob) con porosidad alta (ϕ). **(A)** y baja **(B)**..... 115

Figura 42. Microfotografías de agregados del tamiz No 4 alterados bajo el estéreo microscopio, mostrando: una Toba (Tob) y una tonalita (Ton) con alteración moderada (Alt) **(A y B)**..... 115

Figura 43. Microfotografías de agregados del tamiz No 4 bajo el microscopio petrográfico mostrando: Alteración severa de un toba (Tob) con vidrio (Vid) volcánico, visto con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente **(A y B)**..... 115

Figura 44: Difractograma obtenido en el análisis de la muestra total por DRX (método del polvo) 119

Figura 45: Difractograma obtenido en el análisis de arcillas por rayos x (tratamiento K y calentamiento a 550°C)..... 120

Figura 46. Microfotografías mostrando: **A.** Microfotografía del primer agregado tipo toba bajo el estéreo microscopio. Se destaca presencia de poros y en la muestra, además de minerales oxidados de color naranja, entre otros **B.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Se destaca la textura de los poros en la muestra, además los sectores analizados con la microsonda de rayos X, en un sector de la matriz (recuadro amarillo) y en un cristal (recuadro rojo) **C:** Detalle del sector de la matriz analizado. A1 representa el análisis areal para la determinación de la composición química de la matriz. **D.** Detalle del mineral analizado A2 análisis areal para composición química del mineral. 122

Figura 47. Microfotografía del segundo agregado tipo toba bajo el estéreo microscopio. Se destaca el grado de severo de alteración de la muestra. 123

Figura 48. Microfotografías mostrando: **A.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Se destaca la textura superficial de la muestra y la zona analizada (recuadro amarillo) con la microsonda de rayos X. **B.** Detalle del sector de la matriz analizado. A3 representa el análisis areal para la determinación de la composición química. 124

Figura 49. Microfotografías mostrando: **A.** Fotografía a través del microscopio de luz polarizada en el cual se observa un fragmento de toba con vidrio volcánico en su matriz, resaltándose su alteración severa (tonos marrones), además se indica los sitios de análisis (recuadros amarillo, rojo y azul) relacionados con la alteración de la matriz y de los minerales, vistos en nicoles paralelos. **B.** La misma imagen anterior, pero con nicoles cruzados. **C.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Se destaca los sectores de análisis con la microsonda de rayos X. **D.** Detalle del sector de la matriz analizado. A4 representa el análisis areal para la determinación de la composición química. **E.** Detalle de un mineral analizado. A5 análisis areal para composición química. **F.** Detalle de una vena mineralizada analizada. A6 análisis areal para composición química. 125



- Figura 50.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Se destaca la microfracturas presente en la muestra. 126
- Figura 51.** Microfotografías mostrando: **A.** Fotografía a través del microscopio de luz polarizada en el cual se observa un fragmento de toba con vidrio volcánico en su matriz, resaltándose su alteración moderada a severa (tonos marrones), y fenocristales de plagioclasa, se indica los sitios de análisis (recuadros amarillo y rojo) relacionados con los fenocristales presentes en el agregado y la alteración de la matriz, vistos en nicoles paralelos. **B.** La misma imagen anterior, pero con nicoles cruzados. 127
- Figura 52.** Microfotografías mostrando: **A.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Se destaca los sectores de análisis con la microsonda de rayos X. **B.** Detalle del sector de la matriz analizado. A7 y A8 representa los análisis areales para la determinación de la composición química. **C.** Detalle de un mineral analizado. A9 análisis areal para composición química. 128
- Figura 53.** Fragmentos de roca con textura gnéissica en la fuente de materiales 130
- Figura 54.** Secciones delgadas de la cantera D. 135
- Figura 55.** Microfotografías de agregados bajo el estéreo microscopio, mostrando **A-B.** Gabros (Gbr) **C.** Neis (Ne)-**D.** Esquistos (Es)..... 138
- Figura 56.** Microfotografías de agregados del tamiz No 10 bajo el microscopio petrográfico mostrando Gabro (Gbr) con cristales de plagioclasa (Plg) y hornblenda (Hb), del tamiz No 10 en 4 aumentos, vistas con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (**A y B**). Tonalita (Ton) con cristales de plagioclasa (Plg) y cuarzo (Qz) del tamiz No 10 en 4 aumentos, vistas con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (**C y D**) Agregados del tamiz No 80 en 4 aumentos, entre los cuales se resalta la plagioclasa (Plg) y la hornblenda (Hb), vistos con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (**E y F**)..... 139
- Figura 57.** Microfotografías de agregados bajo el microscopio petrográfico mostrando: Agregados del tamiz No 200, en 10 aumentos, entre los cuales se resaltan hornblendas (Hb), plagioclasas (Plg) y opacos (Opa), entre otros, vistos con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (**A y B**)..... 140
- Figura 58.** Microfotografías de agregados del tamiz No 4 alterados bajo el estéreo microscopio, mostrando: un gabro (Gbr) con alteración moderada (Alt) y un neis (Ne) con alteración leve (Alt) (**A y B**)..... 142
- Figura 59.** Microfotografías de agregados del tamiz No 10 bajo el microscopio petrográfico mostrando: Alteración moderada de un gabro (Gbr) con plagioclasa sericitizada (Alt), vista con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (**A y B**). 143



Figura 60: Difractograma obtenido en el análisis de la muestra total por DRX (método del polvo) 146

Figura 61: Difractograma obtenido en el análisis de arcillas por rayos x (tratamiento K y calentamiento a 550°C)..... 147

Figura 62. Microfotografías mostrando: **A.** Microfotografía del agregado tipo tonalita bajo el estéreo microscopio. Se destaca los cristales de hornblenda de tonalidad verdosa oscura y plagioclasa de color claro. **B.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior, resaltándose la textura superficial de los cristales. Sobre este sector se realizó el microanálisis cuantitativo con el detector de espectroscopía por dispersión de energía (EDS). **C.** Espectro de emisión de rayos x del microanálisis. 149

Figura 63. Microfotografías mostrando: **A.** Microfotografía del agregado tipo gabro bajo el estéreo microscopio. Se destaca los cristales de hornblenda de tonalidad verdosa oscura. **B.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior, resaltándose la textura superficial de los cristales. Sobre este sector se realizó el microanálisis cuantitativo con el detector de espectroscopía por dispersión de energía (EDS). **C:** Espectro de emisión de rayos x del microanálisis. 152

Figura 64. Microfotografías mostrando: **A.** Fotografía a través del microscopio de luz polarizada en el cual se observa un fragmento de Tonalita (Ton) con cristales de plagioclasa (Plg) y cuarzo (Qz), vistos en nicoles paralelos. **B.** La misma imagen anterior, pero con nicoles cruzados.**C.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior, resaltándose la textura superficial de los cristales. Sobre este sector se realizó el microanálisis cuantitativo con el detector de espectroscopía por dispersión de energía (EDS). **C:** Espectro de emisión de rayos x del microanálisis. 154

Figura 65. Microfotografías mostrando: **A.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido de un sector del mismo agregado anterior. Sobre este sector se realizó el microanálisis cuantitativo con el detector de espectroscopía por dispersión de energía (EDS). **B.** Espectro de emisión de rayos x del microanálisis. 156

Figura 66. Microfotografías mostrando: **A.** Fotografía a través del microscopio de luz polarizada en el cual se observa un fragmento de Gabro (Gbr) con cristales de plagioclasa (Plg) y hornblenda (Hb), vistos en nicoles paralelos. **B.** La misma imagen anterior, pero con nicoles cruzados. 158

Figura 67. Microfotografías mostrando: **A.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Sobre este sector se realizó el microanálisis cuantitativo con el detector de espectroscopía por dispersión de energía (EDS). **B.** Espectro de emisión de rayos x del microanálisis..... 159



Figura 68. Microfotografías mostrando: **A.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido de un sector del mismo agregado anterior. Sobre este sector se realizó el microanálisis cuantitativo con el detector de espectroscopía por dispersión de energía (EDS). **B.** Espectro de emisión de rayos x del microanálisis. 161

Figura 69. Comparativo de resistencias para el ensayo de 500 revoluciones en seco..... 163

Figura 70. Escala de desgaste cada 100 revoluciones, Para la cantera A. 164

Figura 71. Escala de desgaste cada 100 revoluciones, Para la cantera B. 165

Figura 72. Escala de desgaste cada 100 revoluciones, Para la cantera C. 165

Figura 73. Escala de desgaste cada 100 revoluciones, Para la cantera D. 166

Figura 74. Comparativo de desgaste después de tres días de saturado en agua. 167

Figura 75. Comparativo de desgaste después de someterse a altas temperaturas. 168



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Carga abrasiva	32
Tabla 2. Tabla de gradación	33
Tabla 3. Cálculo de Resultados de Conteo de Partículas	55
Tabla 4. Composición de la muestra	56
Tabla 5. Alteración del material	60
Tabla 5^a. Contenido teórico de SiO ₂ en las muestras	61
Tabla 6. Datos extraídos de los Difractogramas	62
Tabla 7. Mineralogía global de la muestra	62
Tabla 8. Resultados FRX muestra	65
Tabla 9. Composición química	67
Tabla 10. Composición química	69
Tabla 11. Composición química	72
Tabla 12. Composición química	75
Tabla 13. Cálculo de Resultados de Conteo de Partículas	82
Tabla 14. Composición de la muestra	83
Tabla 15. Porosidad	87
Tabla 16. Alteración	89
Tabla 16^a. Contenido teórico de SiO ₂ en las muestras	90
Tabla 17. Datos extraídos de los Difractogramas	91
Tabla 18. Mineralogía global de la muestra	92
Tabla 19. Resultados FRX muestra	95
Tabla No. 20: Composición química	97
Tabla No. 21: Composición química	100
Tabla 22. Cálculo de Resultados de Conteo de Partículas	108
Tabla 23. Composición de la muestra	109
Tabla 24. Porosidad	110
Tabla 25. Alteración del material	111
Tabla 25^a. Contenido teórico de SiO ₂ en las muestras	116
Tabla 26. Datos extraídos de los Difractogramas	117
Tabla 27. Mineralogía global de la muestra	118
Tabla 28. Resultados FRX muestra	121
Tabla 29. Composición química	123
Tabla 30. Composición química	124



Tabla 31. Composición química.	126
Tabla 32. Composición química.	129
Tabla 33. Cálculo de Resultados de Conteo de Partículas.	136
Tabla 34. Composición de la muestra.	137
Tabla 35. Alteración.	142
Tabla 35^a. Contenido teórico de SiO ₂ en las muestras.	143
Tabla 36. Datos extraídos de los Difractogramas.	144
Tabla 37. Mineralogía global de la muestra.	145
Tabla 38. Resultados FRX muestra.	148
Tabla 39. Composición química.	151
Tabla 40. Composición química.	153
Tabla 41. Composición química.	155
Tabla 42. Composición química.	157
Tabla 43. Composición química.	160
Tabla 44. Composición química.	162



RESUMEN

TÍTULO:

CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y FISICOQUÍMICA DE AGREGADOS PÉTREOS DEL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA, UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.*

AUTOR:

RALPH KENNARD BRACKMAN AMADO**

PALABRAS CLAVES:

Agregados pétreos, petrografía, mineralogía, Mezclas Asfálticas.

DESCRIPCIÓN:

El presente proyecto identifica y caracteriza la mineralogía, composición y resistencia al desgaste, de cuatro muestras de agregados pétreos ubicados en el occidente colombiano. Implementando al estudio de agregados pétreos, análisis de laboratorio que no son frecuentes en el momento de caracterizar o localizar las fuentes de extracción de rocas para ser utilizados en mezclas asfálticas.

Estos análisis de laboratorio están comprendidos por: Petrografía, Análisis de Difracción de rayos X (DRX), Análisis por Fluorescencia de rayos x (FRX) y Microscopia de barrido Electrónico (SEM). Que se emplearon para conocer tanto, la mineralogía presente en las rocas, como los diferentes compuestos químicos presentes en cada una de ellas. Además de la realización de un ensayo de laboratorio llamado Resistencia al desgaste en la máquina de los ángeles, la cual mide la tolerancia que tiene el conjunto de rocas o agregados pétreos al ser sometidos a fenómenos de abrasión. Incluye también la presentación de resultados de los ensayos de laboratorio mencionados, para cuatro canteras ubicadas en el occidente colombiano y conclusiones obtenidas a partir de los mismos.

Como aporte a la pasantía de investigación se recibió, clasificó, almacenó, organizó, aportó, guardó y manejó información confidencial, técnica e investigativa de la corporación para la investigación y Desarrollo en Asfaltos En el Sector Transporte e Industria. (CORASFALTOS).

* proyecto de grado en modalidad de Pasantía de Investigación.

** Facultad de ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología, Director: Luis Eduardo Moreno Torres, Codirector: Edgar Peña.



ABSTRACT

TITLE:

MINERALOGICAL AND CHEMICAL CHARACTERIZATION OF STONE AGGREGATE OF THE DEPARTMENT OF ANTIOQUIA, USED IN THE MANUFACTURE OF ASPHALT MIXES.*

AUTHOR:

RALPH KENNARD BRACKMAN AMADO**

KEYWORDS:

Stone aggregates, petrography, mineralogy, Asphalt Mixtures.

DESCRIPTION:

This project identifies and characterizes the mineralogy, composition and wear resistance of four samples of rock aggregates located in Colombian west. Implementing in the study of stone aggregates, laboratory tests are not common at the time to characterize or identify the sources of extraction of rocks for use in asphalt mixes.

These laboratory tests are covered by: Petrography, Analysis of X-ray diffraction (XRD) analysis by x-ray fluorescence (XRF) and scanning electron microscopy (SEM). That was used to meet both the mineralogy present in the rocks, as different chemical compounds present in each. In addition to conducting a laboratory test called wear resistance in the machine of the angels, which measures the tolerance that has the set of rocks or stone aggregates when subjected to extreme abrasion.

It also includes the presentation of results of laboratory tests mentioned above, for four currently active quarries located in western Colombia and the conclusions drawn from them.

As an additional contribution to the internship the student engaged in an internal research group of the corporation, and so it received, classified, stored, organized, produced, stored and handled confidential information, technical and research of the Corporation for Research and Development Asphalt Transport and Industrial Sector. (CORASFALTOS).

* Grade Project in modality of Investigation Internship.

** Faculty of engineering's physicist- chemicals, School of Geology, Director: Luis Eduardo Moreno Torres, Codirector: Edgar Peña.



INTRODUCCION

Estudiar la influencia de la morfología y mineralogía de los agregados en el desempeño de mezclas asfálticas es una necesidad imperiosa, ya que el reciente auge de inversión en infraestructura vial a lo largo de Colombia se traduce en una oportunidad comercial y de crecimiento tecnológico para las canteras productoras de agregados pétreo las cuales, a su vez, tienen la responsabilidad de suministrar agregados de primera calidad que permitan la construcción de vías de alta durabilidad y desempeño. Debido a que los agregados pétreos comprenden un 90-95% en peso del total de la mezcla asfáltica y un 75-85% en volumen de la misma, sus propiedades físicas y mineralógicas sobre las cuales depende la capacidad de soporte de carga de un pavimento afectan directamente las propiedades de una mezcla, como su trabajabilidad y el desempeño de un pavimento.

Por otro lado, las propiedades físicas de los agregados como son la gradación, forma de partícula (Redondez), mineralogía y textura superficial influyen igualmente en el desempeño de las mezclas asfálticas. La cuantificación exitosa de irregularidades geométricas del agregado es esencial para entender sus efectos sobre el desempeño del pavimento y para seleccionar agregados que produzcan una calidad adecuada del pavimento, debido a que estas características afectan en gran medida la resistencia al ahuellamiento del pavimento asfáltico.

Dada la importancia de conocer estas características físicas y químicas de los materiales fuente utilizados para la producción de mezclas asfálticas, y con el fin de tratar de mejorar y optimizar la calidad de la mezcla asfáltica; se ha concebido el proyecto “Caracterización mineralógica y fisicoquímica de agregados pétreos del occidente colombiano, utilizados en la fabricación de mezcla asfáltica.” Liderado por la empresa CORASFALTOS. El cual se espera sirva de apoyo y punto de partida para estudios posteriores.



1. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

Caracterizar desde el punto de vista mineralógico y fisicoquímico agregados pétreos del occidente colombiano, Para su uso en mezclas asfálticas.

OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Determinar la resistencia al desgaste de los agregados, utilizando la máquina de los ángeles.
- Realizar secciones delgadas para su análisis y descripción en petrografía óptica.
- Realizar ensayos no convencionales en el análisis de agregados pétreos tales como: microscopía electrónica, difracción de rayos x, análisis elemental por absorción atómica, para identificar microfracturas, compuestos y elementos químicos presentes en el material.



2. MARCO TEORICO.

El término agregados se refiere a cualquier combinación de arena, grava o roca triturada en su estado natural o procesado. Son generalmente encontrados en ríos y valles, donde han sido depositados por las corrientes de agua o yacimientos de rocas ígneas o metamórficas con condiciones especiales de calidad.

En general los agregados pétreos se clasifican en 4 grandes grupos: Depósitos aluviales, materiales de arrastre, las calizas, los ígneos y metamórficos. Los agregados son usados principalmente en la fabricación de mezclas de concreto, asfalto, mortero, como bases y sub-bases en la construcción de vías, drenajes o para vías de ferrocarril. Los agregados son productos minerales imprescindibles para la sociedad, en general son materiales de bajo costo, abundantes en la naturaleza, por lo que deben estar situados cerca a los centros de consumo, teniendo en cuenta su alta sensibilidad a los costos de transporte.

En cuanto a las etapas que se llevan a cabo para la extracción de estos materiales, estas inician con la exploración en donde se localiza el depósito que puede abastecer al mercado a un precio competitivo. Posteriormente se realiza la extracción de los agregados, utilizando maquinaria pesada, los cuales son llevados a la planta de beneficio para su lavado, trituración y clasificación, quedando así listos para el envío a los centros de consumo. (RAMIREZ 2008)

Paralelo al desarrollo de la actividad minera, se llevan a cabo los procesos de rehabilitación y recuperación morfológica y ambiental del suelo, para finalmente darle a estos otros usos como la agricultura, la ganadería, la recreación, urbanización o cualquier otro uso industrial. (Asogravas, 2007).

Muy seguramente los griegos fueron los primeros en observar las propiedades como lo son su resistencia durabilidad etc. siendo los romanos más adelante los que perfeccionaron el proceso de fabricación, seleccionando rudimentaria y cuidadosamente las propiedades individuales de cada tipo de roca en su uso.¹

¹ (www.franciscorama.com/docs/conservacionhistoria.pdf)



Mas adelante con llegada de la tecnología se ha podido determinar que en las mezclas asfálticas el agregado es el encargado de dar la resistencia mecánica a la estructura del pavimento, pero hasta la fecha ha sido difícil relacionar de manera cuantitativa las características del agregado con la rigidez de las mezclas asfálticas. En este sentido fue publicado recientemente un estudio realizado por investigadores del Instituto Coreano de Tecnología de la Construcción junto con Chung-Ang University y Kunsan National University ² , donde describen una ecuación predictiva del módulo dinámico de mezclas asfálticas en función de algunos parámetros de mezcla y condiciones de prueba. Allí se evaluó el comportamiento de mezclas asfálticas a varias temperaturas y frecuencias de carga y se construyó la ecuación predictiva utilizando análisis de regresión no lineal. Las mezclas asfálticas utilizadas en el estudio contenían un agregado de granito junto con ligantes asfálticos PG 58-22 y PG 64-22 y fueron evaluadas a cinco diferentes temperaturas (-10, 5, 21, 40 y 55°C) y seis diferentes frecuencias de carga (0,1; 0,5; 1; 5; 10 y 25 Hz), se emplearon un total de 540 resultados de ensayos de módulos dinámicos para construir la ecuación predictiva.³ De los resultados del estudio Coreano se deduce que el módulo dinámico de mezclas asfálticas aumenta con el aumento en la frecuencia de carga y la disminución en la temperatura, y el ángulo de fase disminuye con el aumento en la frecuencia de carga y la disminución de la temperatura. Se concluye así que:

-La rigidez de las mezclas asfálticas Coreanas es sensible a la temperatura y frecuencia de carga.

-No se encontró un efecto significativo de los vacíos de aire en el módulo dinámico.

El alto coeficiente de correlación encontrado ($R^2 = 0,98$) soporta el uso de la ecuación, la cual fue también verificada mediante comparaciones entre el módulo

² (Cho, Park y Hwang 2010).

³ (Cho, Park y Hwang 2010).



dinámico medido usando núcleos tomados de la sección del tramo de prueba Hanyang APT y el módulo dinámico predicho ⁴

Surgen también ensayos como el ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles, que permite analizar la resistencia de los agregados a ser rayados, y determina su resistencia al desgaste (abrasión). Este ensayo consiste básicamente en colocar el agregado dentro de un cilindro rotatorio con una carga de bolas de acero por un periodo de tiempo especificado, después del cual se determina el porcentaje de desgaste sufrido, el cual no deberá mostrar una pérdida mayor al 25% en peso.

Gracias a estos avances en la tecnología se ha podido determinar que las propiedades físicas de los agregados como son la gradación, forma de partícula (angularidad), mineralogía y textura superficial influyen igualmente en el desempeño de las mezclas asfálticas. La cuantificación exitosa de irregularidades geométricas del agregado es esencial para entender sus efectos sobre el desempeño del pavimento y para seleccionar agregados que produzcan una calidad adecuada del pavimento, debido a que estas características afectan en gran medida la resistencia al ahuellamiento del pavimento asfáltico. Algunas investigaciones reportan la influencia de la clase de trituradores empleados y sus parámetros de operación en la Redondez de los agregados minerales. (TOPAL.A., Y SENGOZ. B. 2005).

2.1 RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS POR MEDIO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES.

Este ensayo ha sido ampliamente usado como un indicador de la calidad relativa o la competencia de diferentes fuentes de agregados pétreos de similares composiciones mineralógicas. Los resultados no brindan automáticamente comparaciones validas entre fuentes marcadamente diferentes en origen,

⁴ (Cho, Park y Hwang 2010).



composición o estructura.⁵ En síntesis este ensayo se emplea para determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados, empleando la citada maquina con una carga abrasiva.

2.1.2 Equipo

La máquina para el ensayo de desgaste de los ángeles tiene las siguientes características: Consiste en un cilindro hueco, con una longitud interior de 508 mas o menos 5mm (20 más o menos 0.2”) y un diámetro interior, de 711 mas o menos 5 mm (28mas o menos 0.2”), fabricado con un aplaca de acero de espesor entre 11.5 y 13mm.

El cilindro lleva sus extremos cerrados y tiene en el centro de cada extremo un eje, que no penetra en su interior. Quedando el cilindro montado de modo que pueda girar en posición horizontal, con una tolerancia en pendiente del 1% con el eje. El cilindro estar provisto de una abertura de 150 más o menos 3 mm de ancho, preferiblemente a lo largo del tambor para introducir y retirar con facilidad la muestra que se desea ensayar, y un entrepaño fijo, para conseguir la rotación de la mezcla y de la carga abrasiva. La abertura podrá cerrarse por medio de una tapa con empaque que impida la salida del polvo, fijada por medio de pernos. La tapa se diseña de manera tal que se mantenga el contorno cilíndrico del interior.

El entre paño se sitúa entre 380 y 820 mm del borde más cercano a la tapa, de modo que la carga no caiga sobre la tapa durante el ensayo, ni se ponga en contacto con ella en ningún momento. El entrepaño será desmontable, de acero, ocupando longitudinalmente toda generatriz del cilindro y se proyectara radialmente, y hacia el centro de la sección circular del cilindro en longitud de 89 mas o menos 2 mm (3.5 más o menos 0.1”). Tendrá un espesor de 25 más o menos 1 mm que permita montarlo por medio de pernos u otro medio apropiado, de forma que quede instalado de un modo firme y rígido. El entrepaño deberá ser

⁵ INVIAS 2007



sustituido cuando su ancho sea menor de 86 mm en cualquiera de sus puntos y espesor sea menor de 23 mm.

La maquina es accionada y contrabalaceada en forma tal, que debe mantener la velocidad periférica básicamente uniforme. Si se utiliza un perfil angular como entrepaño, el sentido de rotación debe ser tal que la carga se recoja sobre la superficie exterior del perfil.

La pérdida de velocidad y el deslizamiento del mecanismo de transmisión son causa frecuente de que los resultados del ensayo no coincidan con los obtenidos en otra máquina de los ángulos con velocidad periférica constante.

La base de la máquina deberá estar apoyada sobre un piso de concreto o de bloques de roca, convenientemente nivelado. (Ramírez, J. 1984).

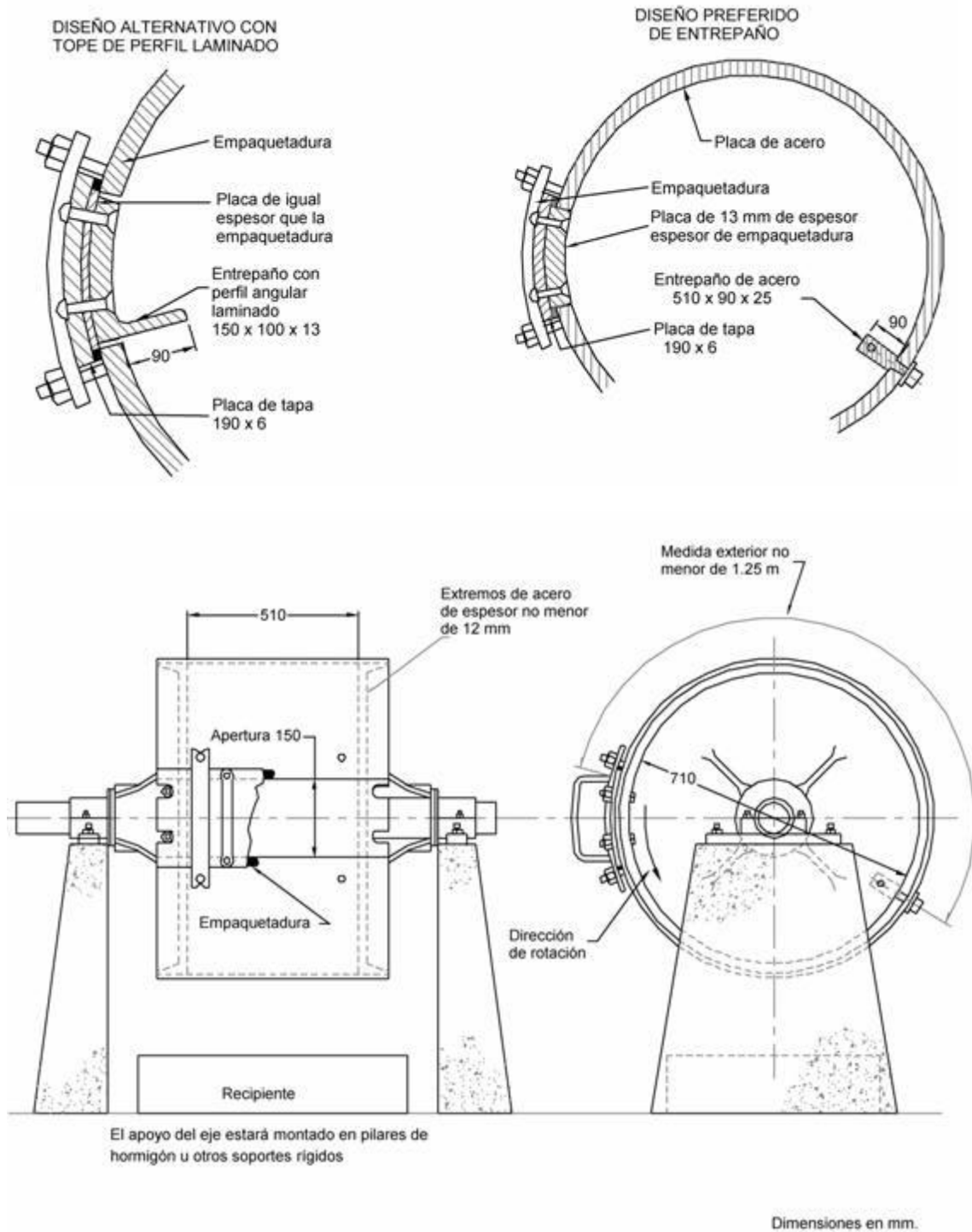


Figura 1. esquema de la máquina de los ángeles. Tomado de INVIAS 2007. NORMA INV E218-4



La carga abrasiva consistirá en esferas de acero, de un diámetro aproximado de 46.8 mm (1 27/32") y una masa comprendida entre 390 y 445 g. la carga abrasiva dependerá de la granulometría del ensayo A, B, C, D, según se indica en la tabla 1

Tabla 1. Carga abrasiva

Granulometría de ensayo	Numero de esferas	Masa total en gramos
A	12	5000±25
B	11	4584±25
C	8	3330±20
D	6	2500±15

De esta granulometría se entiende que a menor tamaño del agregado menor carga abrasiva se utiliza en el ensayo, y menor cantidad de roca se emplea.

2.1.3 Preparación de la muestra.

La muestra destinada al ensayo se obtiene empleando el procedimiento descrito en la norma INVE-201 y se reduce al tamaño adecuado para el ensayo INVE-202. Para este proyecto el tamaño de la muestra es inferior a 19.0 mm ó tamiz máximo de (1/2"). Y retenido ¾.

La muestra reducida se lava y se seca en horno a una temperatura constante comprendida entre 110± 5° (230± 9° F). Se elige en la tabla 2 la gradación más parecida al agregado que se va a usar en la obra. Se separa la muestra en las fracciones indicadas en la tabla, de acuerdo con la granulometría elegida se toma la cantidad de cada una de ellas, indicada en la tabla anterior hasta obtener el requerimiento para el tamaño de la muestra total. Se registra la masa de la muestra total, aproximada a 1g. Las muestras de as diferentes fracciones se unen para formar la muestra de ensayo.



Tabla 2. Tabla de gradación.

PASA TAMIZ		RETENIDO EN TAMIZ		MASA DE LA MUESTRA PARA ENSAYO EN (G), GRANULOMETRIAS			
mm	(alt)	mm	(alt)	A	B	C	D
37.5	(1 ^{1/2} "	25.0	(1")	1250±25	.....	.....	.....
25.0	(1")	19.0	(3/4)	1250±25	.....	.....	.....
19.0	(3/4)	12.5	(1/2")	1250±10	2500±10	.....	.....
12.5	(1/2")	9.5	(3/8")	1250±10	2500±10	.....	.....
9.5	(3/8")	6.3	(1/4")	.....	.....	2500±10	.....
6.3	(1/4")	4.75	(#4)	.....	.....	2500±10	.....
4.75	(#4)	2.36	(#8)	.....	.....	.....	5000±10
TOTALES				5000±10	5000±10	5000±10	5000±10

2.1.4 Procedimiento

Luego de comprobar que el tambor este limpio, la muestra y la carga abrasiva correspondiente se colocan en la máquina de Los Ángeles y se hace girar el cilindro a una velocidad comprendida entre 188 y 208 rad/minuto (30 y 33 r.p.m.) hasta completar 500 revoluciones, La máquina deberá girar de manera uniforme para mantener una velocidad periférica prácticamente constante. Una vez cumplido el número de vueltas prescrito, se descarga el material del cilindro y se procede con una separación preliminar de la muestra ensayada, empleando un tamiz de abertura mayor al de 1.70 mm (No.12). La fracción fina que pasa, se tamiza a continuación empleando el tamiz de 1.70 mm (No.12), utilizando el procedimiento de la norma INV E – 213. El material más grueso que la abertura del tamiz de 1.70 mm (No.12) se lava, se seca en el horno, a una temperatura



comprendida entre $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$), hasta masa constante, y se determina la masa con precisión de 1 g.⁶

Si el agregado está libre de costras o de polvo se puede eliminar la exigencia del lavarlo antes y después del ensayo. La eliminación del lavado posterior, rara vez reducirá la pérdida medida, en más del 0.2% del peso de la muestra original. Sin embargo, en caso de ensayos con fines de arbitraje, el procedimiento de lavado es perentorio.

2.1.5 Cálculos

El resultado del ensayo es la diferencia entre la masa original y la masa final de la muestra ensayada, expresada como tanto por ciento de la masa original.

El resultado del ensayo (% desgaste) recibe el nombre de coeficiente de Desgaste de Los Ángeles, el cual se calcula así:

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100$$

Donde:

P1 = masa de la muestra seca antes del ensayo, y

P2 = masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre tamiz de 1.70 mm (No.12).

La norma INVIAS, especifica que el porcentaje total de desgaste para los agregados pétreos a usarse en mezcla asfáltica no debe exceder el 25% en peso del total de la muestra.

Los agregados pétreos empleados para la ejecución de cualquier tratamiento o mezcla bituminosa deberán poseer una naturaleza tal, que su desgaste en la máquina de los ángeles no sea mayor al 25% de su peso inicial. Además al

⁶ INVIAS 2007



aplicársele una capa del material asfáltico por utilizar en el trabajo, esta no se desprenda por la acción del agua y del tránsito. Solo se admitirá el empleo de agregados con características hidrófilas, si se añade algún aditivo de comprobada eficacia para proporcionar una buena adhesividad. (INVIAS 2007).

2.1.6 Precisión y Tolerancias

Para agregados con tamaño máximo nominal de 19 mm (3/4"), con porcentajes de pérdida entre 10 y 45%, el coeficiente de variación entre resultados de varios laboratorios, es del 4.5% . Por lo tanto, resultados de dos ensayos bien ejecutados, por dos laboratorios diferentes, sobre muestras del mismo agregado grueso, no deberán diferir el uno del otro en más del 12.7% de su promedio.

El coeficiente de variación de operadores individuales, se encontró que es del 2.0%. Entonces, los resultados de dos ensayos bien ejecutados por el mismo operador sobre el mismo agregado grueso, no deberán diferir, el uno del otro en más del 5.7% de su promedio.

Dado que no hay un material de referencia apropiado para determinar la tolerancia para este procedimiento, no hay ninguna declaración sobre el particular.

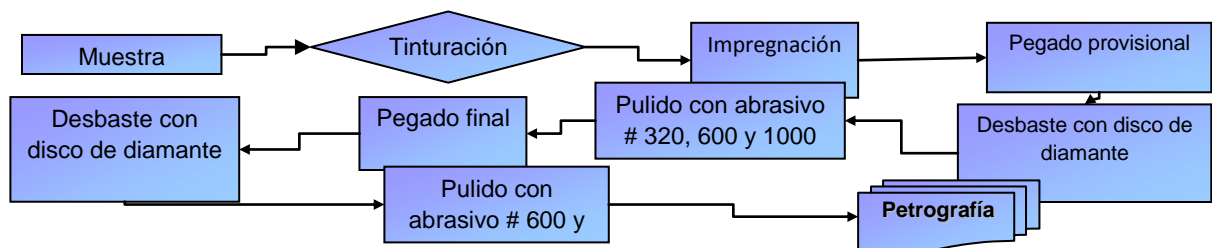
2.2 PETROGRAFIA EN SECCIÓN DELGADA

Este análisis permite describir y clasificar los constituyentes de la muestra, determinar sus cantidades relativas, identificar tipos y variedades de rocas, presencia de minerales, química y si es volumétricamente inestable o reactiva, grado de meteorización, nivel de porosidad y posible presencia de contaminantes en los agregados.

2.2.1 Procedimiento

En la Figura 2. Se presenta el procedimiento desarrollado para la elaboración de las secciones delgadas

Figura 2. Diagrama de flujo mostrando los procedimientos para la elaboración de la sección delgada (SD)



A las muestras se les inyectó una resina epóxica de color azul con el propósito de aumentar la cohesión, permitir un mejor manejo en la hechura de las secciones y facilitar el reconocimiento de la porosidad, los vacíos y las microfisuras presentes en la muestra.

2.2.2 Equipo

Para efectos del presente análisis, se extrajo una muestra representativa del material y se realizó la caracterización petrográfica a nivel macroscópico y microscópico. El análisis macroscópico se llevó a cabo con lupas de 10 y 20 aumentos y estéreo microscopio Nikon SMZ 800 C-DS y para la toma de imágenes se empleó una cámara marca Nikon modelo Coolpix 995 de alta resolución adaptada al estéreo microscopio, ubicado en la empresa. Para el análisis microscópico se elaboraron secciones delgadas con muestras representativas del material y se llevó a cabo con microscopio de luz transmitida. Para la toma de imágenes se empleó una cámara marca Olympus modelo DP-12 adaptada al microscopio.



2.3 DIFRACCION DE RAYOS X (DRX)

Este análisis permite conocer la mineralogía global (filosilicatos y no filosilicatos) de una muestra arcillosa, clasificando los constituyentes de la muestra y determinando sus cantidades relativas.

No existe ninguna especificación en la norma INVIAS acerca de qué porcentaje de compuestos son permitidos en un grupo de agregados pétreos, sin embargo de manera experimental se ha probado que un valor superior al 20% de montmorillonita afecta significativamente la mezcla Asfáltica.

2.3.1 procedimiento

Para efectos del presente análisis, se realizaron dos tipos de estudios, con el fin de identificar y diferenciar los minerales que tienen el mismo espaciado basal:

Análisis mineralógico muestra total por DRX (método del polvo). Este método permite determinar los minerales de tipo no filosilicato en una muestra.

Mineralogía de arcillas por rayos x (incluye separación de la fracción y tratamientos con Mg K, glicol o glicerol y calentamiento a 550°C). Este método permite diferenciar los distintos filosilicatos presentes en una muestra.

Para lo anterior, la muestra se cuartea, separando una porción de muestra de aproximadamente 2 o 3 gramos, que se destinan al estudio de la composición global (Polvo, método a). (ALCOBE, X. 1998)

El resto de la muestra se destina al estudio de la fracción arcillosa (método b). Para ello hay que preparar suspensiones de arcilla en agua, las cuales se obtienen añadiendo a la muestra agua destilada (unos 100g en 2 litros de agua, aproximadamente). Se agita un mínimo de 2 horas a varios días hasta que, tras un reposo de 10 minutos, no se observen signos de floculación. Para conseguir la dispersión en la muestra se añade a la mezcla 20 c.c. de una solución de NaOH 0,2 N el cual actúa como dispersante. Posteriormente la muestra se homoioniza y se procede a la separación por fracciones. El objeto de la preparación es reforzar las reflexiones basales, que son las que permiten diferenciar los distintos



filosilicatos entre si, a la vez que eliminar los de los minerales no laminares. Para esto, se deposita unas gotas de la suspensión acuosa de la muestra sobre un porta muestras de vidrio y se deja evaporar el agua hasta obtener un agregado homogéneo. (AMIGO, J. 2000).

En general, para la identificación de los minerales de la arcilla es necesario usar tratamientos que permitan diferenciar entre los filosilicatos que tienen el mismo espaciado basal. Así, se hace un difractograma sin tratar, otro se solvata con glicerol y el tercero se trata térmicamente (2 horas a 550°C).

Para la solvatación con glicerol se somete la muestra a una atmósfera saturada en vapor de este compuesto, para ello se pone la muestra en una cápsula Petri o en un desecador en una estufa a 60-65°C durante 24 a 48 horas, rodándose a continuación y evitando su exposición al aire para evitar la salida de dicha sustancia del espacio inter-laminar.

2.3.2 Equipo

Finalmente la medición se realiza en un difractómetro de rayos X marca Philips modelo PW1830, con una radiación de cobre a 40 kV y 30 mA y un barrido de 2° por minuto. Alquilado por la corporación.

2.4 ANÁLISIS ELEMENTAL POR ABSORCIÓN ATÓMICA (FRX)

La Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X es la técnica que permite conocer la composición elemental de una sustancia analizando la emisión de rayos X (longitud de onda < luz visible) de los diferentes elementos presentes en ella. Esta técnica permite determinar todos los elementos del Sistema Periódico, desde el Flúor (^{9}F) hasta el Uranio (^{92}U), en muestras sólidas, en polvos y en líquidos. Asimismo mediante la utilización de los patrones adecuados es posible realizar el análisis cuantitativo de los elementos presentes.

No existe ninguna especificación en la norma INVIAS acerca de qué porcentaje de elementos son permitidos en un grupo de agregados pétreos.



2.4.1 Procedimiento

Las muestras en polvo fueron mezcladas con cera espectrométrica en relación Muestra: Cera de 10:1 (7gr de muestra y 0.7gr de cera), luego homogenizadas por agitación, llevadas a una prensa hidráulica a 120kN por minuto generando cuatro pastillas prensadas de 37mm de diámetro.

El análisis semi-cuantitativo se realizó con el software IQ, haciendo 11 barridos, con el fin de detectar todos los elementos presentes en la muestra, excluyendo H, Li, Be, B, C, N, O y los elementos transuránicos.

2.4.2 Equipo

Se utilizó un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, MagixPro PW-2440 Philips equipado con un tubo de Rodio, con una potencia máxima de 4KW. Alquilado por la corporación, Este equipo tiene una sensibilidad de 200ppm (0.02%) en la detección de elementos pesados metálicos.

La estabilidad del equipo es controlada diariamente mediante la medición de una muestra patrón.

2.5 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

Este análisis permite observar las muestras con magnificaciones de hasta 60.000x con un profundidad de $\sim 3\mu\text{m}$ y determinar la composición química mediante la técnica de microanálisis de rayos X (EDX).

2.5.1 Procedimiento

Para efectos del presente análisis, se tomó varias partículas tamaño grava y las secciones de la caracterización petrográfica a nivel microscópico, con el fin de analizar la fracción gruesa y la fracción fina del agregado.



2.5.2 Equipo

El análisis se llevó a cabo en el Microscopio Electrónico de Barrido marca FEI QUANTA 200, Alquilado por la corporación, este equipo consta de un cañón de electrones con su óptica, cámara de muestras, circuito de vacío, electrónica de detección y registro de imagen. Dispone además de una microsonda EDX que detecta el espectro de emisión de rayos x particular de cada elemento producido por el haz de electrones sobre la muestra, siendo la intensidad de los rayos X una medida de la concentración de los elementos.



3. GEOLOGIA GENERAL DEL AREA DE ESTUDIO.

En toda la extensión terrestre, el tipo de minería depende de las características geológicas y geomorfológicas del sitio donde esta se realice.

A continuación de se presenta la geología general presente en el área de estudio.

3.1 MUNICIPIO LA ESTRELLA:

3.1.1 Gabro de Romeral.

Comprenden rocas ultramáficas de dunitas y serpentinitas, asociadas a rocas máficas, localmente bandeadas, se localizan entre la falla Romeral y la falla la cascajosa, estos cuerpos rocosos presenta una alta serpentización de los ferromagnesianos, originando un color negro verdoso con lustre oscuro (AMVA 1999).

Esta unidad se encuentra en las vertientes occidentales de la cuenca del río Medellín en este municipio, se observa en las quebradas La Culebra, La Llorona, San Miguel, La Raya y La Bermejala. Son rocas macizas con texturas de flujo primarias constituidas por plagioclasas 30%, diálaga 10%, diópsido 5%, hornblenda primaria y secundaria 40% y actinolita 5%. Los mejores afloramientos se ubican en las quebradas La Bermejala, La Culebra, La Grande y en la Cantera Maracay, se utilizan como agregados pétreos (Ramírez 2008).

3.2 ITAGÜÍ:

3.2.1 El Stock de Altavista:

Es un cuerpo ígneo que incluye el Complejo Poli metamórfico de la cordillera Central, con una extensión de 83 Km². Esta roca presenta una amplia variabilidad litológica compuesta por tres facies: La facies diorítica constituida por dioritas y microdioritas hornblendicas y porfídicas, de grano fino a medio; La facies félsica constituida por cuarzo dioritas, granodiorita y granitos, de granos medio a grueso;



y la facies andesítica constituida por diques de dimensiones de centímetros (30 Cm) a metros (10 Mts), de andesitas, dacitas y riolitas de textura porfirítica.

Esta litología presenta una fuerte meteorización química con perfiles profundos lo que ha atraído las empresas de ladrillos y tejares al municipio desde hace más de un siglo. El espesor promedio del saprolito se encuentra en el orden de los 40 metros.

3.2.2 Depósitos Aluviales:

Se presentan como una franja a lo largo de la quebrada Doña María, en algunos de sus afluentes principales y en el Rio Medellín. Estos depósitos están conformados principalmente por fragmentos de rocas ígneas (dioritas, basaltos, etc.) y metamórficas que afloran en las partes más superiores de la cuenca, preservándose el cuarzo y formándose arenas y arcillas por los procesos de denudación que son frecuentemente explotadas (AMVA 1999).

3.3 MEDELLIN:

3.3.1 Neis La Iguana:

Esta roca aflora en el flanco occidental del Valle del Rio Medellín, localizado en la parte baja de la Quebrada La Iguana sobre la margen derecha, y se extiende desde las inmediaciones del barrio Blanquizal hasta la carrera 80 incluyendo un cerro pequeño donde se ubica la empresa INDURAL, al oeste del cerro el volador. Es una unidad metamórfica pequeña en cuya composición predomina el cuarzo, plagioclasa 40% (andesina sódica), microclina 10%, epidota 8% y biotita 12%. Su intensa meteorización produce un saprolito rojizo o amarillo-rojizo de textura limo-arcillosa. En variedades más oscuras aparecen pequeñas cantidades de hornblenda 10%. (Ramírez 2008).



3.3.2 Stock de Altavista:

Esta corresponde a una roca de origen ígneo (dioritas y cuarzo-dioritas), que desarrollan potentes perfiles de meteorización, esta roca corresponde a las series calco-alcálicas donde las rocas más ácidas muestran un enriquecimiento en SiO₂ y álcalis. Esta unidad se observa al occidente de la cabecera municipal de Medellín, y se encuentra tanto dentro del perímetro urbano como el rural. Sobre esta unidad (rocosa y saprolito) operan empresas extrayendo materiales para construcción como arenas, agregados pétreos y materiales para ladrillos y tejas (Ramírez 2008).

3.3.3 Batolito Antioqueño:

Esta unidad se encuentra en el sector oriental del municipio y la parte norte del área metropolitana. Está constituida por tonalitas, granodioritas, dioritas y granitos. Comprende, además, El Batolito Satélite de Ovejas y algunas cúpulas menores como las de El Retiro, La Unión, y la parte media de La Quebrada Santa Helena. A partir de la meteorización de este material se han explotado varios depósitos aluviales (AMVA 1999).

3.4 BELLO:

3.4.1 Anfibolita de Medellín:

Compuesta por hornblenda principalmente por 55%, feldespato 20% y cuarzo 15%. Presenta intercalaciones de neises micáceos cuarzo-feldespáticos. Este tipo de rocas principalmente orto anfibolitas se encuentran ampliamente distribuidas en ambas márgenes del Río Medellín en este municipio y son explotadas como agregados pétreos.



3.4.2 Serpentinitas y dunitas:

La dunita se presenta al oriente de Medellín (comunales centro y nororiental) formando un cuerpo alargado que se prolonga hasta Bello. Es una roca oscura, maciza, de alta densidad y generalmente fracturada, enriquecida en hierro y magnesio y el mineral principal es antigorita 40%. Normalmente se encuentra meteorizado dando lugar a suelos arcillosos de color pardo amarillento que rara vez superan los 5 metros de espesor, la roca se encuentra intensamente fracturada. Esta circunstancia ha sido aprovechada para explotar esta roca como material de construcción. (GIRALDO, M., y SÁNCHEZ, D., 2004).

3.4.3 Plutón de Ovejas:

Aflora al noroccidente de Bello, corresponde a una cuarzodioritas y tonalitas altamente meteorizadas y fracturadas, presentan una aureola de contacto de amplitud variable caracterizada por la presencia de migmatitas de inyección y cornubianitas de alto grado de metamorfismo hacia la parte interna de la aureola. Este cuerpo plutónico, en sus relaciones y características petrográficas, es similar al cuerpo principal del Batolito Antioqueño, la roca es maciza de textura fanerítica y de grano medio a grueso. El espesor del saprolito en el llano de Ovejas es aproximadamente de 60 a 70 metros, pero este disminuye significativamente en las vertientes. (Ramírez 2008).



3.5 COPACABANA:

3.5.1 Anfibolita de Medellín:

En el oriente y norte de Medellín, aflora un cuerpo alargado de anfibolitas con dirección noroeste y un área aproximada de 60 km², en contacto tectónico con ortoanfibolitas, las cuales se encuentran ampliamente distribuidas en ambos márgenes del Río Medellín. Estos dos cuerpos hacen parte de un fragmento de corteza oceánica desmembrada formando parte integral del Complejo Ofiolítico de Aburrá (Correa y Martens, 2000). Los escarpes rocosos de anfibolita son escasos y el más conocido de todos ellos es el explotado por la central Metromezclas en el Ancón Norte como agregado pétreo. (GIRALDO, M., y SÁNCHEZ, D., 2004).

3.5.2 Batolito Antioqueño:

Esta Unidad litológica ocupa la mayor parte de la Zona Central de Antioquia, y la parte norte de Área Metropolitana. Está constituida por tonalitas, granodioritas, dioritas y granitos, los horizontes arenosos se explotan como arena y la roca fresca se usa como agregado pétreo (Ramírez 2008).

3.6 GIRARDOTA:

3.6.1 Anfibolita de Medellín:

Esta unidad se encuentra ubicada al noroccidente del municipio en ambas vertientes del río Medellín y corresponde a la franja de anfibolita que regionalmente comienza al nororiente del municipio de Bello con una dirección de N35W. Litológicamente está limitada al occidente por las dunitas y serpentinitas de Medellín que se encuentran localizadas en el municipio de Bello y al oriente por el Batolito Antioqueño. Geográficamente esta unidad se encuentra en la cuchilla que cierra el Ancón Norte en los límites con el municipio de Copacabana, parte alta de la cuenca de la quebrada el Salto y quebrada de los Otero. La anfibolita está compuesta principalmente por hornblenda 47%, feldespatos 28% y cuarzo 17%. La anfibolita que se explota es roca fresca triturada que se usa como agregado



pétreo, Los taludes sobre roca anfibolita son hasta de 20m casi verticales, bajo grado de fracturamiento, por eso tiende a ser estable (Ramírez 2008).

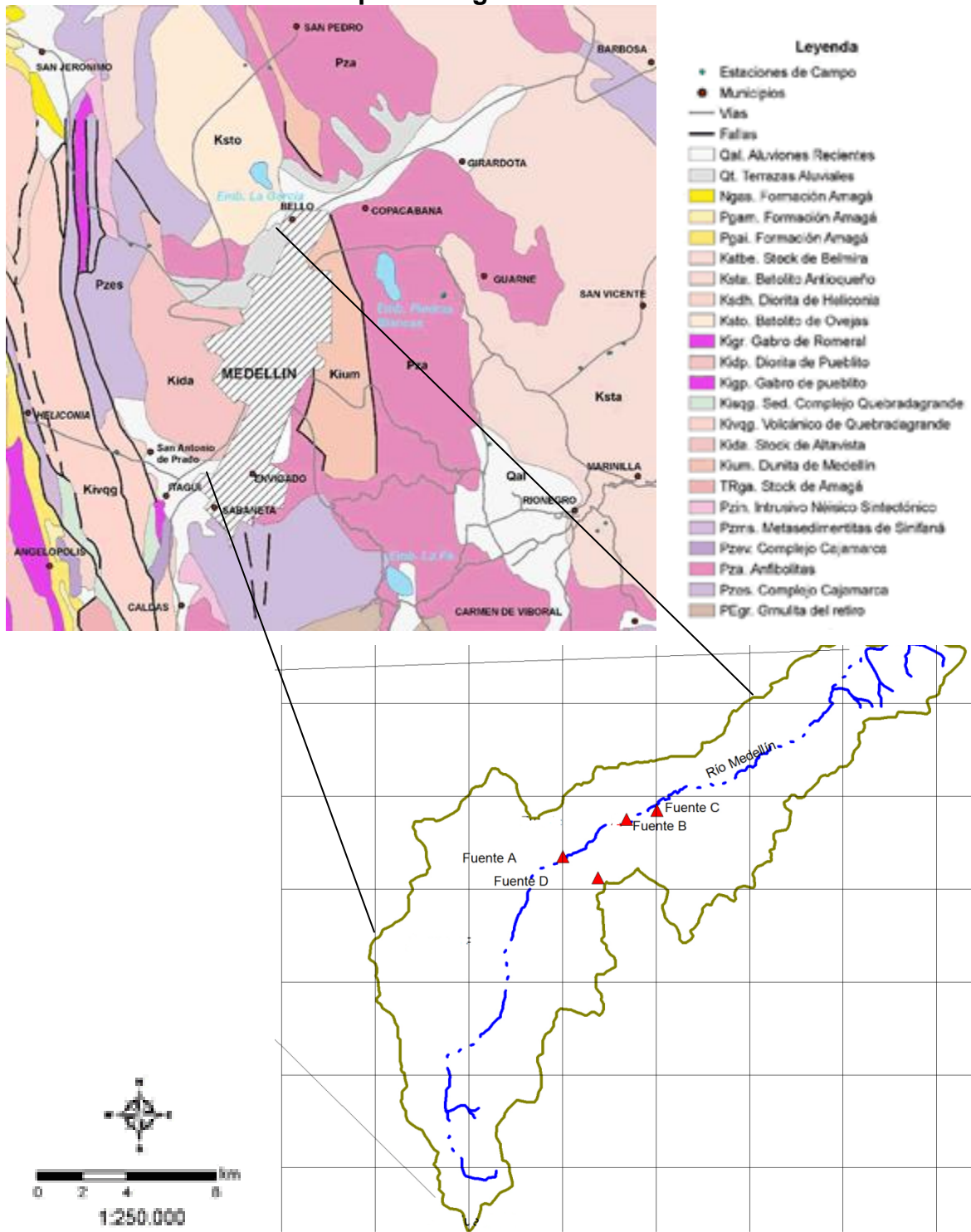
3.7 BARBOSA:

3.7.1 Batolito Antioqueño:

Esta unidad se encuentra también en ambas vertientes del Rio Medellín en este municipio. Esta unidad se observa en varios sitios en este municipio ya que es la que mayor porcentaje ocupa con respecto a todas las demás (45%), algunos de los sitios donde se observa son la carretera a la costa, en el tramo el Hatillo hasta el alto de Matasanos, carretera Medellín – Barbosa en el tramo el Hatillo cabecera municipal. Esta unidad litológica está constituida por tonalitas, granodiorita, dioritas y granitos, los horizontes arenosos se explota arena de pega (Ramírez 2008).



Mapa Geológico de la zona



Fuente: http://www.scielo.unal.edu.co/scielo.php?pid=S0120-36302008000300006&script=sci_arttext#fig02



4. DESARROLLO DEL PROYECTO

Los resultados aquí presentes se publicaran a manera de Reporte para su fácil comprensión.

4.1 GENERALIDADES CANTERA A

4.1.1 Geología de la zona

El material explotado está relacionado con depósitos aluviales, caracterizados por una estratificación, limo arenosa de color gris oscuro con un espesor de 0.4 m, seguida por un paquete de un depósito de origen deposicional con un espesor variable entre 8 y 10 m, estos depósitos se presentan en la parte alta de la explotación; suprayaciendo un depósito de origen aluvial conformado por paquetes de arenas finas con lentes de limos y arcillas de color gris claro.

Bajo este paquete se presenta un paquete de color gris plomo de gravas finas a gruesas con formas sub-redondeadas que se componen de gneis, cuarzo, basalto, esquistos, entre otros, embebidos en una matriz arenosa, débilmente cementada, dura, seca y no plástica con una relación gravas/arena de 90/10. Estos depósitos reposan sobre un basamento de rocas metamórficas, tipo anfibolita y de rocas ígneas tipo dunita de edad Paleozoica.

Dentro de los predios de esta fuente, se definieron básicamente cuatro paquetes de techo a base como sigue:

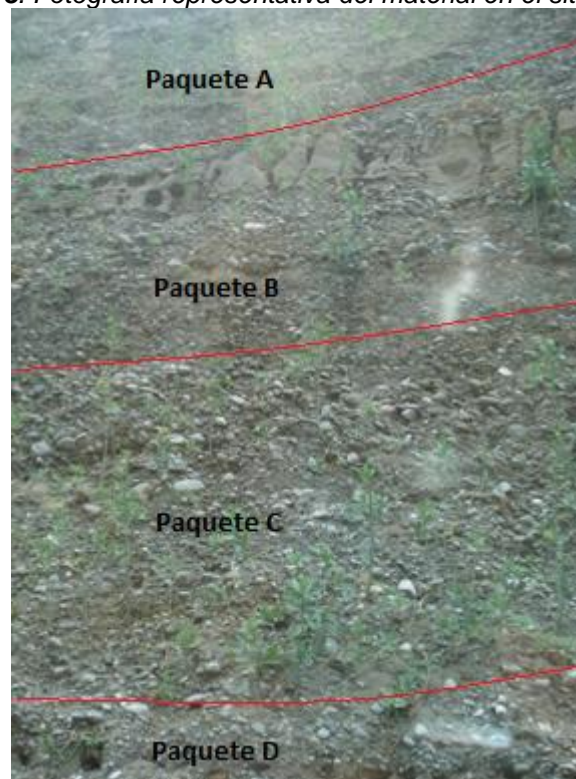
Paquete A: Compuesto por una delgada capa vegetal, y material limo-arcilloso;

Paquete B: Estrato de intercalaciones de arenas y arcillas con presencia de suelo residual;

Paquete C: Estrato de material tipo arenas, gravas, cantos y eventualmente bloques de hasta 12 Cm de diámetro.

Paquete D: Compuesto de intercalaciones de material granular con presencia de grandes bloques, identificada como zona de contacto entre el depósito de material aluvial y la roca basal. Basamento de anfibolita.

Figura 3. Fotografía representativa del material en el sitio de explotación



Fuente: Autor del proyecto

En cuanto a la geomorfología de la zona, la unidad más importante corresponde a la Vertiente del Valle de Aburrá, UG-VVA, relacionada con los flancos del Valle de Aburrá, al norte de la fuente. Se encuentra una gran variedad de depósitos de vertiente como flujos de lodo y de escombros, además de depósitos aluviales y torrenciales de las quebradas La Guacamaya, Los Escobares, Guasimalito y Guasimal formando valles alargados en forma de “V” que se amplían al aproximarse a la llanura aluvial del Río Medellín. Genera vertientes muy largas y abruptas sobre las partes altas y superficies planoconvexas, onduladas y ligeramente planas sobre las partes bajas donde se concentra la mayor parte de la población en las Veredas y Barrios que rodean la explotación minera.

En el área de explotación se evidencian procesos morfogenéticos asociados con la erosión de orillas (migración lateral de cauces), arrastre y transporte de sedimentos, así como acumulación local de sedimentos con formación de barras



laterales y centrales sobre el Río Aburrá o Medellín. Sobre las quebradas afluentes, persisten procesos de transporte y arrastre de sedimentos con erosión paulatina de orillas, principalmente notorio en la Quebrada Los Escobares.

Los procesos erosivos más importantes se encuentran asociados con la dinámica del Río Aburrá o Medellín y en menor grado por acción de las quebradas La Guacamaya y Los Escobares, principalmente.

El Río Aburrá o Medellín presenta una dinámica principalmente erosiva, la cual se manifiesta por la migración lenta y paulatina del río a lo largo de la llanura aluvial y en la modificación gradual de la forma del cauce.

4.1.2 Tectónica

La estructura geológica más evidente de la zona, corresponde a la denominada Falla Rodas, la cual pone en contacto las dunitas de Medellín con las Anfibolitas, donde la Falla posee un rumbo N- NW y un buzamiento de unos 82° al oeste, cruzando la llanura aluvial del Río Aburrá desde inmediaciones del Cerro Quitasol, a lo largo de la Quebrada Seca al norte, siguiendo por la Quebrada Rodas, cruzando el Relleno Sanitario Curva de Rodas y prolongándose hacia el sur sobre la cuchilla Granizal.



4.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CANTERA A

4.2.1 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando, La Máquina de los Ángeles, 500 revoluciones en seco.

La realización de éste ensayo tiene como finalidad, determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados empleando la máquina de los ángeles. Los materiales después de ser desgastados al finalizar el ensayo, se lavan por el tamiz #12 y por diferencia de pesos con la cantidad de material cargado originalmente, se determina el porcentaje de desgaste de los materiales pétreos. El procedimiento a realizar es el común establecido por esta norma.

RESULTADOS OBTENIDOS:

Gradación utilizada: B

$$\text{Desgaste del agregado} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5000 - 3960)}{(5000)} * 100 = 21\%$$

4.2.2 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, Curva de desgaste cada 100 revoluciones.

El objetivo principal de este ensayo es revisar la uniformidad de los materiales con respecto a su propiedad de dureza. Se hace con la Máquina de desgaste de los Ángeles basados en lo indicado en la nota 3 de esta norma. Se toma la masa de los agregados retenida en la malla #12 tras 100 revoluciones. Esto se repite hasta completar las 500 revoluciones. La cantidad de material en el tambor siempre debe ser la tomada inicialmente, es decir, los finos siempre deben ir adentro. Por diferencia de pesos se calcula el valor del Desgaste.

Gradación utilizada: B

$$\text{Desgaste del agregado}_{100 \text{ rev}} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5008 - 4902)}{(5008)} * 100 = 2 \%$$



$$\text{Desgaste del agregado } 200 \text{ rev} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5008 - 4785)}{(5008)} * 100 = 4 \%$$

$$\text{Desgaste del agregado } 300 \text{ rev} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5008 - 4669)}{(5008)} * 100 = 7 \%$$

$$\text{Desgaste del agregado } 400 \text{ rev} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5008 - 4500)}{(5008)} * 100 = 10 \%$$

$$\text{Desgaste del agregado } 500 \text{ rev} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5008 - 4375)}{(5008)} * 100 = 13 \%$$

4.2.3 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, Desgaste del árido después de 3 días saturado y superficialmente seco.

En muchas ocasiones el material pétreo utilizado en mezclas asfálticas contiene un porcentaje de humedad debido a que proviene de río o se ha explotado de una cantera a campo abierto. Con este ensayo se pretende simular ese contenido de humedad que al ser absorbido por el agregado, en los poros superficiales, puede alterar la dureza o resistencia al impacto. Razón por la cual se han dejado sumergidos en agua, tres días, los agregados pétreos para luego ser ensayados en la Máquina de los Ángeles. Por diferencia de pesos se calcula el valor del Desgaste luego de ser tamizados por la malla #12.

Gradación utilizada: B

$$\text{Desgaste del agregado} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5000 - 4113)}{(5000)} * 100 = 18 \%$$



4.2.4 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando, La Máquina de los Ángeles, Desgaste del árido después de someterse a alta temperatura

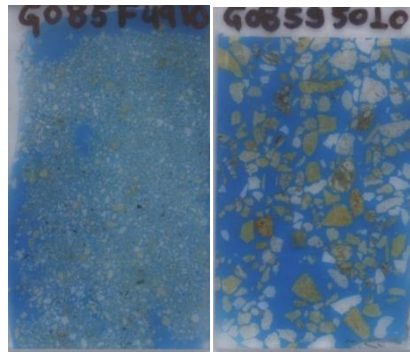
El ensayo de desgaste de los agregados en máquina de los Ángeles da una pista de la resistencia al impacto que los pétreos dan como respuesta durante la fabricación y colocación de la mezcla asfáltica. Esta prueba pretende involucrar la condición de temperatura de mezclado para resaltar el efecto producido con respecto a la condición normal de ensayo. Los agregados fueron calentados en un horno a 150°C durante 3 horas e inmediatamente se ensayaron. Se calcula el desgaste como el porcentaje de material retenido en la malla #12 después de 500 revoluciones, lavado y seco, con respecto al peso inicial.

Gradación utilizada: B

$$\text{Desgaste del agregado} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5000 - 4496)}{(5000)} * 100 = 10 \%$$

4.2.5 Análisis petrográfico de agregados

Figura 4. Secciones delgadas



Sección G085f-4910 Sección G085g-5010

Fuente: Autor del proyecto

Constituyentes y Composición

El tipo de roca predominante en orden de abundancia es de origen ígneo, y corresponde principalmente a basaltos con textura holohialina y con un contenido variable de sericita producida por alteración de plagioclasas, sílice amorfa producto de los procesos de devitrificación de la matriz y vidrio volcánico, y en menor proporción gabros y tonalitas con textura fanerítica (cristales bien formados de tamaño homogéneo) en cuya composición abundan las plagioclasas. En menor porcentaje se diferencian rocas de otro origen, principalmente chert (sedimentario) y cuarcitas (metamórfico).

En la fracción más fina se concentran los minerales componentes de los agregados gruesos, abundando plagioclasas sericitizadas, hornblendas, cuarzos, piroxenos y micas (muscovita y biotita).

En las tablas 3 y 4 se especifican los porcentajes de los resultados obtenidos del conteo de partículas de la muestra.



Tabla 3. Cálculo de Resultados de Conteo de Partículas

	PORCENTAJE INDIVIDUAL RETENIDO EN EL TAMIZ	COMPOSICIÓN DE FRACCIONES RETENIDAS EN LOS TAMICES		
		Porcentaje de Partículas		
		Tamices ¾" a No 4	Tamices No 10 a P200 Arena gruesa	Arena fina
ORIGEN	Constituyentes			
IGNEO	Basalto (Con textura holohialina)	69,6	48,1	20,0
	Basalto (Con textura hipocristalina)	0,0	3,8	4,7
	Basalto (Con textura holocristalina)	0,4	0,0	1,3
	Toba	0,7	2,5	0,0
	Riolita	0,9	0,0	0,0
	Gabro	9,6	4,4	4,7
	Tonalita	6,8	6,9	4,7
SEDIMENTARIO	Granito	0,5	1,3	0,0
	Chert	3,2	3,8	2,7
	Lodolita	0,2	0,0	0,0
	Arenisca	1,6	6,3	0,0
METAMÓRFICO	Arcillolita	0,2	0,0	0,7
	Cuarcita	3,6	10,6	4,7
	Neiss	0,9	0,0	0,0
	Esquistos	0,0	1,9	0,0
MONO-MINERALES	Granulita	0,0	1,3	0,0
	Plagioclasa	1,6	3,8	28,0
	Feldespatos	0,0	0,0	1,3
	Hornblenda	0,0	0,6	6,0
	Cuarzo	0,0	0,0	5,3
	Cuarzo policristalino	0,0	2,5	0,7
	Calcedonia	0,0	1,3	0,0
	Muscovita	0,0	0,0	4,0
	Biotita	0,0	0,0	1,3
	Opacos	0,0	0,0	2,0
	Piroxeno	0,0	0,6	6,0
Epidota	0,0	0,0	1,3	
Actinolita	0,2	0,0	0,7	
OTROS	Fragmento Alterado	0,0	0,6	0,0
TOTAL		100	100	100

Fuente: Autor del proyecto

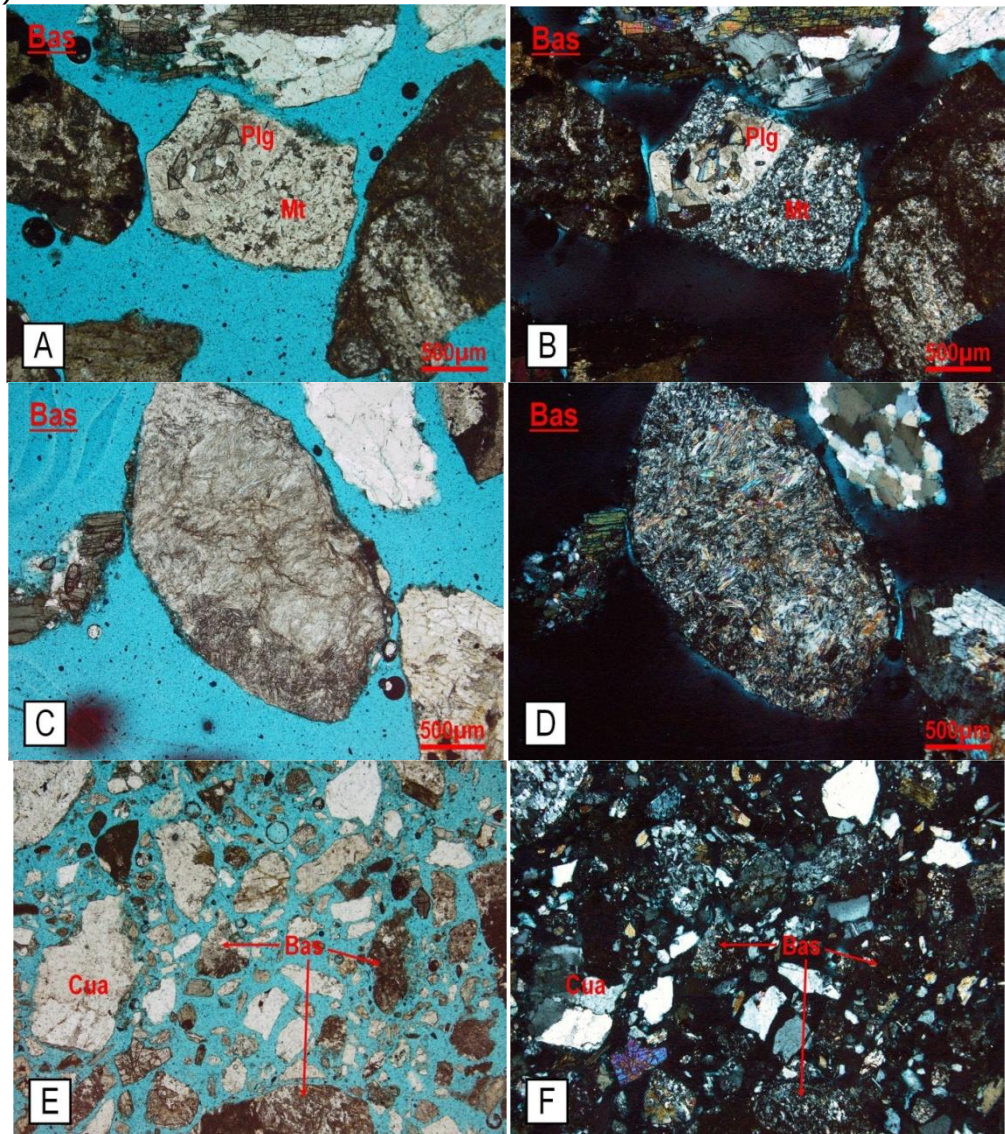


Tabla 4. Composición de la muestra

CONSTITUYENTES	Porcentaje de Partículas		
	Tamices $\frac{3}{4}$ " a No 4	Tamices No 10 a P200	
		Arena gruesa	Arena fina
ÍGNEOS	88,6	66,9	35,3
SEDIMENTARIOS	5,2	10,0	3,3
METAMÓRFICOS	4,5	13,8	4,7
MONOMINERALES	1,8	8,8	56,7
OTROS	0,0	0,6	0,0
TOTAL	100	100	100

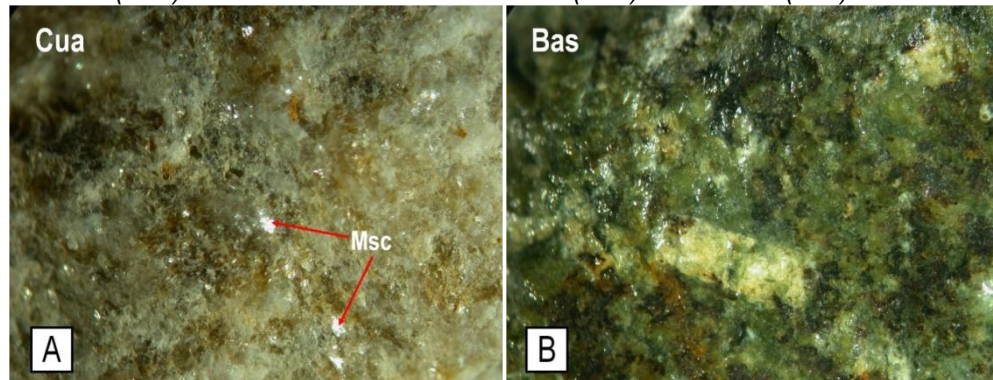
Fuente: Autor del proyecto

Figura 5. Microfotografías de agregados bajo el microscopio petrográfico mostrando: Basalto (Bas) con matriz (Mt) devitrificada y fenocristal alterado de plagioclasa (Plg), visto con nicols paralelos y nicols cruzados, respectivamente (A y B). Basalto (Bas) holocristalino alterado, visto con nicols paralelos y nicols cruzados, respectivamente (C y D). Arena fina en sección delgada entre los cuales se resaltan fragmentos de basaltos (Bas) y cuarcita (Cua), vistos con nicols paralelos y nicols cruzados, respectivamente (E y F).



Fuente: Autor del proyecto

Figura 6. Microfotografías de agregados bajo el estéreo microscopio mostrando: **A.** Cuarzita (Cua) con cristales de mica muscovita (Msc). **B.** Basalto (Bas).



Fuente: Autor del proyecto

Porosidad y fracturación

En términos generales, la porosidad es de tipo primaria y secundaria. En el primer caso se produce naturalmente por el empaquetamiento de los granos, mientras que en el segundo se relaciona con el fenómeno de disolución.

En este caso los agregados no presentan porosidad.

La presencia de fracturas es casi nula.

Alteración

La alteración hace referencia a la modificación sufrida en la composición o estructura interna de una roca situada en la superficie terrestre o en sus proximidades, debido a la acción de agentes atmosféricos.

Para los agregados de tamices $\frac{3}{4}$ " a No 4, el grado de alteración se determinó con base en la modificación superficial del color natural. El agregado que conserva el color de la roca origen sin presencia de manchas, se considera no alterado; de lo contrario, si se observan manchas o alteraciones de color, se agrupan y se diferencian en tres niveles cualitativos:



- Leve: presencia de manchas de coloraciones muy tenues o coloraciones más fuertes que se extienden sobre un área pequeña de la superficie del agregado.
- Moderada: presencia de manchas de coloraciones notorias tanto en tonalidad como en extensión.
- Severa: presencia de manchas con coloraciones fuertes que abarcan una extensión importante de la superficie del agregado.

A nivel microscópico los procesos de meteorización química actúan siempre en la superficie de los minerales y la intensidad de la reacción depende directamente de la superficie específica y del grado de fragmentación mecánica previa que tenga el material. Es así como el ataque a los minerales primarios puede ser seguido por una redistribución atómica en la red cristalina remanente, lo que conduce a un nuevo mineral más estable (en ese ambiente) que el anterior. El resultado de las acciones de meteorización es la formación de minerales de arcilla (Besoain, 1985).

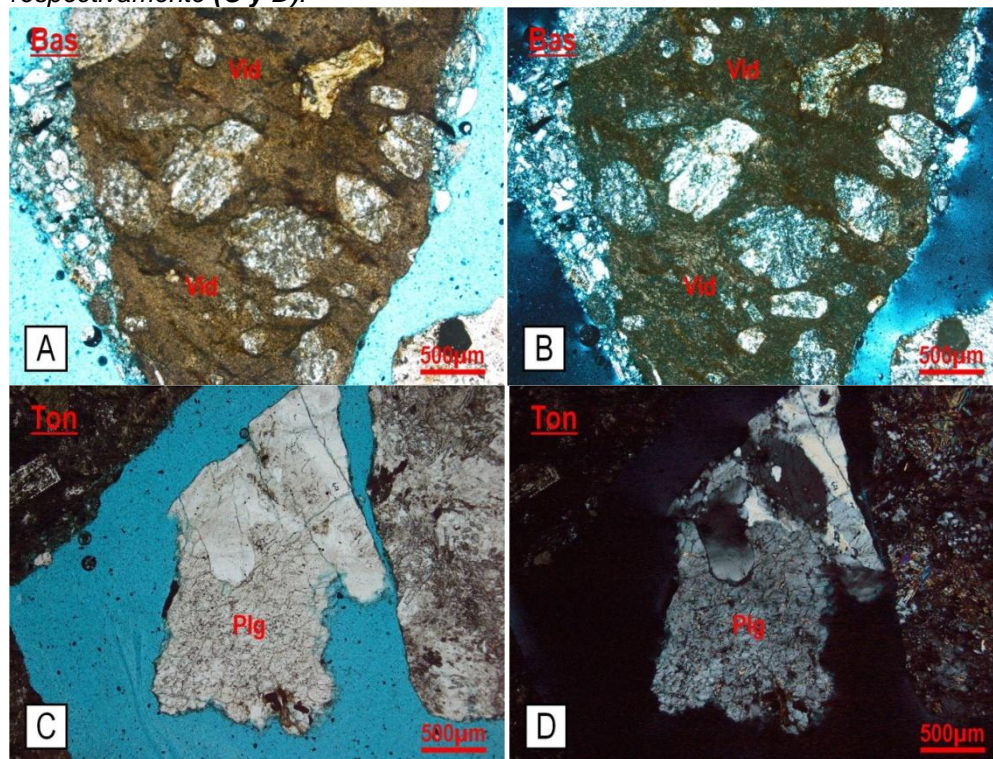
El grado de meteorización se determinó teniendo en cuenta principalmente los niveles de sericitización de las plagioclasas; y el contenido de sílice amorfa manifestada en la devitrificación de la matriz, la presencia de vidrio volcánico y el contenido de calcedonia, no obstante, también se tuvo en cuenta otros tipos de alteración tales como oxidación, aunque esta se presentó de manera muy esporádica.

Tabla 5. Alteración del material

ALTERACIÓN	NIVELES DE LAS FRACCIONES ANALIZADAS		
	Porcentaje de Partículas		
	Tamices ¾" a No 4	Tamices No 10 a P200	
		Arena gruesa	Arena fina
Sin alteración	52.6	11,3	28,0
Leve	44.0	8,8	28,7
Moderada	3.4	20,6	18,0
Severa	0	59,4	25,3
TOTAL	100	100	100

Fuente: Autor del proyecto

Figura 7. Microfotografías de agregados bajo el microscopio petrográfico mostrando: Alteración severa de un basalto (Bas) con vidrio (Vid) volcánico, visto con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (A y B). Alteración moderada de una tonalita (Ton) con plagioclasa (Plg) sericitizada, vista con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (C y D).



Fuente: Autor del proyecto



Tabla 5ª. Contenido teórico de SiO₂ en las muestras

Tipo de roca/mineral	Chert /Cuarzo/Cuarzo/Cuarzo o policristalino/calcedonia	Toba/vidrio volcánico/Arenisca/Lodolita	Granito/Riolita	Plagioclasa	Tonalita/Feldespatopótasio/Arcillolita	Esquisto/Neiss/Basalto (con textura hollalina)	Basalto (Con textura hipocristalina)/Actinolita	Basalto (con textura holocristalina)/Hornblenda/Piroxeno	Moscovita/Gabro/Granulita.	Biotita	Epidota	Opaco/Fragmento alterado
Contenido de SiO ₂	100%	90%	72%	67%	66%	59%	55%	51%	45%	41%	35%	0%
	> Grado de acidez <											
	Acido						Básico					
Porcentaje de partículas en las muestras	10.00	3.56	1.15	6.55	6.90	58.05	1.38	2.76	8.74	0.23	0.23	0.46

Fuente: Kumar (2004)

Según lo anterior, la mayoría del material proviene de un magma de composición máfica, en la muestra cerca del 75% corresponde a material de composición intermedia (grado de acidez cercano al 50%, ó PH neutro), lo que no afecta la adherencia entre el agregado y el asfalto. Kumar (2004).

4.2.6 Difracción De Rayos X (DRX)

En la siguiente tabla se describe la semi-cuantificación de los componentes por altura del pico (intensidad) teniendo en cuenta los picos más intensos de cada mineral presente; obtenida mediante el análisis de difracción de rayos-X (DRX). Los datos se derivan de los correspondientes Difractogramas:



Tabla 6. Datos extraídos de los Difractogramas

CONSTITUYENTE	MÉTODO DEL POLVO (a)	MINERALOGÍA DE ARCILLAS (b)
Montmorillonita		≈20%
Cloritas	<5%	≈10%
Micas	≈10%	≈9%
Caolinita	<5%	≈34%
Anfíboles	≈10%	≈15%
Cuarzo	≈48%	≈5%
Feldespatos	≈28%	≈6%
Calcita	<5%	
Total	≈ 100 %	≈ 100 %

Fuente: Autor del proyecto

De acuerdo con los resultados anteriores, se observa que hay un predominio de minerales de tipo no filosilicato como cuarzo y feldespatos (46.4%), seguido por la presencia de minerales arcillosos o filosilicatos, entre los que se destaca la caolinita y la montorillonita (32.9%)

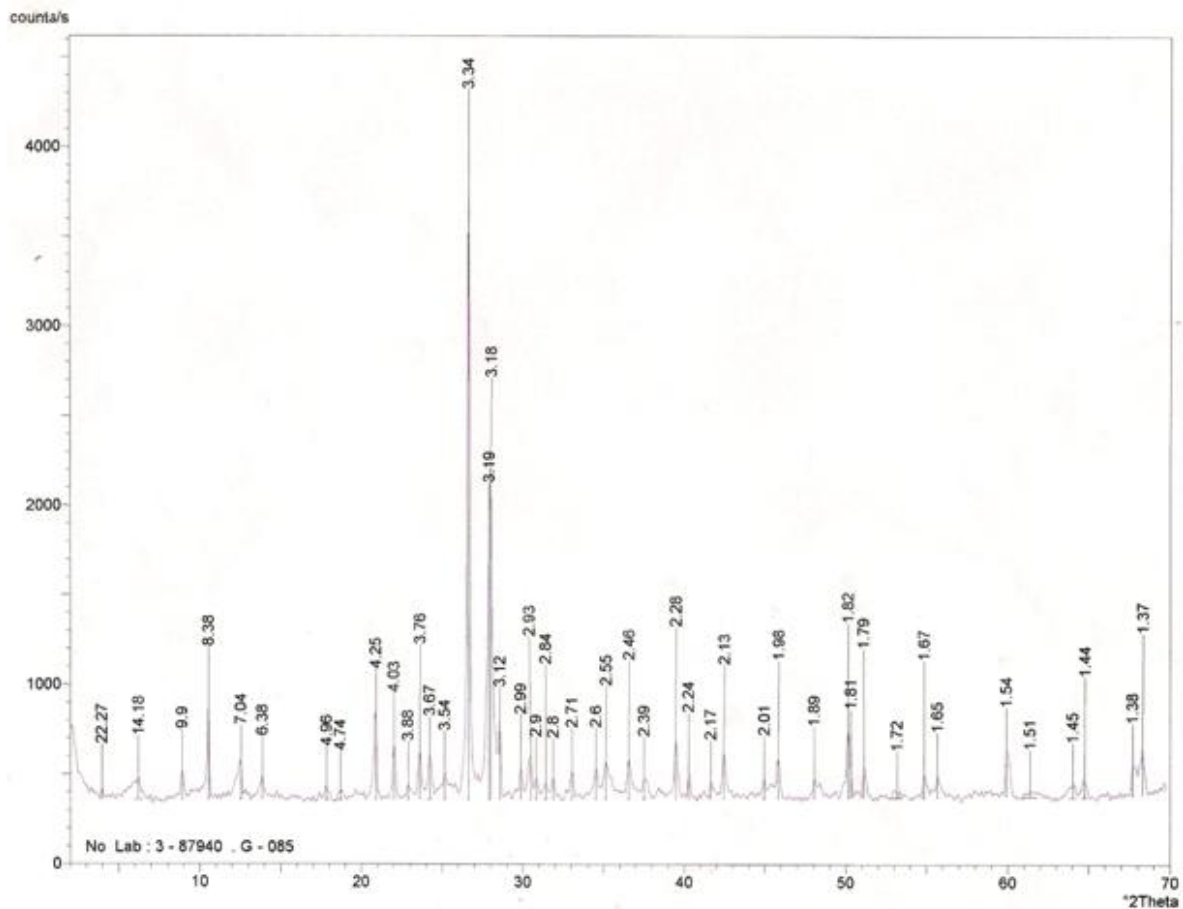
Tabla 7. Mineralogía global de la muestra

CONSTITUYENTE	PORCENTAJE APROXIMADO (%)
Montmorillonita	12.2
Cloritas	6.1
Micas	5.5
Caolinita	20.7
Anfíboles	6.1
Cuarzo	29.3
Feldespatos	17.1
Calcita	3.0
Total	100

Fuente: Autor del proyecto



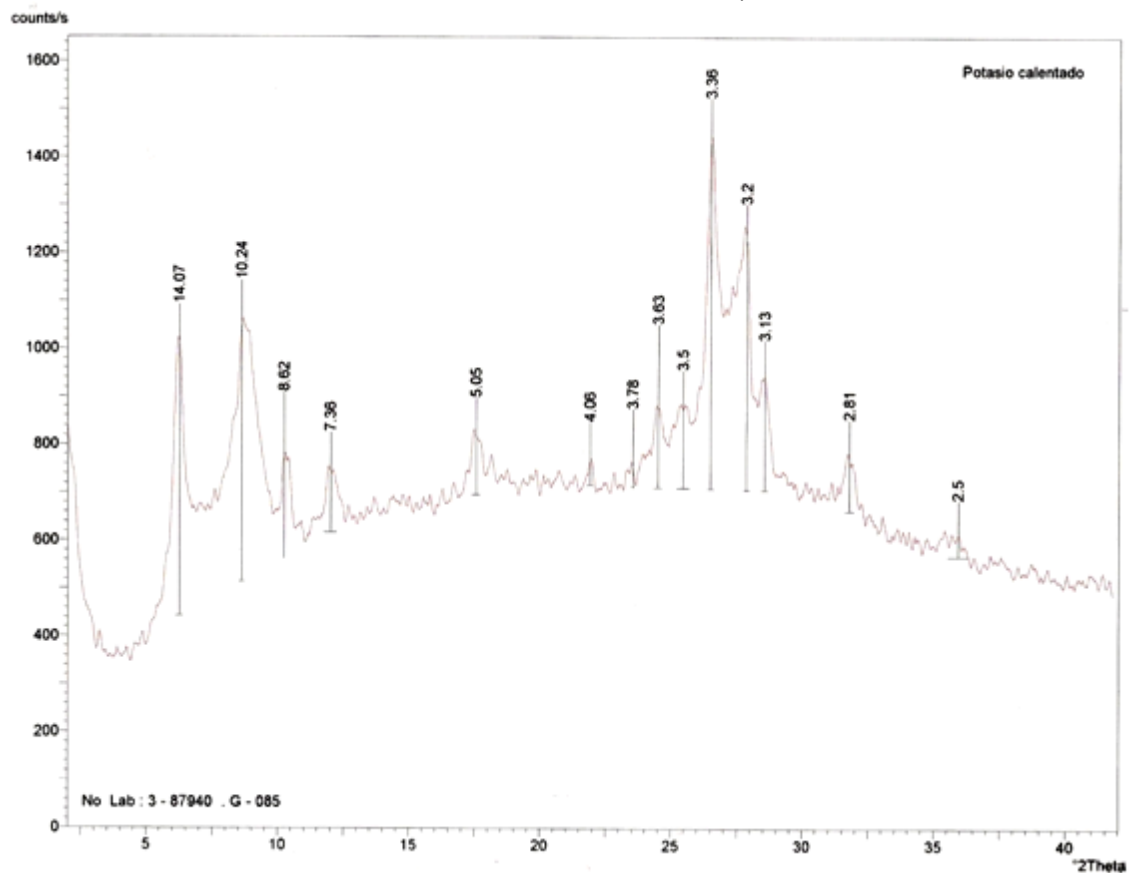
Figura 8: Difractograma obtenido en el análisis de la muestra total por DRX (método del polvo)



Fuente: Autor del proyecto



Figura 9: Difractograma obtenido en el análisis de arcillas por rayos x (tratamiento K y calentamiento a 550°C).



Fuente: Autor del proyecto



4.2.7 Espectrometría De Fluorescencia De Rayos X (FRX)

Los resultados obtenidos en forma de compuestos y de elementos, se describen a continuación:

Tabla 8. Resultados FRX muestra

CONSTITUYENTE	% EN PESO
SiO	59.9
AlO	14.4
FeO	8.9
CaO	6.5
MgO	4.7
NaO	2.7
KO	1.3
TiO	1.05
PO	0.16
MnO	0.15
Cl	0.088
Cr	0.054
Ba	0.048
V	0.03
Sr	0.03
Zr	0.018
Ni	0.014
Zn	0.009
Rb	0.006
S	0.005
Y	0.003
Totales	100

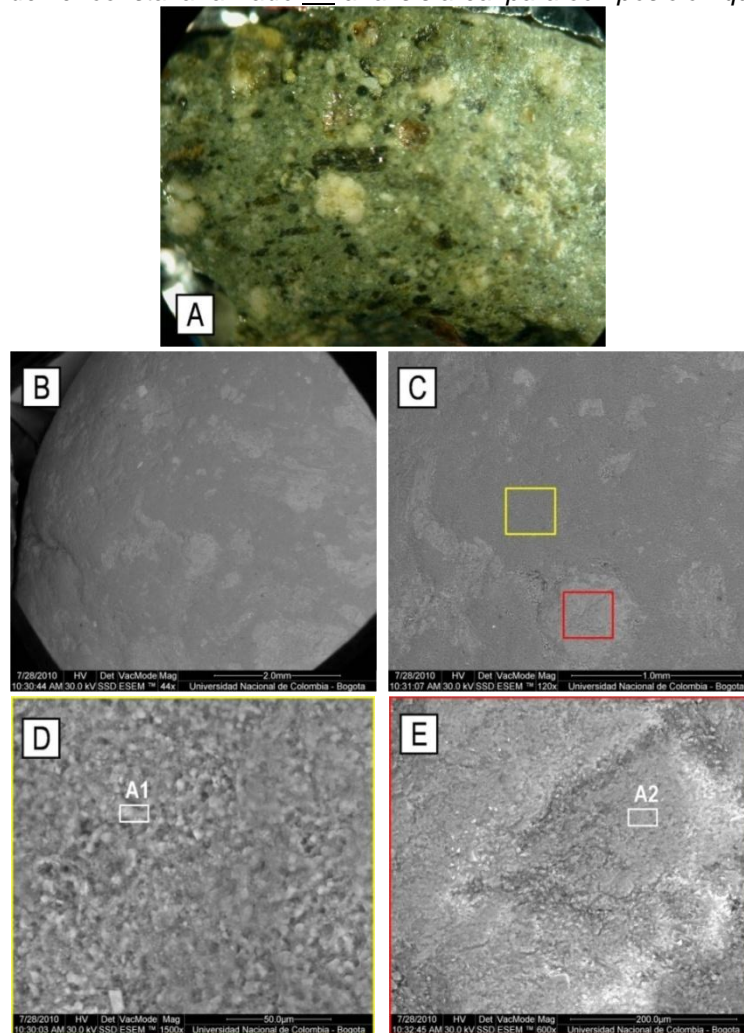
Fuente: Autor del proyecto

4.2.8 Microscopía electrónica, SEM

Fracción gruesa del agregado:

En las siguientes imágenes se observa el análisis de la primera partícula tamaño grava, destacándose la textura y la composición de las zonas estudiadas:

Figura 10. Microfotografías mostrando: **A.** Microfotografía del primer agregado tipo basalto bajo el estéreo microscopio. Se destaca la matriz con textura holohialina de tonalidad verde y los fenocristales de plagioclasa color claro y hornblenda de color oscuro, entre otros **B.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Se destaca la matriz en color oscuro y los fenocristales en color claro. **C.** Áreas analizadas con la microsonda de rayos X, en un sector de la matriz (recuadro amarillo) y en un fenocristal (recuadro rojo) **D:** Detalle del sector de la matriz analizado. **A1** representa el análisis areal para la determinación de la composición química de la matriz. **E.** Detalle del fenocristal analizado **A2** análisis areal para composición química del cristal.



Fuente: Autor del proyecto

La tabla No 9 registra la concentración (% en peso) de los elementos presentes en los sectores analizados.

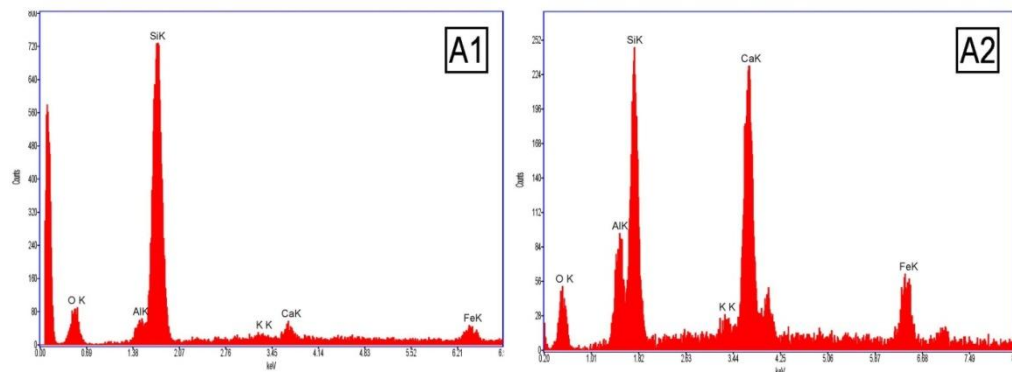
Tabla 9. Composición química

PUNTO	O%	Al%	Si%	K%	Ca%	Fe%
A1	29.4	4.38	54.3	1.15	3.27	7.51
A2	24	10.6	25.4	1.94	23.4	14.7

Fuente: Autor del proyecto

Las siguientes imágenes muestran los espectros de emisión de rayos x de los análisis areales A1 y A2 obtenidos con la microsonda de rayos X.

Figura 11. Espectros de emisión de rayos X de los análisis Areales A1 y A2



Fuente: Autor del proyecto

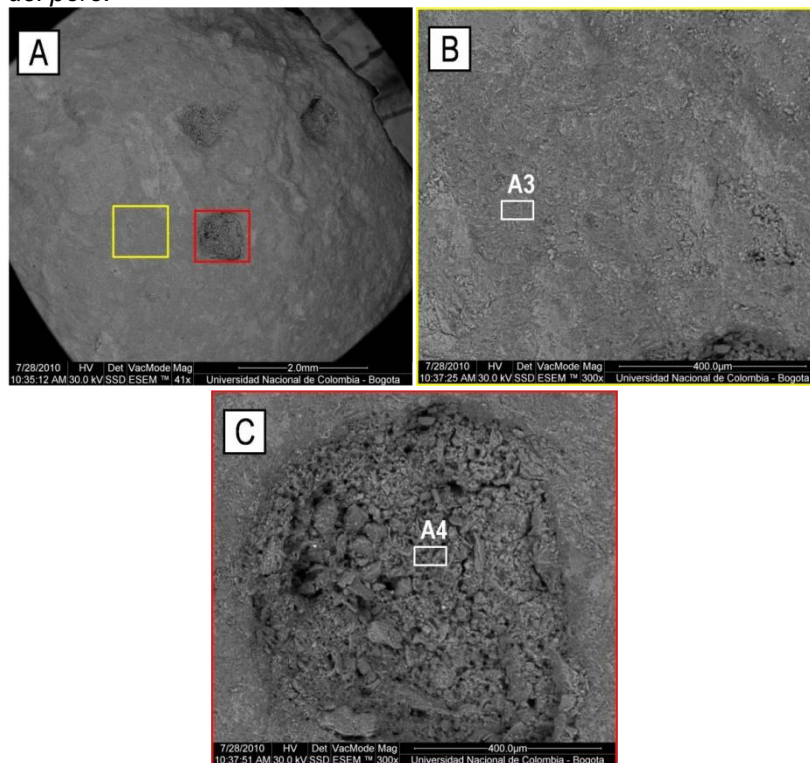
En las siguientes imágenes se observa el análisis de la segunda partícula tamaño grava, destacándose la textura y la composición de las zonas estudiadas.

Figura 12. Microfotografía del segundo agregado tipo basalto bajo el estéreo microscopio. Se destaca la matriz con textura holohialina de tonalidad verde y los fenocristales hornblenda de color oscuro.



Fuente: Autor del proyecto

Figura 13. Microfotografías mostrando: **A.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Se destaca la matriz en color oscuro (recuadro amarillo) y la forma de un poro (recuadro rojo) presente en la muestra analizada con la microsonda de rayos X. **B.** Detalle del sector de la matriz analizado. **A3** representa el análisis areal para la determinación de la composición química de la matriz. **C.** Detalle de la textura del poro. **A4** análisis areal para composición química del material presente en el interior del poro.



Fuente: Autor del proyecto

La tabla No 10 registra la concentración (% en peso) de los elementos presentes en los sectores analizados.

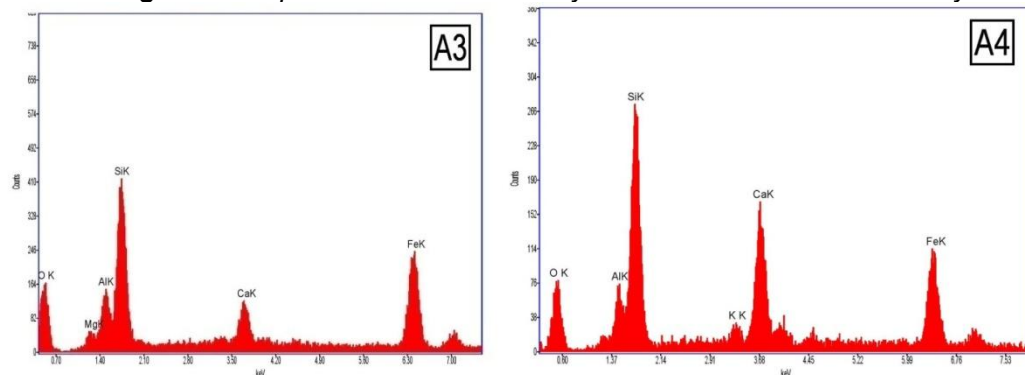
Tabla 10. Composición química

PUNTO	O%	Al%	Si%	K%	Ca%	Fe%	Mg%
A3	26.9	9.88	25.9		5.13	28.6	3.58
A4	29.3	6.52	26.2	1.82	13.6	22.6	

Fuente: Autor del proyecto

Las siguientes imágenes muestran los espectros de emisión de rayos x de los análisis areales A3 y A4 obtenidos con la microsonda de rayos X.

Figura 14. Espectros de emisión de rayos x de los análisis Areales A3 y A4

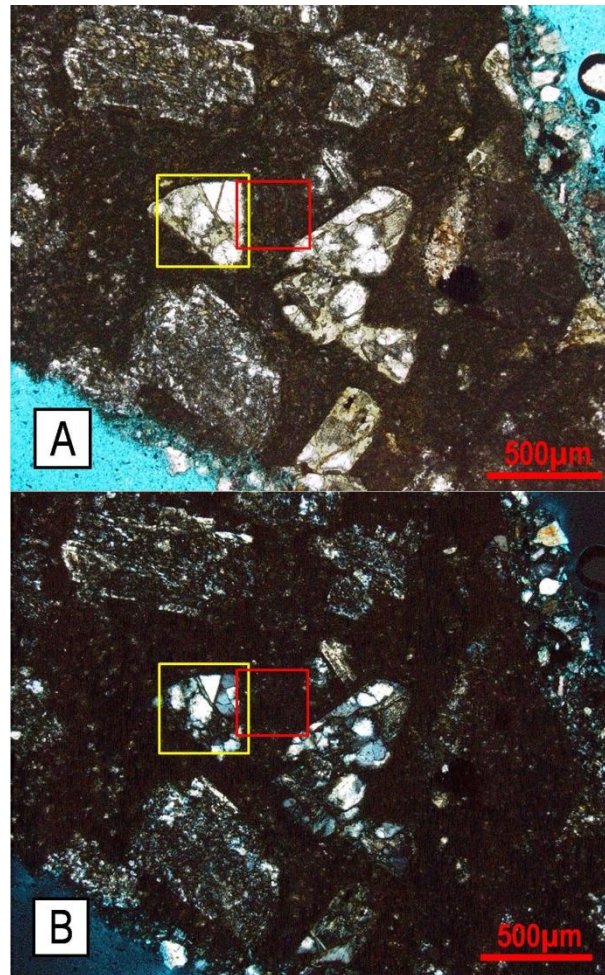


Fuente: Autor del proyecto

Fracción fina del agregado:

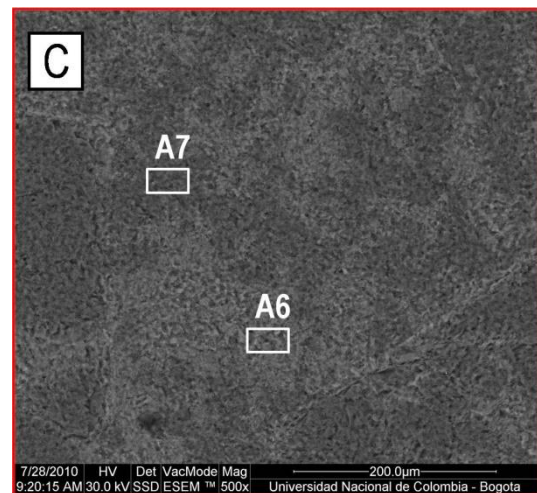
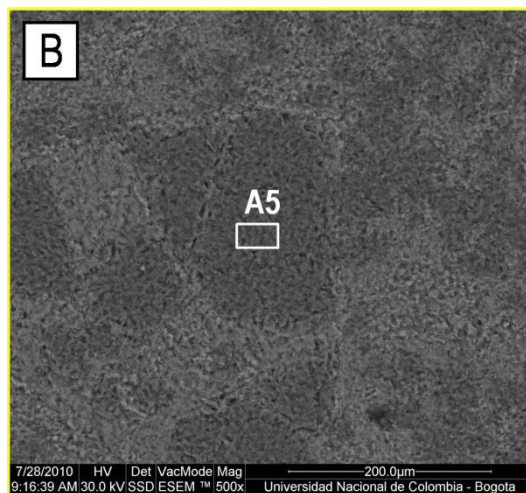
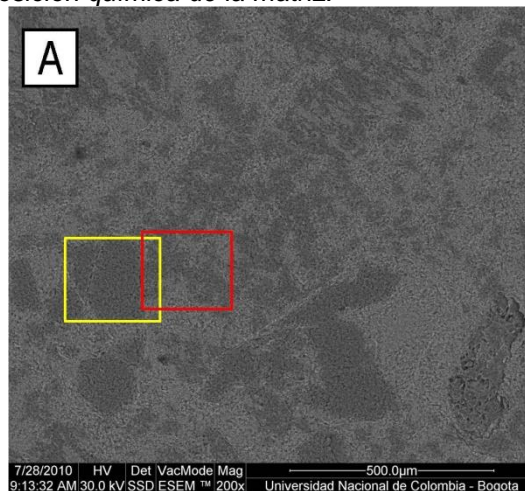
En las siguientes imágenes se observa el análisis de la primera partícula tamaño arena, destacándose la localización, el color, la textura y la composición de las zonas estudiadas:

Figura 15. Microfotografías mostrando: **A.** Fotografía a través del microscopio de luz polarizada en el cual se observa un fragmento de basalto con vidrio volcánico en su matriz, resaltándose su alteración severa (tonos marrones), además se indica los sitios de análisis (recuadros amarillo y rojo) relacionados con los fenocristales presentes en el agregado y la alteración de la matriz, vistos en nicols paralelos. **B.** La misma imagen anterior, pero con nicols cruzados.



Fuente: Autor del proyecto

Figura 16. Microfotografías mostrando: **A.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Se destaca posible mineral en color oscuro (recuadro amarillo) y sectores claros y oscuros de la matriz con alteración severa (recuadro rojo) en la muestra analizada con la microsonda de rayos X. **B.** Detalle del mineral analizado. A5 representa el análisis areal para la determinación de la composición química del cristal. **C.** Detalle de los sectores en la matriz analizados. A6 y A7 análisis areales para composición química de la matriz.



Fuente: Autor del proyecto

La tabla No 11 registra la concentración (% en peso) de los elementos presentes en los sectores analizados

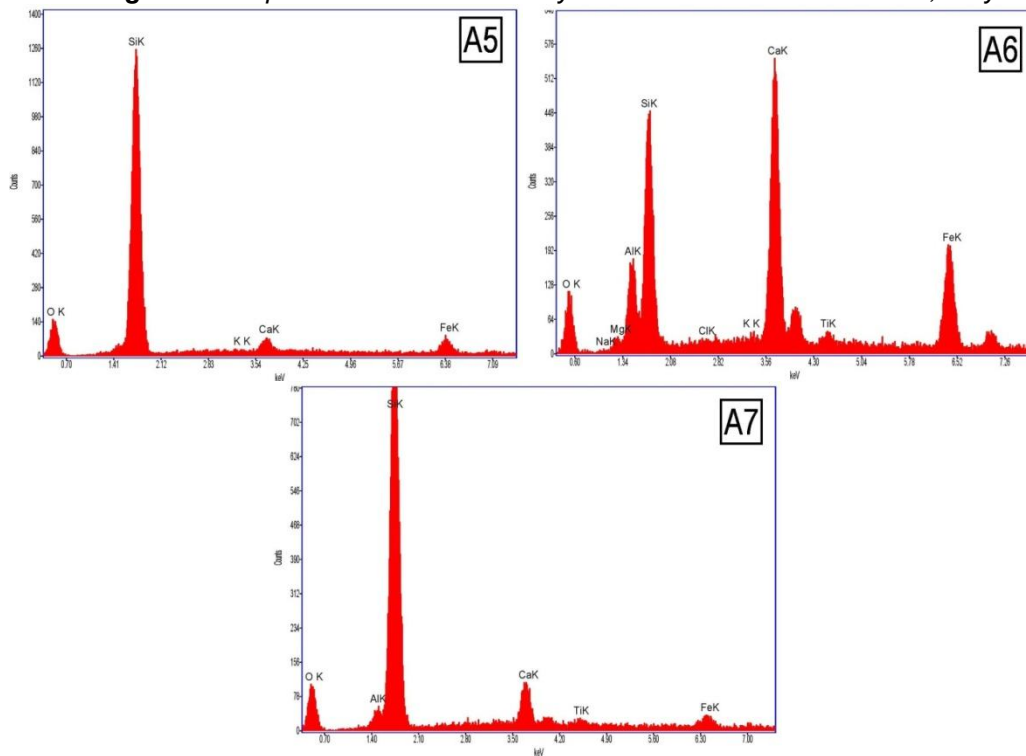
Tabla 11. Composición química

PUNTO	O%	Al%	Si%	K%	Ca%	Fe%	Mg%	Na%	Cl%	Ti%
A5	31.5		55.9	0.38	3.59	8.66				
A6	23.3	9.03	21.2	0.6	22	19.9	1.65	0.3	0.42	1.67
A7	31.2	2.7	51.6		7.88	5.03				1.57

Fuente: Autor del proyecto

Las siguientes imágenes muestran los espectros de emisión de rayos x de los análisis areales A5, A6 y A7 obtenidos con la microsonda de rayos X.

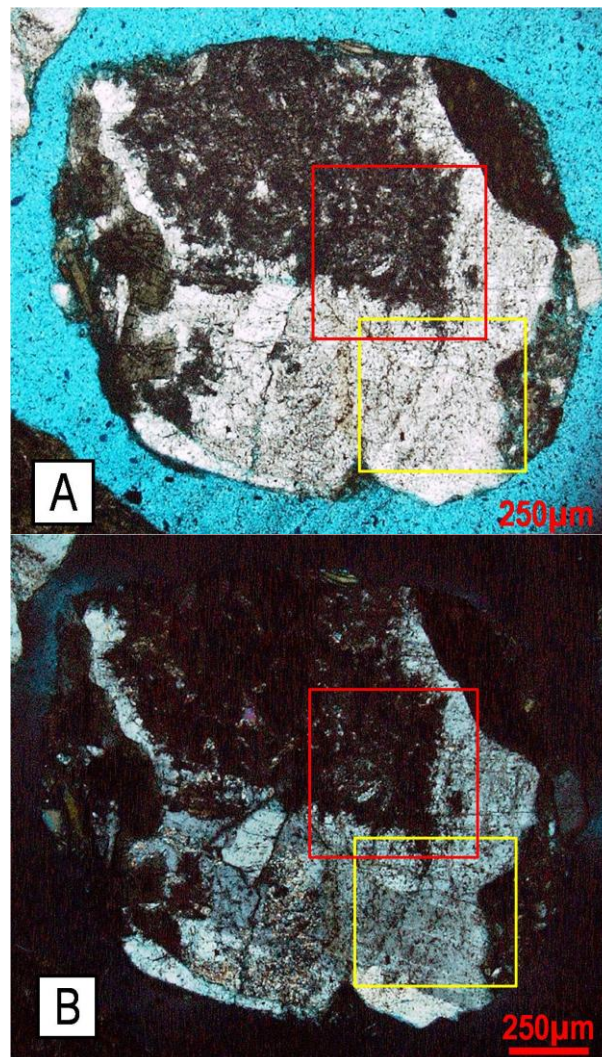
Figura 17. Espectros de emisión de rayos x de los análisis areales A5, A6 y A7



Fuente: Autor del proyecto

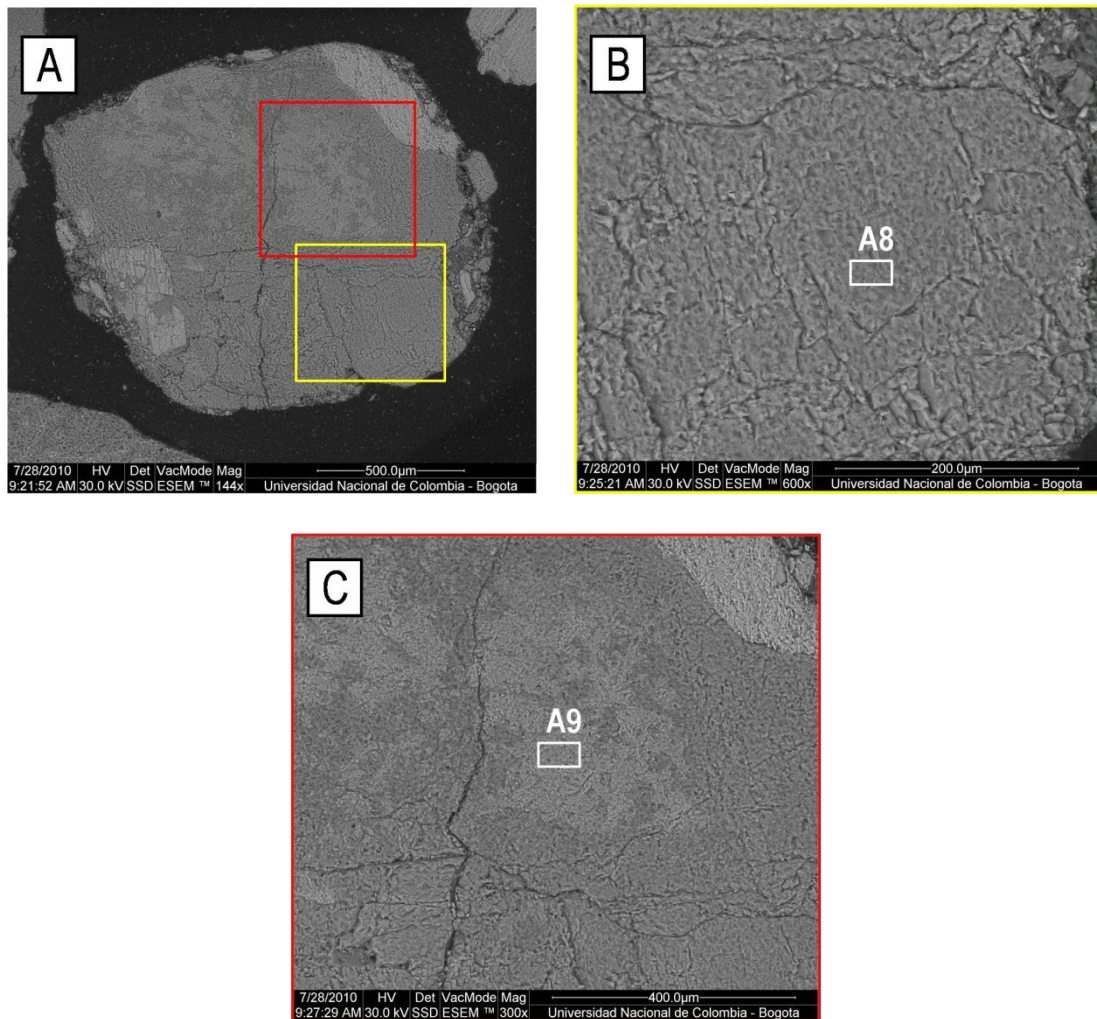
En las siguientes imágenes se observa el análisis de la segunda partícula tamaño arena, destacándose la localización, el color, la textura y la composición de las zonas estudiadas:

Figura 18. Microfotografías mostrando: **A.** Fotografía a través del microscopio de luz polarizada en el cual se observa un cristal de plagioclasa con diferentes grados de alteración, leve (recuadro amarillo) y severo (recuadro rojo), siendo éstos los sitios de análisis, vistos en nicoles paralelos. **B.** La misma imagen anterior, pero con nicoles cruzados.



Fuente: Autor del proyecto

Figura 19. Microfotografías mostrando: **A.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Se destaca el sector con alteración leve (recuadro amarillo) y el sector con alteración severa (recuadro rojo) presente en la muestra analizada. **B.** Detalle del sector con alteración leve. A8 representa el análisis areal para la determinación de la composición química del sector. **C.** Detalle del sector con alteración severa (zonas claras). A9 análisis areal para composición química del producto de alteración.



Fuente: Autor del proyecto

La tabla No 12 registra la concentración (% en peso) de los elementos presentes en los sectores analizados.

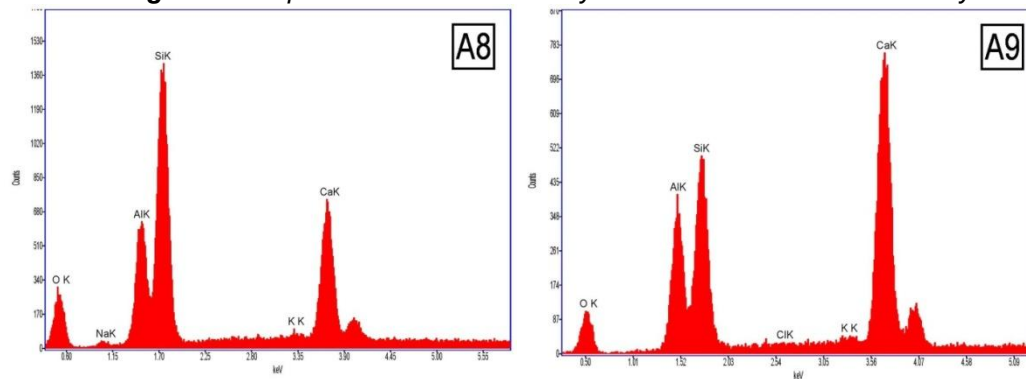
Tabla 12. Composición química

PUNTO	O%	Al%	Si%	K%	Ca%	Fe%	Na%	Cl%
A8	32	13.7	33.7	0.9	17.4	1.4	0.93	
A9	28.1	14.8	21.9	0.96	32.5	1.53		0.31

Fuente: Autor del proyecto

Las siguientes imágenes muestran los espectros de emisión de rayos x de los análisis areales A8 y A9 obtenidos con la microsonda de rayos X.

Figura 20. Espectros de emisión de rayos x de los análisis areales A8 y A9

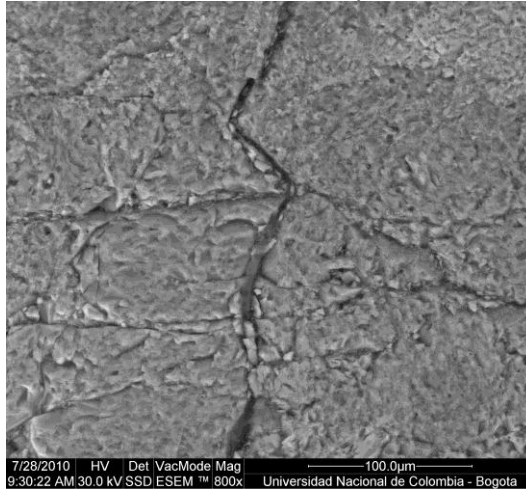


Fuente: Autor del proyecto

La siguiente imagen muestra la microfracturación del cristal de plagioclasa analizada.



Figura 21. Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Se destaca las microfisuras presentes en el cristal de plagioclasa.



Fuente: Autor del proyecto



4.2 GENERALIDADES CANTERA B

4.2.1 Geología

Esta se relaciona con los depósitos aluviales del Río Aburrá. Estos depósitos reposan sobre rocas metamórficas tipo anfibolita y tonalitas del Batolito de Ovejas. El espesor de las gravas y arenas de interés, corresponde a una terraza aluvial del Río Medellín, conformada por:

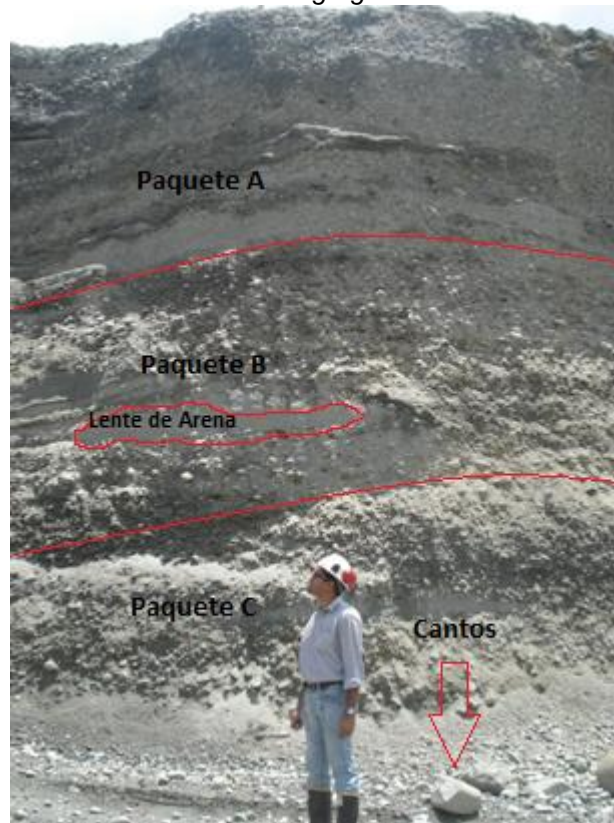
Paquete A: Estratos con partículas de tamaños limos principalmente dispuestos en los estratos superiores y clastos tamaño grava en estratos inferiores.

Paquete B: Compuesto por rocas meteorizadas, cuarzodioritas y granodioritas del batolito antioqueño en los niveles medios del depósito y ocasionalmente lentes de arena hasta de 1.5 m de espesor.

Paquete C: Compuesto por un 51.5% de cantos redondeados y subredondeados de anfibolita, gneis y cuarzo, seguido de rocas graníticas, volcánicas, y un 48.5% de los materiales son finos de arena y limo que pasan la malla 3". Los cantos rocosos son menores a 10 Cm de diámetro y en algunas ocasiones mayores a 26 Cm de diámetro, ver figura 22.

El espesor de los depósitos varía entre 13,20 y 18.30 m, es decir, presenta un espesor promedio de 15,75 m. (ver figura 22).

Figura 22. Fotografía representativa de los depósitos donde se realiza la extracción de los agregados.



Fuente: Autor del proyecto

Adicionalmente, se encuentran fragmentos de basalto porfirítico, roca volcánica alterada con fenocristales de plagioclasa alterando a mica blanca. Se observan además, tobas volcánicas fuertemente alteradas en las que se reconocen granos subredondeados en una matriz gris oscura a negra, con cristales de feldespato alterado y epidota.



4.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CANTERA B

4.3.1 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, 500 revoluciones en seco

La realización de éste ensayo tiene como finalidad, determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados empleando la máquina de los ángeles. Los materiales después de ser desgastados al finalizar el ensayo, se lavan por el tamiz #12 y por diferencia de pesos con la cantidad de material cargado originalmente, se determina el porcentaje de desgaste de los materiales pétreos. El procedimiento a realizar es el común establecido por esta norma.

Gradación utilizada: B

$$\text{Desgaste del agregado} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5000 - 4076)}{(5000)} * 100 = 18 \%$$

4.3.2 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, Curva de desgaste cada 100 revoluciones

El objetivo principal de este ensayo es revisar la uniformidad de los materiales con respecto a su propiedad de dureza. Se hace con la Máquina de desgaste de los Ángeles basados en lo indicado en la nota 3 de esta norma. Se toma la masa de los agregados retenida en la malla #12 tras 100 revoluciones. Esto se repite hasta completar las 500 revoluciones. La cantidad de material en el tambor siempre debe ser la tomada inicialmente, es decir, los finos siempre deben ir adentro. Por diferencia de pesos se calcula el valor del Desgaste.

Gradación utilizada: B

$$\text{Desgaste del agregado}_{100 \text{ rev}} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5006 - 4792)}{(5006)} * 100 = 4 \%$$



$$\text{Desgaste del agregado}_{200 \text{ rev}} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5006 - 4600)}{(5006)} * 100 = 8 \%$$

$$\text{Desgaste del agregado}_{300 \text{ rev}} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5006 - 4404)}{(5006)} * 100 = 12 \%$$

$$\text{Desgaste del agregado}_{400 \text{ rev}} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5006 - 4142)}{(5006)} * 100 = 17 \%$$

$$\text{Desgaste del agregado}_{500 \text{ rev}} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5006 - 3928)}{(5006)} * 100 = 22 \%$$

4.3.3 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, Desgaste del árido después de 3 días saturado y superficialmente seco

En muchas ocasiones el material pétreo utilizado en mezclas asfálticas contiene un porcentaje de humedad debido a que proviene de río o se ha explotado de una cantera a campo abierto. Con este ensayo se pretende simular ese contenido de humedad que al ser absorbido por el agregado, en los poros superficiales, puede alterar la dureza o resistencia al impacto. Razón por la cual se han dejado sumergidos en agua, tres días, los agregados pétreos para luego ser ensayados en la Máquina de los Ángeles. Por diferencia de pesos se calcula el valor del Desgaste luego de ser tamizados por la malla #12.

Gradación utilizada: B

$$\text{Desgaste del agregado} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5000 - 3940)}{(5000)} * 100 = 21 \%$$

4.3.4 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, Desgaste del árido después de someterse a alta temperatura.

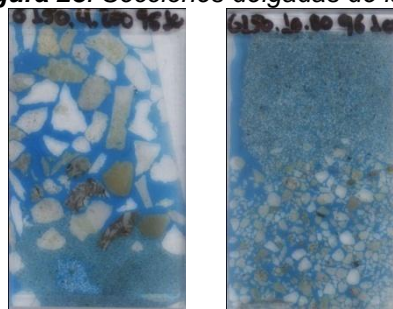
El ensayo de desgaste de los agregados en máquina de los Ángeles da una pista de la resistencia al impacto que los pétreos dan como respuesta durante la fabricación y colocación de la mezcla asfáltica. Esta prueba pretende involucrar la condición de temperatura de mezclado para resaltar el efecto producido con respecto a la condición normal de ensayo. Los agregados fueron calentados en un horno a 150°C durante 3 horas e inmediatamente se ensayaron. Se calcula el desgaste como el porcentaje de material retenido en la malla #12 después de 500 revoluciones, lavado y seco, con respecto al peso inicial.

Gradación utilizada: B

$$\text{Desgaste del agregado} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5001 - 4171)}{(5001)} * 100 = 17 \%$$

4.3.5 Análisis petrográfico de los agregados.

Figura 23. Secciones delgadas de la cantera B.



Sección G150.4.200-9510

Sección G150.10.80-9610

Fuente: Autor del proyecto



Tabla 13. Cálculo de Resultados de Conteo de Partículas

	PORCENTAJE INDIVIDUAL RETENIDO EN EL TAMIZ	COMPOSICIÓN DE FRACCIONES RETENIDAS EN LOS TAMICES						
		Porcentaje de Partículas						
		T-1/2"	T-3/8"	T-No 4	T-No 10	T-No 40	T-No 80	T-No 200
ORIGEN	Constituyentes							
ÍGNEO	Andesita (Con textura holohialina)	12.7	18.5	9.5	13.2	7.2	1.7	0.7
	Andesita (Con textura holocristalina)	6.7	3.4	13.9	1.4	1.0	0.0	0.0
	Toba	45.3	35.3	41.1	39.6	28.8	16.7	0.0
	Tonalita	13.3	21.0	19.6	22.2	24.7	7.5	2.1
METAMÓRFICO	Cuarcita	7.3	5.9	3.8	9.7	9.3	5.7	0.0
	Neiss	6.7	5.9	7.0	4.9	4.1	0.0	0.0
	Cataclasita	7.3	10.1	3.8	9.0	0.0	4.6	0.0
	Esquisto	0.7	0.0	1.3	0.0	0.0	1.7	0.0
	Plagioclasa	0.0	0.0	0.0	0.0	7.2	20.1	31.7
	Cuarzo	0.0	0.0	0.0	0.0	9.3	17.2	19.0
	Biotita	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	12.0
	Epidota	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0
	Hornblenda	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	8.6	26.8
	Clorita	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0
	Sericita	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0
	Opacos	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	3.5
	OTROS	Fragmento Alterado	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2	6.3	4.2
TOTAL		100	100	100	100	100	100	100

Fuente: Autor del proyecto

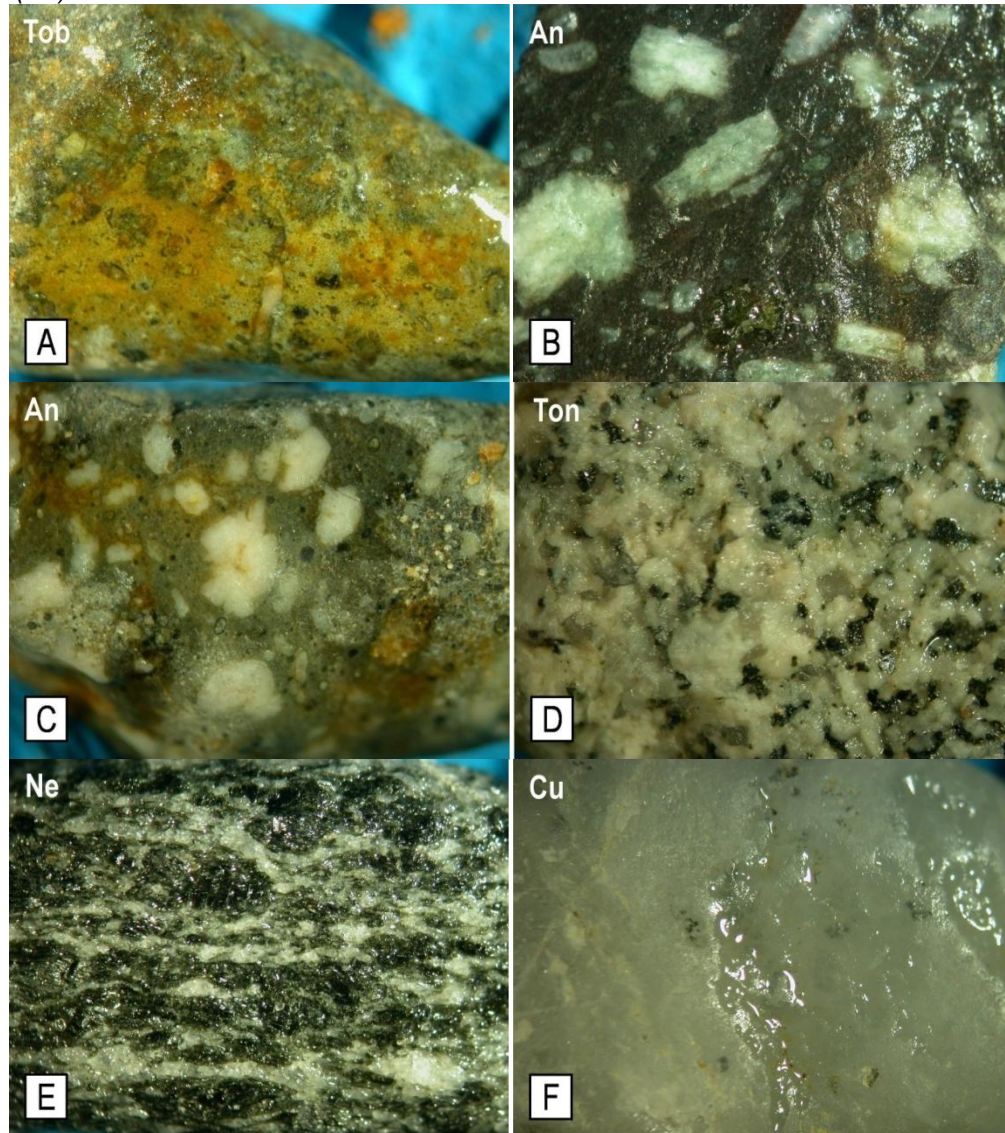


Tabla 14. Composición de la muestra

CONSTITUYENTES	Porcentaje de Partículas						
	T-1/2"	T-3/8"	T-No 4	T-No 10	T-No 40	T-No 80	T-No 200
ÍGNEOS	78.0	78.2	84.2	76.4	60.8	19.0	2.8
SEDIMENTARIOS	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
METAMÓRFICOS	22.0	21.8	15.8	23.6	13.4	12.1	0.0
MONOMINERALES	0.0	0.0	0.0	0.0	19.6	62.6	93.0
OTROS	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2	6.3	4.2
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100

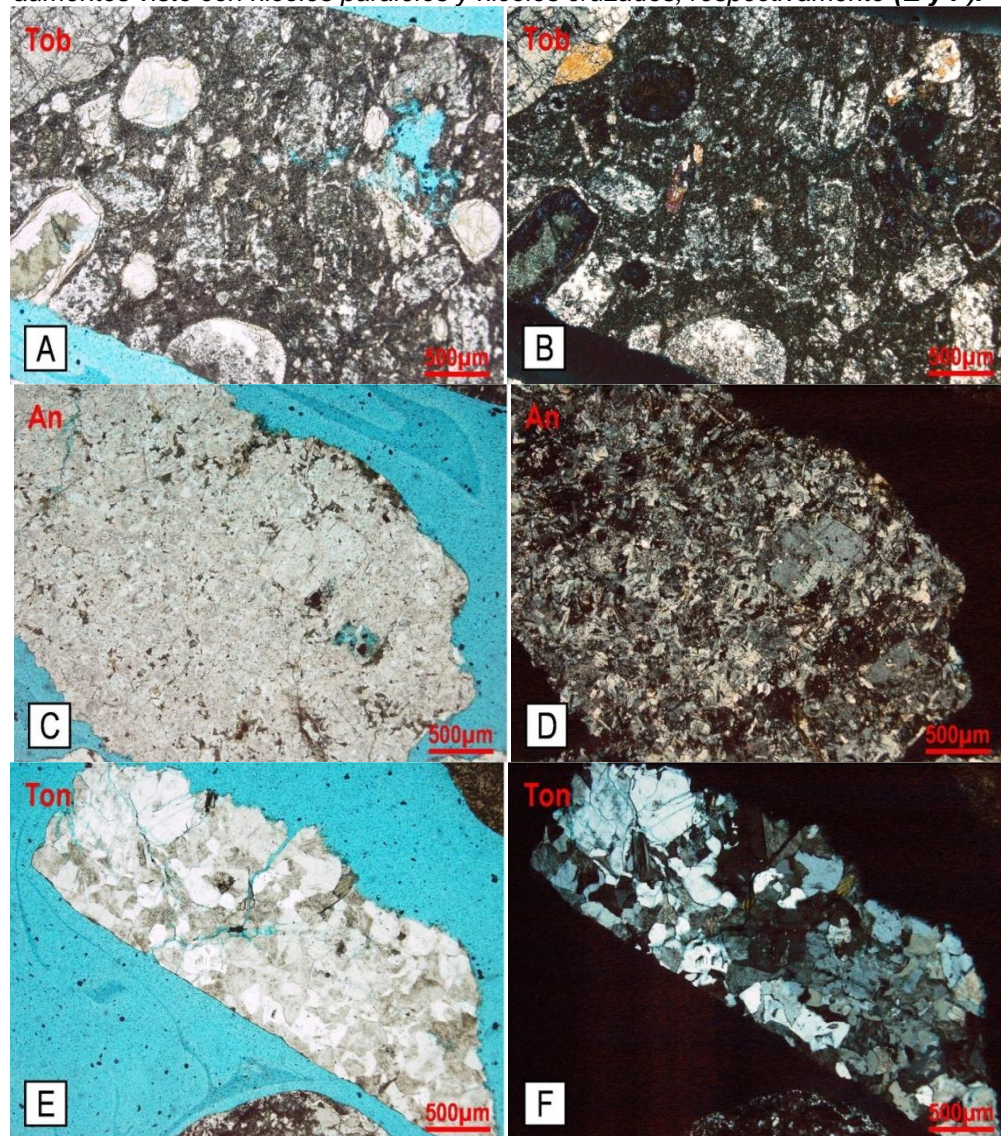
Fuente: Autor del proyecto

Figura 24. Microfotografías de agregados bajo el estéreo microscopio del tamiz No 4 mostrando **A.** Toba (Tob).. **B-C.** Andesitas (An) **D.** Tonalita (Ton) **E.** Neiss (Ne). **F.** Cuarzita (Cu).



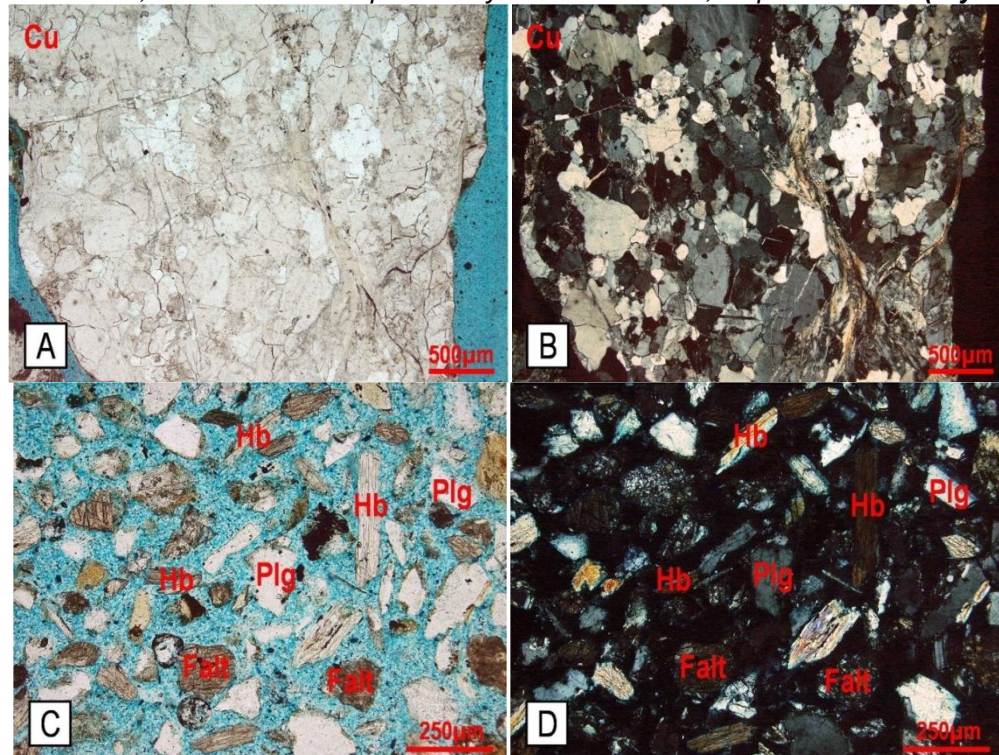
Fuente: Autor del proyecto

Figura 25. Microfotografías de agregados del tamiz No 10 bajo el microscopio petrográfico mostrando: Toba (Tob) con textura holohialina y matriz con alteración severa, y vesículas rellenas de clorita, en 4 aumentos vista con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (A y B). Andesita (An) hipocristalina con matriz microlítica y fenocristal de plagioclasa (Plg), en 4 aumentos vista con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (C y D) Tonalita (Ton) con cristales de plagioclasa y cuarzo, en 4 aumentos visto con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (E y F).



Fuente: Autor del proyecto

Figura 26. Microfotografías de agregados bajo el microscopio petrográfico mostrando: Cuarzita (Cu) del tamiz No 10 en 4 aumentos, vistas con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (A y B). Agregados del tamiz No 200, en 10 aumentos, entre los cuales se resaltan hornblendas (Hb), plagioclasas (Plg) y fragmentos alterados (Falt), entre otros, vistos con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (C y D).



Fuente: Autor del proyecto

Porosidad y Fracturación

En términos generales, la porosidad es de tipo primaria y secundaria. En el primer caso se produce naturalmente por el empaquetamiento de los granos, mientras que en el segundo se relaciona con el fenómeno de disolución.

En este caso como se aprecia en la tabla 15 los agregados con porosidad no superan el 33% de la muestra, siendo esta principalmente de tipo baja.

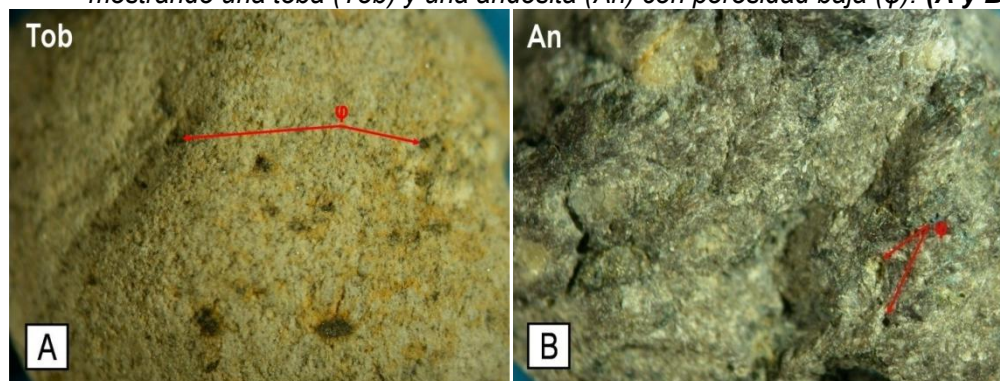
La presencia de planos de fractura no es significativa.

Tabla 15. Porosidad.

POROSIDAD SECUNDARIA	NIVELES DE LAS FRACCIONES ANALIZADAS				
	Porcentaje de Partículas				
	T-1/2"	T-3/8"	T-No 4	T-No 10	T-No 40
No visible	66.7	82.1	99.3	78.0	86.0
Baja	27.4	15.2	0.7	16.0	9.6
Alta	6.0	2.6	0.0	6.0	4.4
TOTAL	100	100	100	100	100

Fuente: Autor del proyecto

Figura 27. Microfotografías de agregados del tamiz No 4 bajo el estéreo microscopio mostrando una toba (Tob) y una andesita (An) con porosidad baja (ϕ). (A y B).



Fuente: Autor del proyecto

Alteración

La alteración hace referencia a la modificación sufrida en la composición o estructura interna de una roca situada en la superficie terrestre o en sus proximidades, debido a la acción de agentes atmosféricos.

Para los agregados de tamices $\frac{3}{4}$ " a No 4, el grado de alteración se determinó con base en la modificación superficial del color natural. El agregado que



conserva el color de la roca origen sin presencia de manchas, se considera no alterado; de lo contrario, si se observan manchas o alteraciones de color, se agrupan y se diferencian en tres niveles cualitativos:

- Leve: presencia de manchas de coloraciones muy tenues o coloraciones más fuertes que se extienden sobre un área pequeña de la superficie del agregado.
- Moderada: presencia de manchas de coloraciones notorias tanto en tonalidad como en extensión.
- Severa: presencia de manchas con coloraciones fuertes que abarcan una extensión importante de la superficie del agregado.

A nivel microscópico los procesos de meteorización química actúan siempre en la superficie de los minerales y la intensidad de la reacción depende directamente de la superficie específica y del grado de fragmentación mecánica previa que tenga el material. Es así como el ataque a los minerales primarios puede ser seguido por una redistribución atómica en la red cristalina remanente, lo que conduce a un nuevo mineral más estable (en ese ambiente) que el anterior. El resultado de las acciones de meteorización es la formación de minerales de arcilla (Besoain, 1985).

El grado de meteorización se determinó teniendo en cuenta principalmente los niveles de sericitización de las plagioclasas; y el contenido de sílice amorfa manifestada en la devitrificación de la matriz, la presencia de vidrio volcánico y el contenido de calcedonia, no obstante, también se tuvo en cuenta otros tipos de alteración tales como oxidación, aunque esta se presentó de manera muy esporádica.

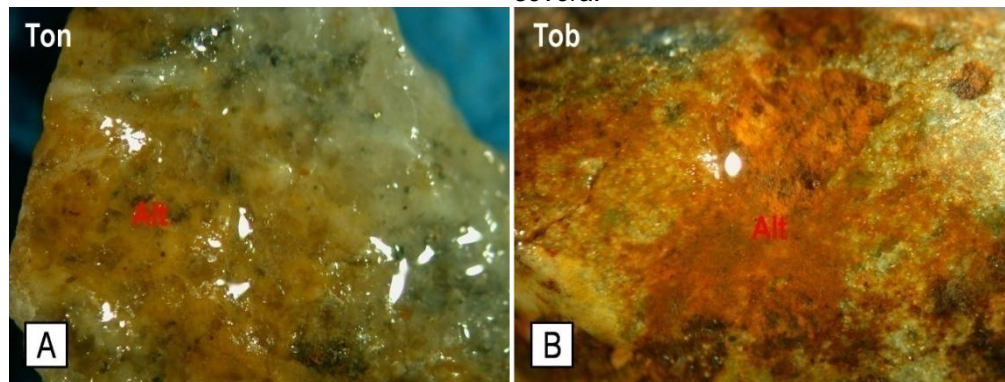
Como se puede observar en la tabla 16, abunda el tipo de alteración predominante es de tipo leve.

Tabla 16. Alteración.

ALTERACIÓN	NIVELES DE LAS FRACCIONES ANALIZADAS				
	Porcentaje de Partículas				
	T-1/2"	T-3/8"	T-No 4	T-No 10	T-No 40
Sin alteración	34.2	36.4	38.7	42.5	50.9
Leve	55.6	53.6	52.7	36.7	29.8
Moderada	7.7	6.6	6.7	10.0	8.8
Severa	2.6	3.3	2.0	10.8	10.5
TOTAL	100	100	100	100	100

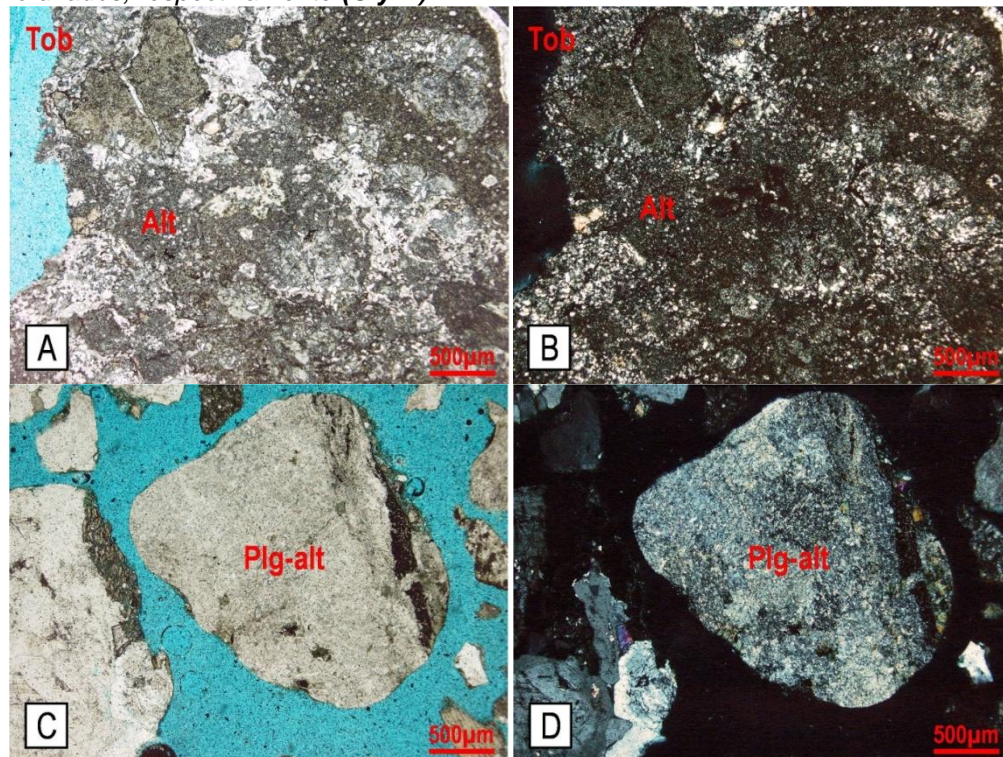
Fuente: Autor del proyecto

Figura 28. Microfotografías de agregados del tamiz No 4 alterados bajo el estéreo microscopio, mostrando: **A.** Tonalita (Ton) con alteración leve. **B.** Toba (Tob) con alteración severa.



Fuente: Autor del proyecto

Figura 29. Microfotografías de agregados bajo el microscopio petrográfico mostrando: Alteración severa de un Tonalita (Ton) con vidrio (Vid) volcánico, del tamiz No 10, visto con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (**A y B**). Alteración moderada de una plagioclasa (Plg-alt) sericitizada, del tamiz No 40 vista con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (**C y D**).



Fuente: Autor del proyecto

Tabla 16^a. Contenido teórico de SiO₂ en las muestras

Tipo de roca/mineral	Cuarcita/ Cuarzo/Vidrio	Toba	Cataclasis	Plagioclasas	Tonalita	Esquisto/Neiss/And esita (con textura hollalina)	Andesita (con textura holocristalina)/ Hornblenda	Biotita/Clorita /Sericita	Epidota	Opaco/Fragmento alterado
Contenido de SiO ₂	100%	90%	69%	67%	66%	59%	51%	41%	35%	0%
	> Grado de acidez <									
	AcidoBásico									
Porcentaje de partículas en las muestras	14.53	28.05	5.08	8.13	15.04	13.31	9.55	2.74	0.30	3.25

Fuente: Kumar (2004)



Según lo anterior la mayoría del material está compuesto por rocas de composición intermedia a félsica, en la muestra cerca del 70% corresponde a material con PH ácido a intermedio. Se hace necesario el uso de aditivos para no afectar la adherencia de los agregados con el asfalto. Kumar (2004).

4.3.6 Difracción de rayos X

En la siguiente tabla se describe la semi-cuantificación de los componentes por altura del pico (intensidad) teniendo en cuenta los picos más intensos de cada mineral presente; obtenida mediante el análisis de difracción de rayos-X (DRX). Los datos se derivan de los correspondientes Difractogramas:

Tabla 17. Datos extraídos de los Difractogramas

CONSTITUYENTE	MÉTODO DEL POLVO (a)	MINERALOGÍA DE ARCILLAS (b)
Montmorillonita		≈21%
Cloritas	<5%	≈16%
Micas	≈14%	≈10%
Caolinita	≈5%	≈38%
Anfíboles	≈26%	≈7%
Cuarzo	≈22%	
Feldespatos	≈30%	≈8%
Pirofilita	<5%	
Total	≈ 100 %	≈ 100 %

Fuente: Autor del proyecto

De acuerdo con los resultados anteriores, se observa que hay un predominio de minerales arcillosos o filosilicatos, entre los que se destaca la caolinita y la



montmorillonita (51.2%), seguido por la presencia de minerales de tipo no filosilicato como cuarzo, anfíboles y feldespatos (48.8%).

En la siguiente tabla se especifica la mineralogía global de la muestra:

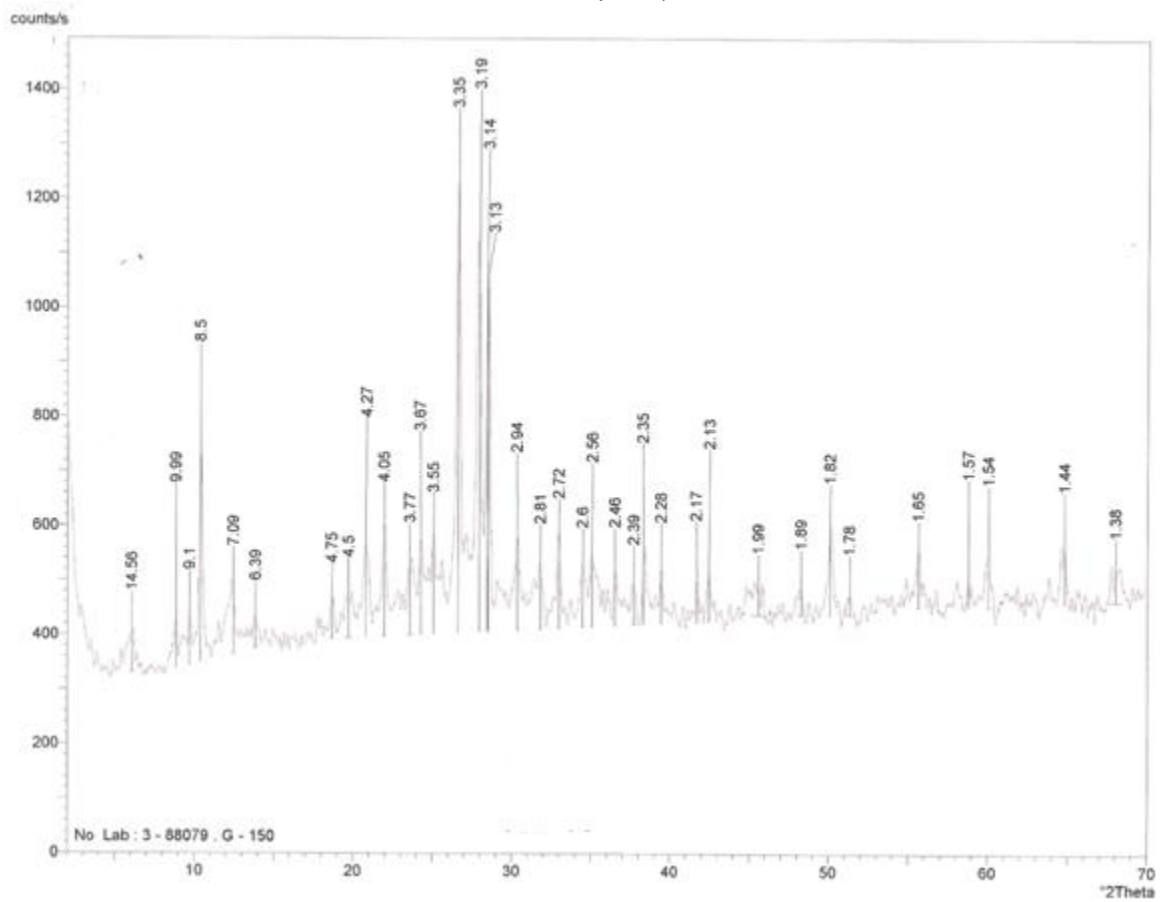
Tabla 18. Mineralogía global de la muestra.

CONSTITUYENTE	PORCENTAJE APROXIMADO (%)
Montmorillonita	12.7
Cloritas	9.6
Micas	6.0
Caolinita	22.9
Anfíboles	15.7
Cuarzo	13.3
Feldespatos	18.1
Pirofilita	1.8
Total	100

Fuente: Autor del proyecto

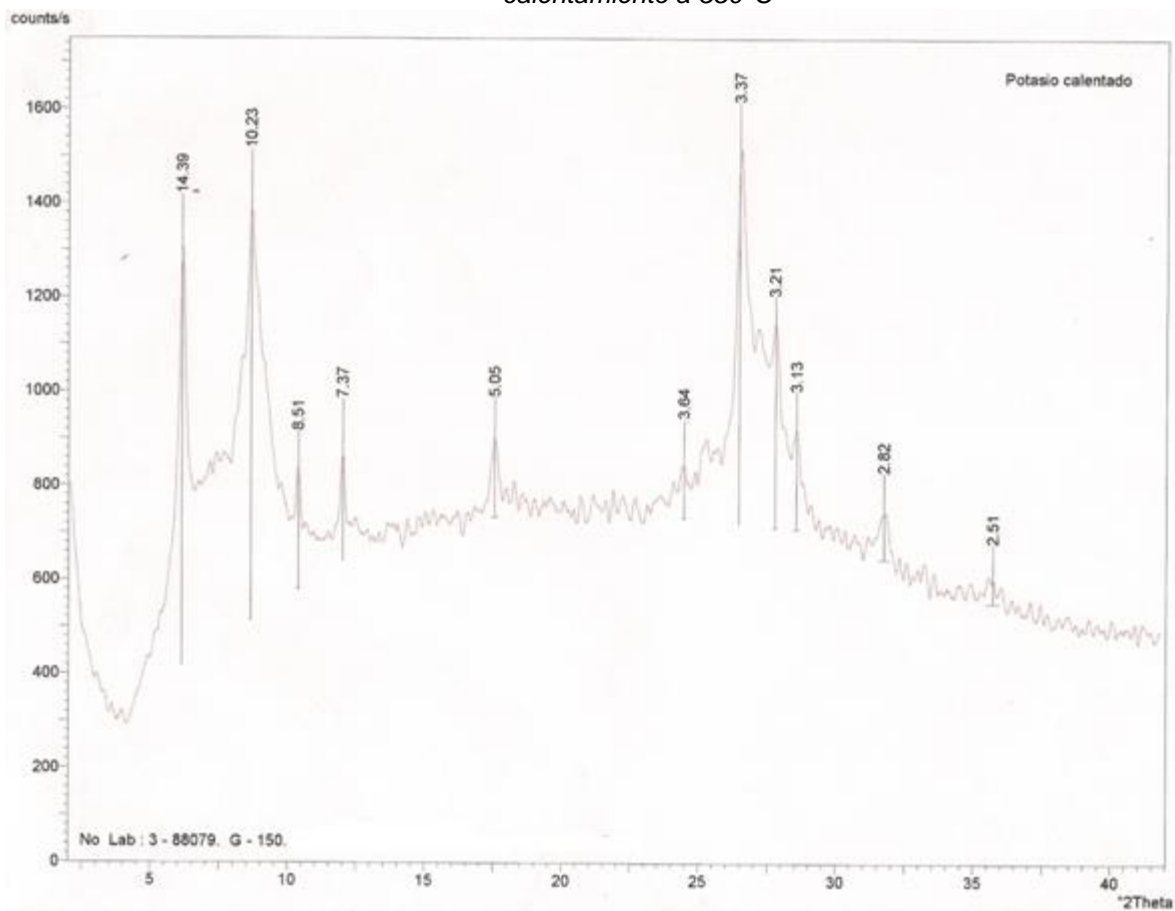


Figura 30: Difractograma obtenido en el análisis de la muestra total por DRX (método del polvo)



Fuente: Autor del proyecto

Figura 31: Difractograma obtenido en el análisis de arcillas por rayos x (tratamiento K y calentamiento a 550°C)



Fuente: Autor del proyecto



4.3.7 Fluorescencia de rayos X

Los resultados obtenidos en forma de compuestos y de elementos, se describen a continuación:

Tabla 19. Resultados FRX muestra.

CONSTITUYENTE	% EN PESO
SiO ₂	55.131
Al ₂ O ₃	17.725
Fe ₂ O ₃	10.303
CaO	6.266
MgO	5.166
Na ₂ O	2.063
K ₂ O	1.061
TiO	1.105
P ₂ O ₅	0.215
MnO	0.150
Cl	0.027
Cr	0.065
Ba	0.050
V	0.034
Sr	0.020
Zr	0.023
Ni	0.007
Zn	0.011
Rb	0.005
S	0.533
Y	0.003
As	0.002
Cu	0.012
Ce	0.019
Totales	100

Fuente: Autor del proyecto



4.3.8 Microscopía electrónica, SEM

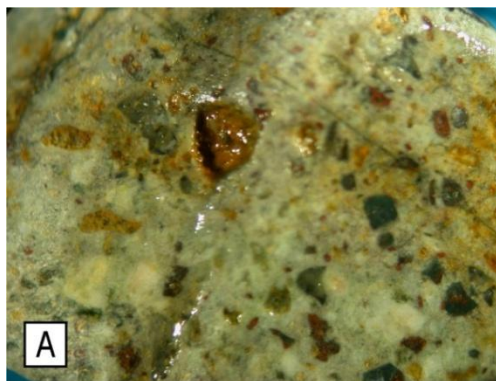
PROCEDIMIENTO:

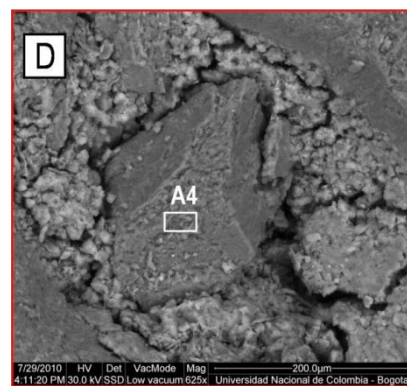
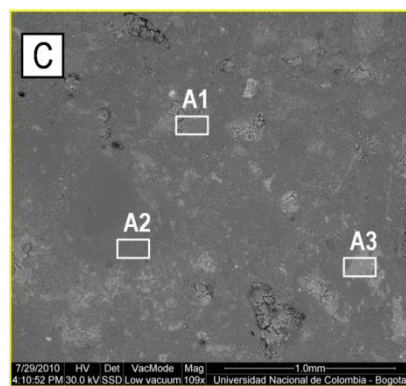
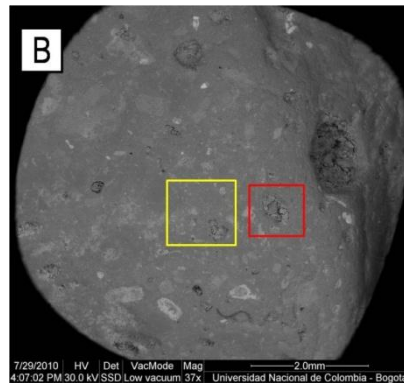
Este análisis permite observar las muestras con magnificaciones de hasta 60.000x con un profundidad de $\sim 3\mu\text{m}$ y determinar la composición química mediante la técnica de microanálisis de rayos X (EDX).

Fracción gruesa del agregado

En las siguientes imágenes se observa el análisis de la partícula tamaño grava, destacándose la textura y la composición de las zonas estudiadas:

Figura 32. Microfotografías mostrando: **A** Microfotografía una toba bajo el estéreo microscopio. Se destaca la matriz con textura holohialina de tonalidad verde clara, fenocristales de plagioclasa de color blanco, fenocristales oxidados de color naranja y poros en la muestra, entre otros **B**. Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Se destaca la textura de los poros en la muestra, además las áreas analizadas con la microsonda de rayos X, en un sector de la muestra (recuadro amarillo) y en un poro (recuadro rojo) **C**: Detalle del sector del analizado. A1, A2 y A3 representa los análisis areales para la determinación de la composición química. **D**. Detalle y textura del interior del poro analizado A4 análisis areal para composición química del material interno del poro.





Fuente: Autor del proyecto

La tabla No 20 registra la concentración (% en peso) de los elementos presentes en los sectores analizados.

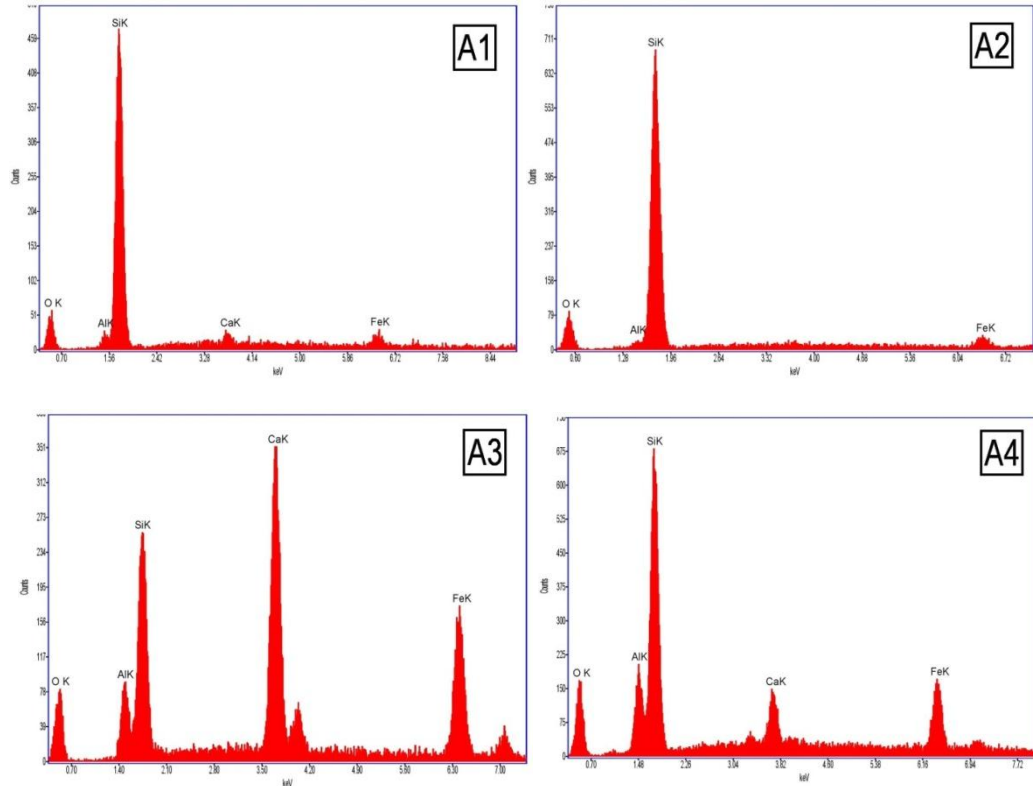
Tabla No. 20: Composición química

PUNTO	O%	Al%	Si%	Ca%	Fe%
A1	26.31	2.57	59.66	3.66	7.81
A2	30.54	1.87	59.99		7.6
A3	24.93	7.2	19.89	22.22	25.76
A4	28.66	10.22	36.65	6.26	18.21

Fuente: Autor del proyecto

Las siguientes imágenes muestran los espectros de emisión de rayos x de los análisis areales A1, A2, A3 y A4 obtenidos con la microsonda de rayos X.

Figura 33. Los espectros de emisión de rayos x de los análisis areales A1, A2, A3 y A4

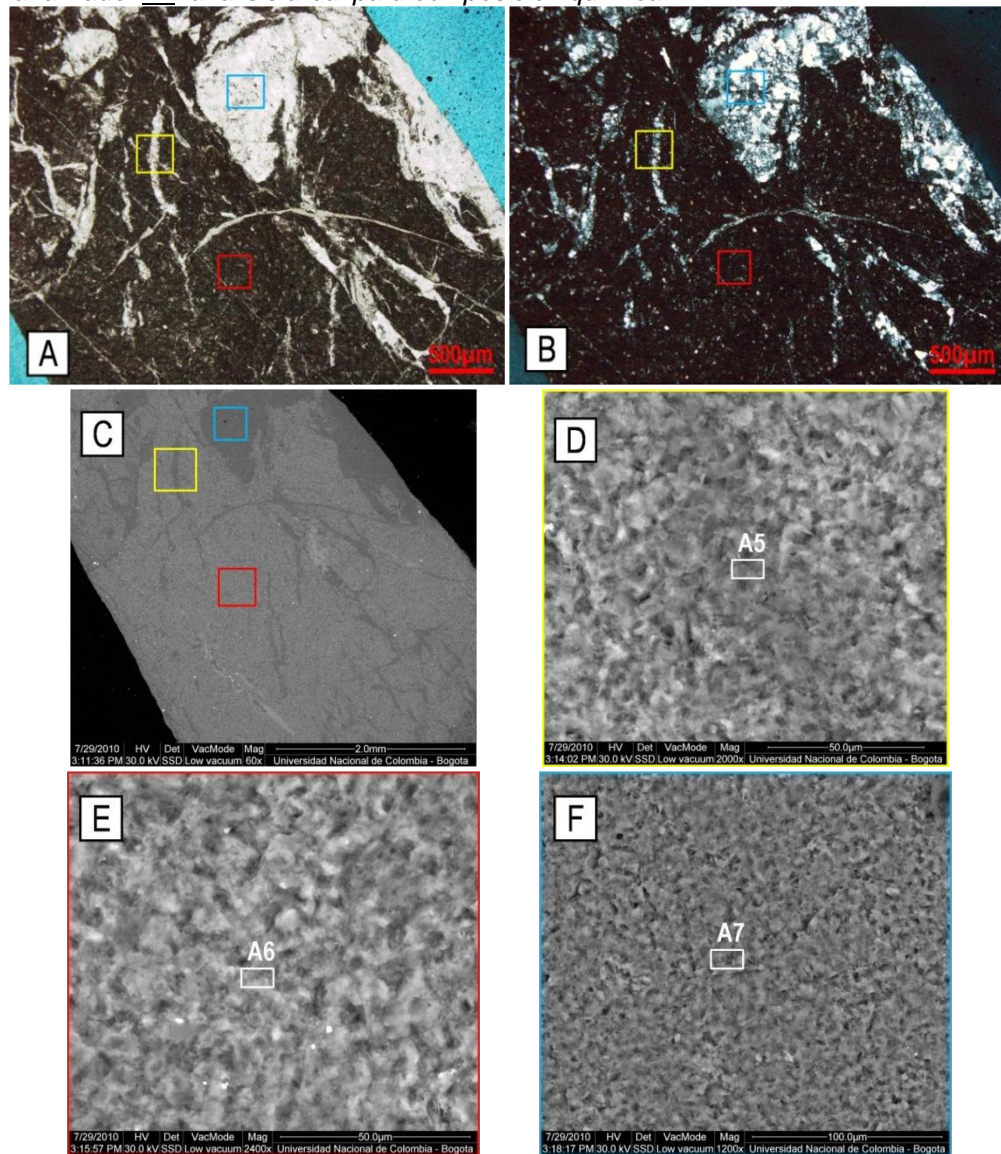


Fuente: Autor del proyecto

Fracción fina del agregado

En las siguientes imágenes se observa el análisis de la partícula tamaño arena, destacándose la localización, el color, la textura y la composición de las zonas estudiadas:

Figura 34. Microfotografías mostrando: **A.** Fotografía a través del microscopio de luz polarizada en el cual se observa un fragmento de toba con vidrio volcánico en su matriz, resaltándose su alteración severa (tonos marrones), además se indica los sitios de análisis (recuadros amarillo, rojo y azul) relacionados con la alteración de la matriz y de los minerales, vistos en nicoles paralelos. **B.** La misma imagen anterior, pero con nicoles cruzados. **C.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Se destaca los sectores de análisis con la microsonda de rayos X. **D.** Detalle del sector de la matriz con venillas mineralizadas analizadas. **A5** representa el análisis areal para la determinación de la composición química. **E.** Detalle de un sector de la matriz analizado. **A6** análisis areal para composición química. **F.** Detalle de mineral analizado. **A7** análisis areal para composición química.



Fuente: Autor del proyecto

La tabla No 21 registra la concentración (% en peso) de los elementos presentes en los sectores analizados.

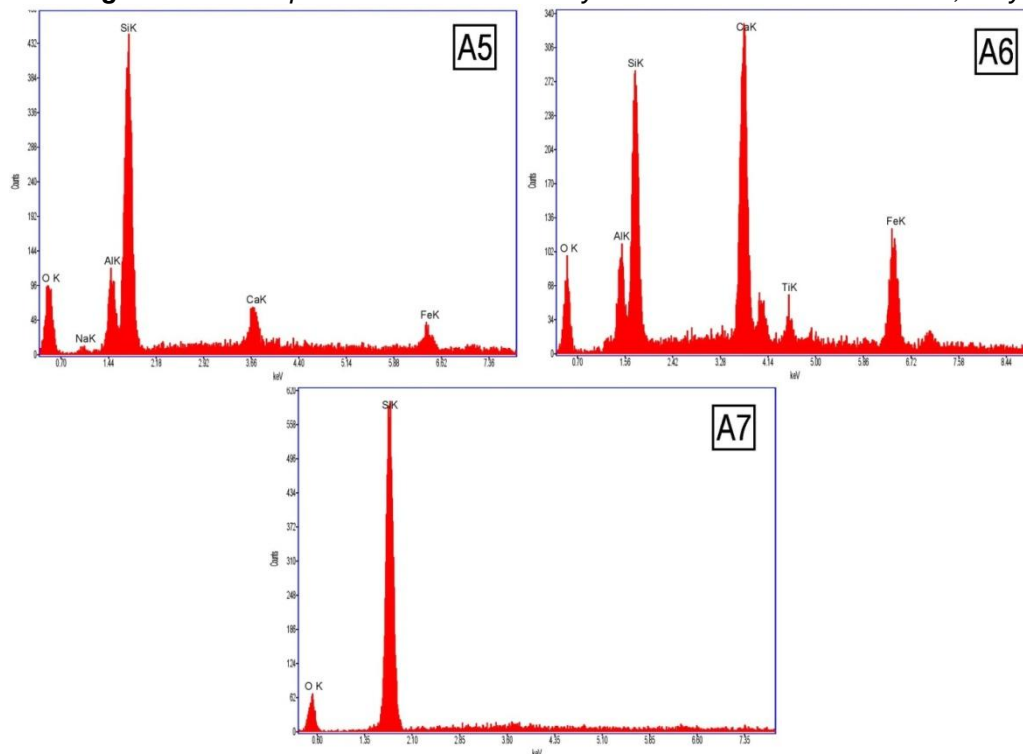
Tabla No. 21: Composición química.

PUNTO	O%	Al%	Si%	Ca%	Fe%	Na%	Ti%
A5	35.31	10.1	40.11	6.15	6.83	1.49	
A6	27.67	8.08	21.14	21.31	18.79		3.02
A7	35		65				

Fuente: Autor del proyecto

Las siguientes imágenes muestran los espectros de emisión de rayos x de los análisis areales A5, A6 y A7 obtenidos con la microsonda de rayos X.

Figura 35. Los espectros de emisión de rayos x de los análisis areales A5, A6 y A7



Fuente: Autor del proyecto



4.4 GENERALIDADES CANTERA C

4.4.1 Geología.

El relleno aluvial de río Medellín está compuesto de gravas y arenas depositadas por antiguas corrientes trenzadas y recientemente meándricas, posee también arcillas depositadas por lagos y pantanos de llanuras de inundación adyacentes a dicha corriente. Las gravas que comprenden estos depósitos son guijos y cantos de rocas ígneas y metamórficas proveniente principalmente de Batolito Antioqueño y del Grupo Ayurá-Montebello.

El espesor del relleno aluvial no es uniforme a través del valle, se observa una zona amplia con espesores de 20 a 30 m y en el centro una zona estrecha en donde se alcanzan espesores hasta de 85 m.

Estos depósitos suprayacen un basamento de roca ígnea de composición granodiorítica- cuarzodiorítica denominada Batolito Antioqueño de edad Jurásica. Esta roca, forma la meseta central del oriente, que en la zona de estudio se presenta en formas de colinas redondeadas con espesores variables residuales cubiertos de una delgada capa de ceniza volcánica. Esta roca está compuesta por plagioclasa andesina (56%), ortoclasa (6%), cuarzo (18%), biotita (11%) y hornblenda.

Las zonas de derrubio en las laderas del Valle de Aburrá presentan extensos depósitos de vertiente en donde predominan los flujos de lodo y de escombros, compuestos por bloques de las diferentes unidades litológicas presentes en el área, en una matriz generalmente limo – arcillosa. La estratificación de los suelos es compleja y variable puntualmente, así como el grado de alteración y tamaños de los bloques de roca. Los depósitos de vertiente presentan evidencia de ser más antiguos hacia el fondo del valle y más recientes hacia las laderas. Algunos de estos depósitos están asociados a fallas pertenecientes a los principales sistemas presentes en el área (NS, NW y NE).

De otro lado la característica común de estos depósitos es la presencia de bloques de tamaño variable, muchas veces frescos, con caras angulares, dentro de una



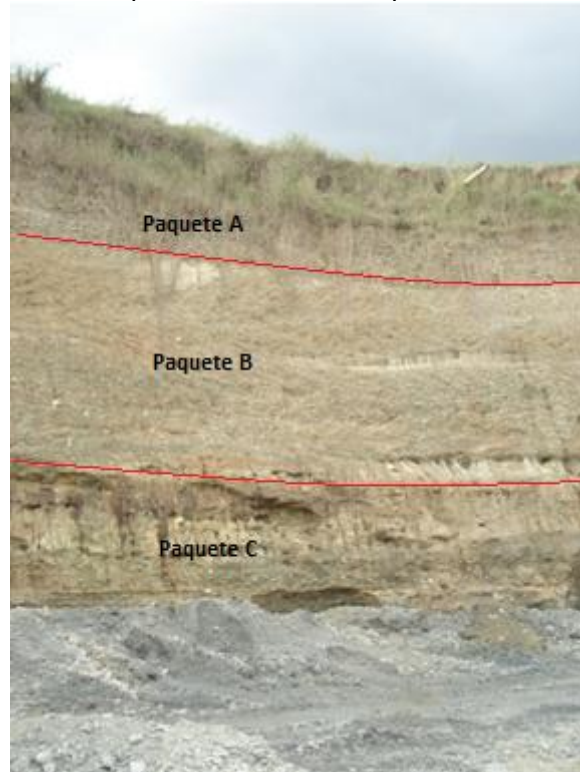
matriz arcillosa, lo cual estaría indicando la presencia de pendientes inicialmente empinadas debido al origen tectónico del valle.

La unidad litológica de interés la constituye el relleno aluvial de río Medellín, en el lote Las vegas, el depósito alcanza más de 60 m de espesor en un paleo cauce de dirección SW–NE ubicado un poco al sur del actual cauce del río, Se compone de: Paquete A: suelos con una capa semi-espesa de vegetación. Paquete B: Gravas en matriz arenosa en la parte superior. Paquete C: gravas en matriz areno–arcillosa, intercaladas con arena y arcillas en una proporción variable a lo largo del perfil.

Las gravas son gruesas con cantos hasta de 15 cm de diámetro compuestos principalmente de basaltos, cuarzodioritas, cuarzo, en menor proporción se observan neises y anfibolitas, tienen matriz arenosa a arcillosa. (Figura 36).

Las arenas muestran tamaños de granos que van desde arena muy fina hasta arena muy gruesa, la composición de los granos es 16% de cuarzo, 9% de plagioclasas y 75% de fragmentos de rocas. La arcilla se presenta en mayor proporción hacia la base del depósito, es plástica de color gris a café con espesores hasta de 7 m.

Figura 36. Perfil representativo de los depósitos en el sitio de explotación.



Fuente: Autor del proyecto

Geomorfológicamente el área forma parte del valle intramontano del río Medellín (Valle de Aburrá). Se distinguen esencialmente 3 unidades geomorfológicas, la primera es una zona plana características de la secuencia deposicional que constituye el relleno aluvial del Valle del río. La segunda unidad está caracterizada por pendientes de inclinación moderada a alta por las que corren los tributarios del río en este sector (Quebradas El Salado, El Indio, La Corea, Caimito, Maria Iguarúa, La Silvia, Casariegas y platanito). La tercera unidad la constituye las cimas ligeramente redondeadas que inundan el valle. En general los drenajes son típicamente dendríticos, densos desarrollados sobre rocas graníticas intrusivas (Batolito Antioqueño).



4.5 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CANTERA C

4.5.1 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, 500 revoluciones en seco

La realización de éste ensayo tiene como finalidad, determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados empleando la máquina de los ángeles. Los materiales después de ser desgastados al finalizar el ensayo, se lavan por el tamiz #12 y por diferencia de pesos con la cantidad de material cargado originalmente, se determina el porcentaje de desgaste de los materiales pétreos. El procedimiento a realizar es el común establecido por esta norma.

Gradación utilizada: B

$$\text{Desgaste del agregado} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5000 - 3960)}{(5000)} * 100 = 21 \%$$

4.5.2 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, Curva de desgaste cada 100 revoluciones

El objetivo principal de este ensayo es revisar la uniformidad de los materiales con respecto a su propiedad de dureza. Se hace con la Máquina de desgaste de los Ángeles basados en lo indicado en la nota 3 de esta norma. Se toma la masa de los agregados retenida en la malla #12 tras 100 revoluciones. Esto se repite hasta completar las 500 revoluciones. La cantidad de material en el tambor siempre debe ser la tomada inicialmente, es decir, los finos siempre deben ir adentro. Por diferencia de pesos se calcula el valor del Desgaste.

Gradación utilizada: B

$$\text{Desgaste del agregado}_{100 \text{ rev}} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5003 - 4802)}{(5003)} * 100 = 4 \%$$

$$\text{Desgaste del agregado}_{200 \text{ rev}} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5003 - 4569)}{(5003)} * 100 = 9 \%$$



$$\text{Desgaste del agregado}_{300 \text{ rev}} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5003 - 4365)}{(5003)} * 100 = 13 \%$$

$$\text{Desgaste del agregado}_{400 \text{ rev}} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5003 - 4173)}{(5003)} * 100 = 17 \%$$

$$\text{Desgaste del agregado}_{500 \text{ rev}} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5003 - 3979)}{(5003)} * 100 = 20 \%$$

4.5.3 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, Desgaste del árido después de 3 días saturado y superficialmente seco

En muchas ocasiones el material pétreo utilizado en mezclas asfálticas contiene un porcentaje de humedad debido a que proviene de río o se ha explotado de una cantera a campo abierto. Con este ensayo se pretende simular ese contenido de humedad que al ser absorbido por el agregado, en los poros superficiales, puede alterar la dureza o resistencia al impacto. Razón por la cual se han dejado sumergidos en agua, tres días, los agregados pétreos para luego ser ensayados en la Máquina de los Ángeles. Por diferencia de pesos se calcula el valor del Desgaste luego de ser tamizados por la malla #12.

Gradación utilizada: B

$$\text{Desgaste del agregado} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5000 - 4005)}{(5000)} * 100 = 20 \%$$

4.5.4 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, Desgaste del árido después de someterse a alta temperatura.

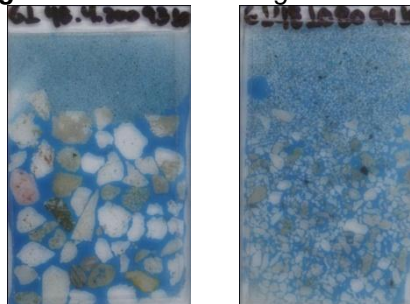
El ensayo de desgaste de los agregados en máquina de los Ángeles da una pista de la resistencia al impacto que los pétreos dan como respuesta durante la fabricación y colocación de la mezcla asfáltica. Esta prueba pretende involucrar la condición de temperatura de mezclado para resaltar el efecto producido con respecto a la condición normal de ensayo. Los agregados fueron calentados en un horno a 150°C durante 3 horas e inmediatamente se ensayaron. Se calcula el desgaste como el porcentaje de material retenido en la malla #12 después de 500 revoluciones, lavado y seco, con respecto al peso inicial.

Gradación utilizada: B

$$\text{Desgaste del agregado} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5001 - 4006)}{(5001)} * 100 = 20 \%$$

4.5.5 Análisis petrográfico de agregados

Figura 37. Secciones delgadas de la cantera C.



Sección G148.4.200-9310

Sección G148.10.80-9410

Fuente: Autor del proyecto



Constituyentes y composición

El tipo de roca predominante es de origen ígneo y corresponde principalmente a tobas con textura porfírica (fenocristales flotando en una matriz) las cuales están compuestas por fenocristales de plagioclasa flotando generalmente en una matriz algunas veces devitrificada. En menor proporción se reconocen otros agregados tanto ígneos como de otro origen, entre los que se destacan las andesitas, tonalitas y neiss hornblendítico. En la fracción más fina se concentran los minerales componentes de los agregados gruesos, abundando plagioclasas, hornblendas y cuarzos. En las tablas 22 y 23 se especifican los resultados obtenidos del conteo de partículas de la muestra.



Tabla 22. Cálculo de Resultados de Conteo de Partículas.

	PORCENTAJE INDIVIDUAL RETENIDO EN EL TAMIZ	COMPOSICIÓN DE FRACCIONES RETENIDAS EN LOS TAMICES						
		Porcentaje de Partículas						
		T-1/2"	T-3/8"	T-No 4	T-No 10	T-No 40	T-No 80	T-No 200
ORIGEN	Constituyentes							
ÍGNEO	Andesita (Con textura holohialina)	14.0	19.0	20.7	9.4	7.0	3.8	0.0
	Andesita (Con textura holocristalina)	4.4	3.8	4.7	3.8	2.3	1.9	0.0
	Toba	40.4	38.0	30.7	38.1	20.3	20.9	0.0
	Tonalita	16.9	13.9	19.3	20.6	14.8	7.6	0.0
	Granodiorita	0.7	3.8	0.7	2.5	7.0	1.9	0.0
SEDIMENTARIO	Dismicrita	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0
	Chert	0.0	0.0	0.0	0.6	0.8	0.0	0.0
METAMÓRFICO	Cuarcita	7.4	3.8	8.0	12.5	7.0	5.1	0.0
	Neiss	12.5	13.9	12.0	5.6	3.9	0.6	0.0
	Cataclasita	3.7	3.8	3.3	5.0	4.7	0.0	0.0
	Milonita	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0
	Esquisto	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	1.3	0.0
	Plagioclasa	0.0	0.0	0.7	0.0	8.6	23.4	23.2
	Feldespatos	0.0	0.0	0.0	0.0	6.3	3.8	2.8
	Cuarzo	0.0	0.0	0.0	0.0	14.8	17.1	23.2
	Esfena	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	2.8
	Biotita	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.6
	Epidota	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0
	Hornblenda	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.2	33.8
	Opacos	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	4.9
OTROS	Fragmento Alterado	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	1.9	3.5
TOTAL		100	100	100	100	100	100	100

Fuente: Autor del proyecto



Tabla 23. Composición de la muestra.

CONSTITUYENTES	Porcentaje de Partículas						
	T-1/2"	T-3/8"	T-No 4	T-No 10	T-No 40	T-No 80	T-No 200
ÍGNEOS	76.5	78.5	76.0	74.4	49.2	36.1	0.0
SEDIMENTARIOS	0.0	0.0	0.0	1.3	0.8	0.0	0.0
METAMÓRFICOS	23.5	21.5	23.3	23.8	17.2	7.0	0.0
MONOMINERALES	0.0	0.0	0.7	0.0	32.8	55.1	96.5
OTROS	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	1.9	3.5
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100

Fuente: Autor del proyecto

Porosidad y fracturación

En términos generales, la porosidad es de tipo primaria y secundaria. En el primer caso se produce naturalmente por el empaquetamiento de los granos, mientras que en el segundo se relaciona con el fenómeno de disolución. En este caso como se aprecia en la tabla 24. Los agregados con porosidad no superan el 30% de la muestra, siendo esta principalmente de tipo baja. La presencia de planos de fractura no es significativa (<0.5%).



Tabla 24. Porosidad

POROSIDAD SECUNDARIA	NIVELES DE LAS FRACCIONES ANALIZADAS				
	Porcentaje de Partículas				
	T-1/2"	T-3/8"	T-No 4	T-No 10	T-No 40
No visible	77.2	78.2	93.3	69.2	94.4
Baja	19.1	20.5	4.0	23.1	3.2
Alta	3.7	1.3	2.7	7.7	2.4
TOTAL	100	100	100	100	100

Fuente: Autor del proyecto

Alteración

La alteración hace referencia a la modificación sufrida en la composición o estructura interna de una roca situada en la superficie terrestre o en sus proximidades, debido a la acción de agentes atmosféricos.

Para los agregados de tamices $\frac{3}{4}$ " a No 4, el grado de alteración se determinó con base en la modificación superficial del color natural. El agregado que conserva el color de la roca origen sin presencia de manchas, se considera no alterado; de lo contrario, si se observan manchas o alteraciones de color, se agrupan y se diferencian en tres niveles cualitativos:

- Leve: presencia de manchas de coloraciones muy tenues o coloraciones más fuertes que se extienden sobre un área pequeña de la superficie del agregado.
- Moderada: presencia de manchas de coloraciones notorias tanto en tonalidad como en extensión.
- Severa: presencia de manchas con coloraciones fuertes que abarcan una extensión importante de la superficie del agregado.



A nivel microscópico los procesos de meteorización química actúan siempre en la superficie de los minerales y la intensidad de la reacción depende directamente de la superficie específica y del grado de fragmentación mecánica previa que tenga el material. Es así como el ataque a los minerales primarios puede ser seguido por una redistribución atómica en la red cristalina remanente, lo que conduce a un nuevo mineral más estable (en ese ambiente) que el anterior. El resultado de las acciones de meteorización es la formación de minerales de arcilla (Besoain, 1985).

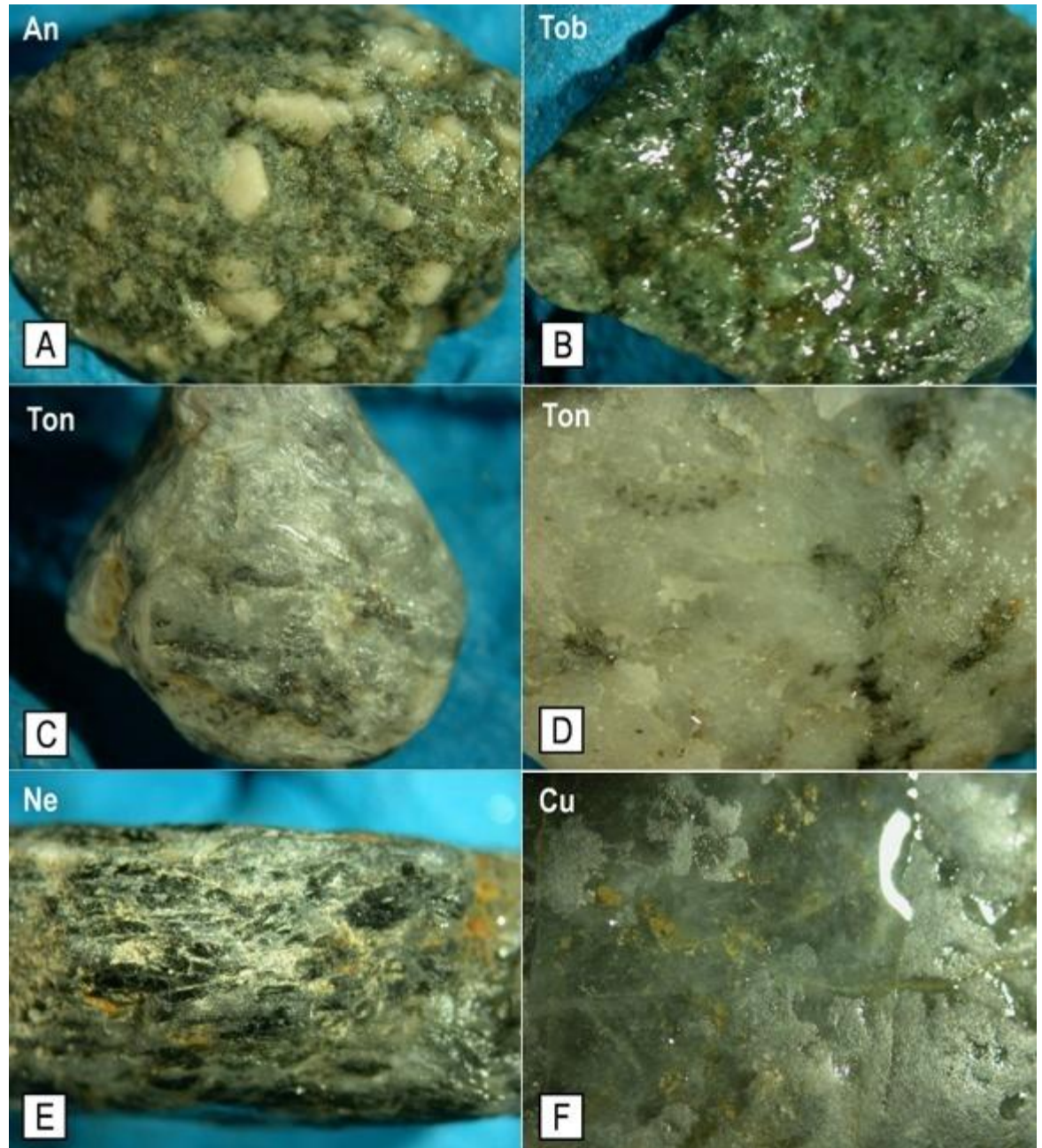
El grado de meteorización se determinó teniendo en cuenta principalmente los niveles de sericitización de las plagioclasas; y el contenido de sílice amorfa manifestada en la devitrificación de la matriz, la presencia de vidrio volcánico y el contenido de calcedonia, no obstante, también se tuvo en cuenta otros tipos de alteración tales como oxidación, aunque esta se presentó de manera muy esporádica.

Tabla 25. Alteración del material.

ALTERACIÓN	NIVELES DE LAS FRACCIONES ANALIZADAS		
	Porcentaje de Partículas		
	Tamices ¾" a No 4	Tamices No 10 a P200	
		Arena gruesa	Arena fina
Sin alteración	14.8	3.8	58.7
Leve	76.5	72.2	24.7
Moderada	6.4	21.8	11.3
Severa	2.3	2.3	5.3
TOTAL	100	100	100

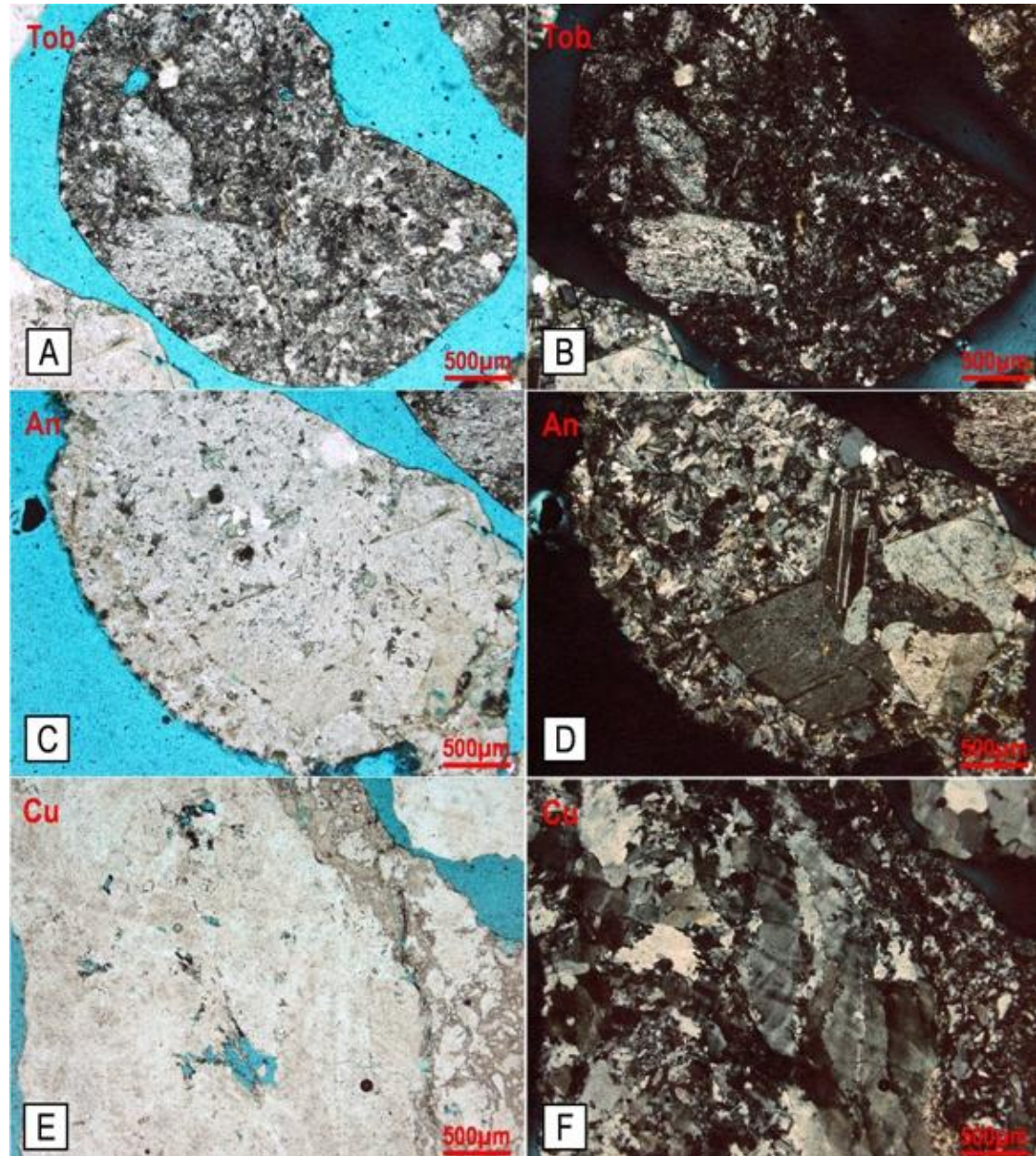
Fuente: Autor del proyecto

Figura 38: Microfotografías de agregados bajo el estereo microscopio del tamiz #4. Mostrando A. Andesita (An), B.Toba (Tob), C.Tonalitas(Ton), E.neiss (Ne), F.cuarcita (Cu).



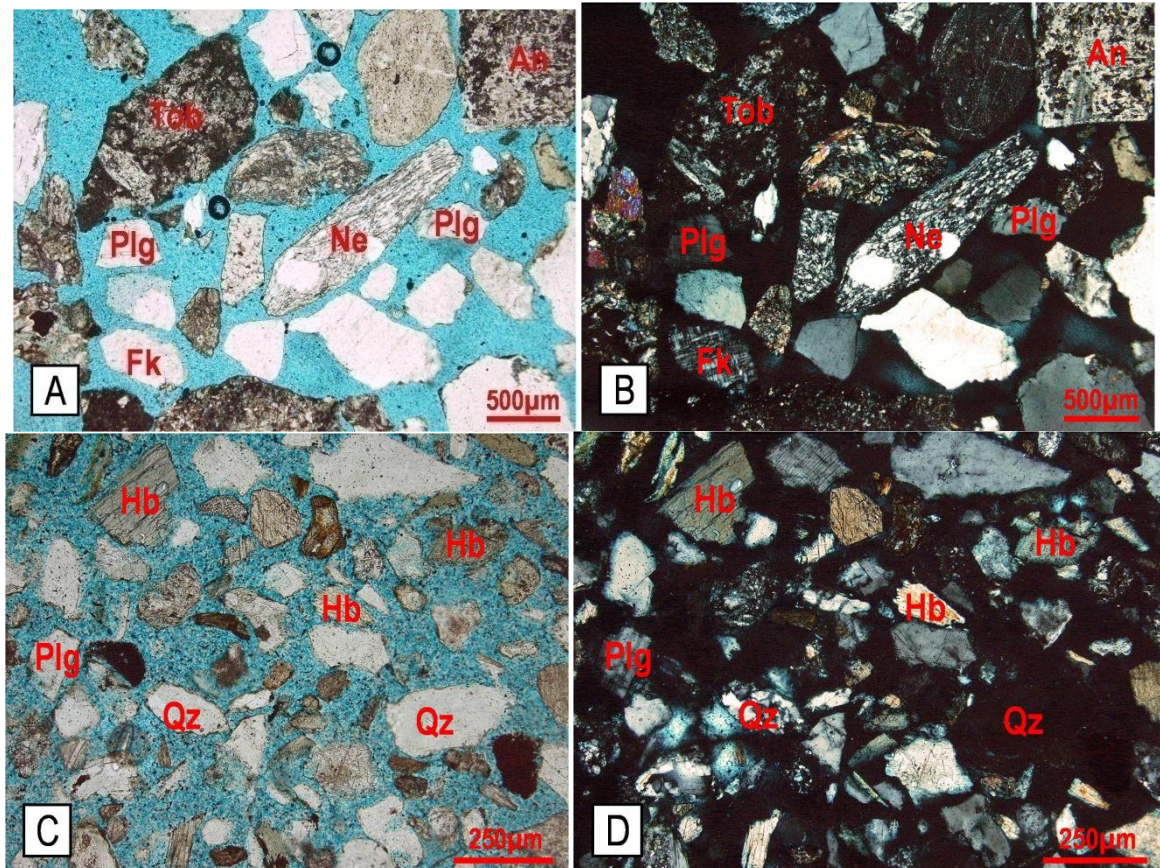
Fuente: Autor del proyecto

Figura 39: microfotografías de agregados del tamiz #10, bajo el microscopio petrográfico mostrando: Toba (Tob) con textura holoialina y fenocristal de plagioclasa (plg), moderadamente alterada a sericita, en cuatro aumentos vista con nicols paralelos y nicols cruzados respectivamente. (AyB). Andesita (An), hipocristalina con matriz microlítica y fenocristal de plagioclasa(plg).en 4 aumentos vista con nicols paralelos y cruzados respectivamente. (CyD).Cuarcita, en 4 aumentos visto con nicols paralelos y nicols cruzados, respectivamente (E y F).



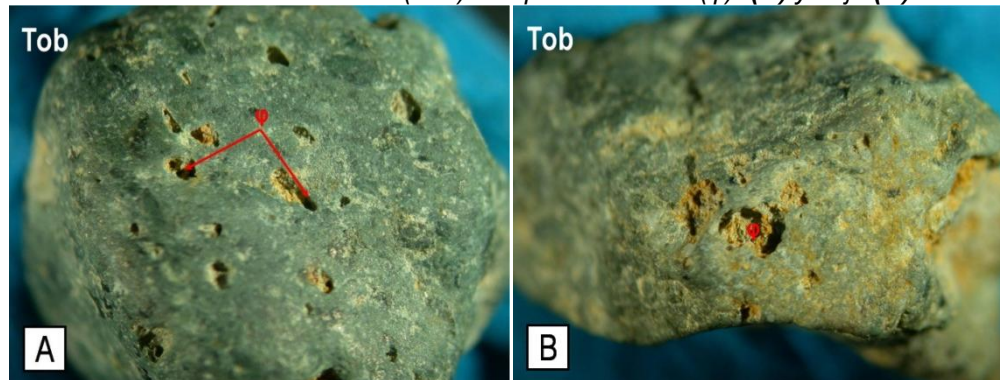
Fuente: Autor del proyecto

Figura 40. Microfotografías de agregados bajo el microscopio petrográfico mostrando: Agregados del tamiz No 40 en 4 aumentos, entre los cuales se resaltan algunas tobas (Tob), neises (Ne), plagioclasas (Plg) y feldespato potásico (Fk), entre otros, vistos con nicols paralelos y nicols cruzados, respectivamente (**A y B**) Agregados del tamiz No 200, en 10 aumentos, entre los cuales se resaltan hornblendas (Hb), plagioclasas (Plg) y cuarzo (Qz), entre otros, vistos con nicols paralelos y nicols cruzados, respectivamente (**C y D**).



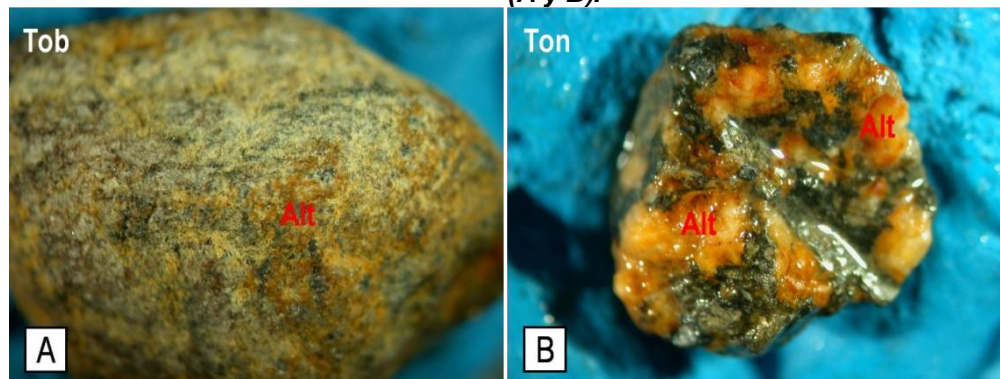
Fuente: Autor del proyecto

Figura 41. Microfotografías de agregados del tamiz No 4 bajo el estéreo microscopio mostrando tobas (Tob) con porosidad alta (ϕ). (A) y baja (B)



Fuente: Autor del proyecto

Figura 42. Microfotografías de agregados del tamiz No 4 alterados bajo el estéreo microscopio, mostrando: una Toba (Tob) y una tonalita (Ton) con alteración moderada (Alt) (A y B).



Fuente: Autor del proyecto

Figura 43. Microfotografías de agregados del tamiz No 4 bajo el microscopio petrográfico mostrando: Alteración severa de un toba (Tob) con vidrio (Vid) volcánico, visto con nicols paralelos y nicols cruzados, respectivamente (A y B).

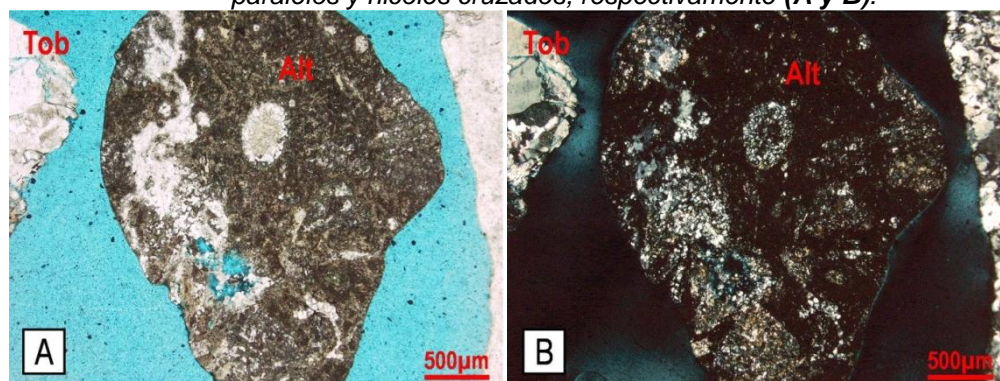




Tabla 25^a. Contenido teórico de SiO₂ en las muestras

Tipo de roca/mineral	Chert /Cuarcita/Cuarzo/Vidrio	Toba	Granodiorita/Cataclasita/Milonita	Plagioclasa	Tonalita/Feldespatopotasico	Esquisto/ Neiss/ Andesita (con textura hollalina)	Andesita (con textura holocristalina)/ Hornblenda	Biotita	Epidota/Esfena	Opaco/ Fragmento alterado/ Dismicrita
Contenido de SiO ₂	100%	90%	69%	67%	66%	59%	51%	41%	35%	0%
	> Grado de acidez <									
	Acido					Básico				
Porcentaje de partículas en las muestras	15.32	<u>26.02</u>	5.14	8.60	15.22	16.79	9.34	0.84	0.84	1.89

Fuente: Kumar (2004)

Según lo anterior la mayoría del material está compuesto por rocas de composición intermedia a félsica, en la muestra cerca del 70% corresponde a material con PH ácido a intermedio. Se hace necesario el uso de aditivos para no afectar la adherencia de los agregados con el asfalto. Kumar (2004).

4.5.6 Difracción de rayos X

En la siguiente tabla se describe la semi-cuantificación de los componentes por altura del pico (intensidad) teniendo en cuenta los picos más intensos de cada mineral presente; obtenida mediante el análisis de difracción de rayos-X (DRX). Los datos se derivan de los correspondientes Difractogramas:



Tabla 26. Datos extraídos de los Difractogramas

CONSTITUYENTE	MÉTODO DEL POLVO (a)	MINERALOGÍA DE ARCILLAS (b)
Cloritas	<5%	≈17%
Micas		≈9%
Caolinita	≈5%	≈31%
Anfíboles	≈27%	≈18%
Cuarzo	≈40%	
Feldespatos	≈25%	
Interestratificados*		<5%
Sin identificar**/		≈23%
Total	≈ 100 %	≈ 100 %

Fuente: Autor del proyecto

De acuerdo con los resultados anteriores, se observa que hay un predominio de minerales de tipo no filosilicato como cuarzo, anfíboles y feldespatos (61.7%), seguido por la presencia de minerales arcillosos o filosilicatos, entre los que se destaca la caolinita y la clorita (38.3%). En la siguiente tabla se especifica la mineralogía global de la muestra.

⁷ *Interestratificados: Resultado de meteorización química de las micas; pueden ser tipo clorita-esmectita

**Sin identificar: Posiblemente corresponde a un Hidróxido o mineral que se destruye cuando se calientan a 550°C.

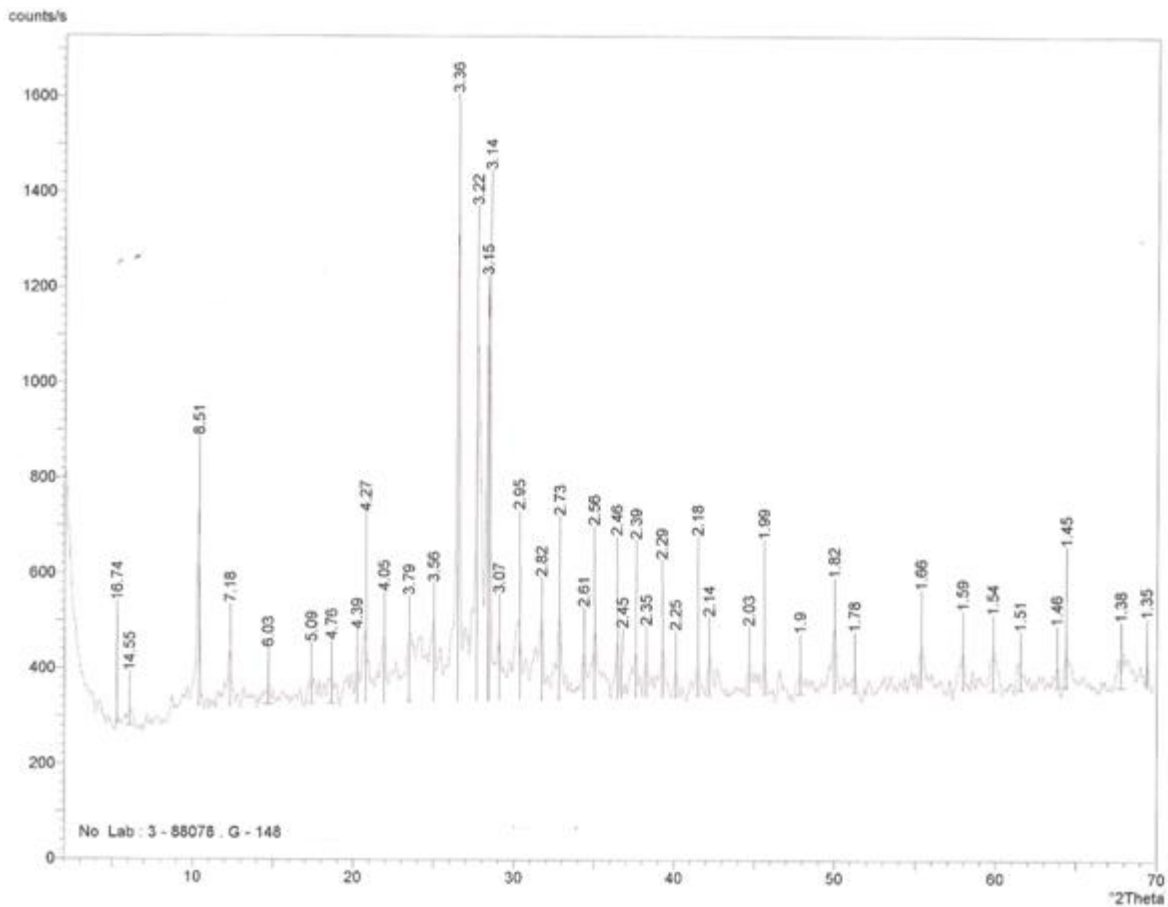


Tabla 27. Mineralogía global de la muestra

CONSTITUYENTE	PORCENTAJE APROXIMADO (%)
Cloritas	11.4
Micas	6.0
Caolinita	20.8
Anfíboles	18.1
Cuarzo	26.8
Feldespatos	16.8
Total	100

Fuente: Autor del proyecto

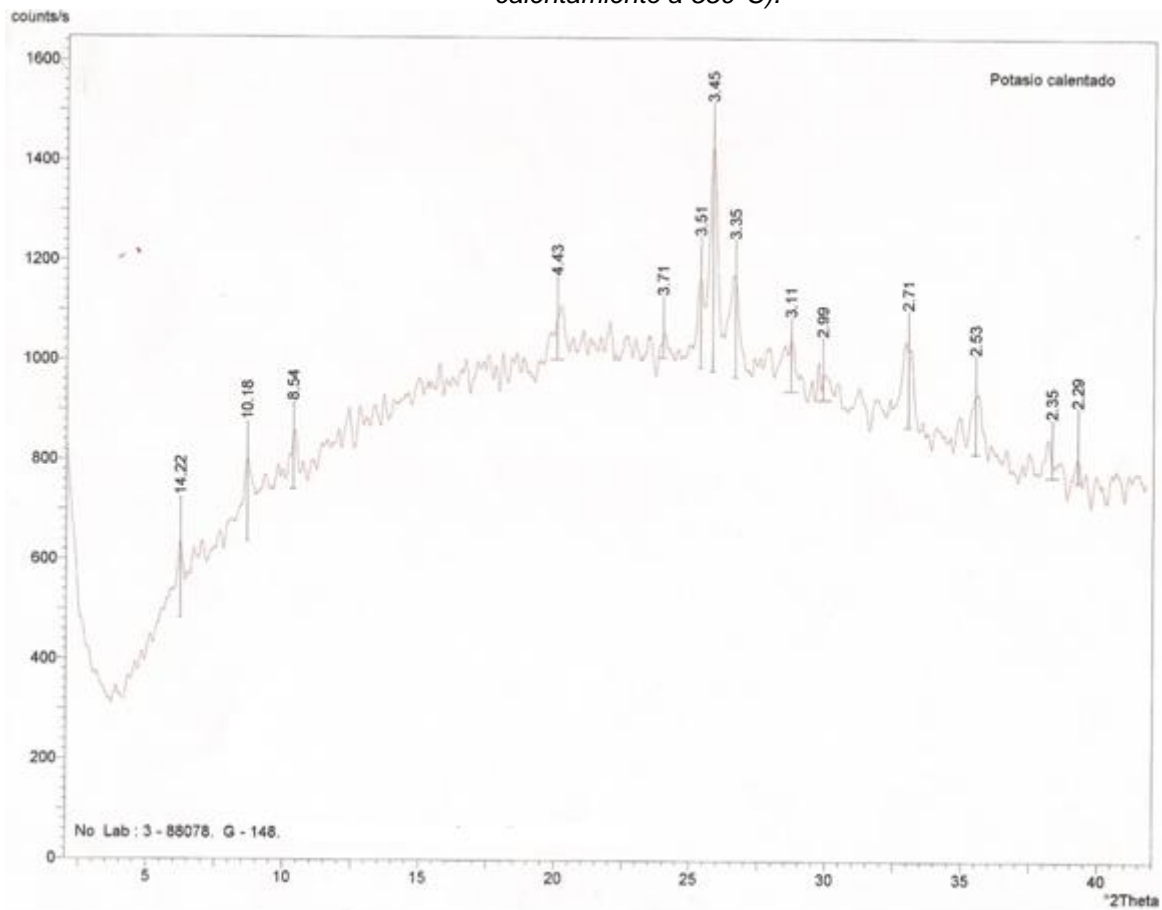
Figura 44: Difractograma obtenido en el análisis de la muestra total por DRX (método del polvo)



Fuente: Autor del proyecto



Figura 45: Difractograma obtenido en el análisis de arcillas por rayos x (tratamiento K y calentamiento a 550°C).



Fuente: Autor del proyecto



4.5.7 Fluorescencia de rayos X

Los resultados obtenidos en forma de compuestos y de elementos, se describen a continuación:

Tabla 28. Resultados FRX muestra.

CONSTITUYENTE	% EN PESO
SiO ₂	51.675
Al ₂ O ₃	15.952
Fe ₂ O ₃	11.952
CaO	8.008
MgO	4.752
Na ₂ O	2.536
K ₂ O	1.069
TiO ₂	1.803
P ₂ O ₅	0.260
MnO	0.199
Cl	0.032
Cr	0.046
Ba	0.037
V	0.042
Sr	0.025
Zr	0.055
Ni	0.011
Zn	0.014
Rb	0.004
S	1.529
Y	0.005
As	0.003
Ce	0.003
Totales	100

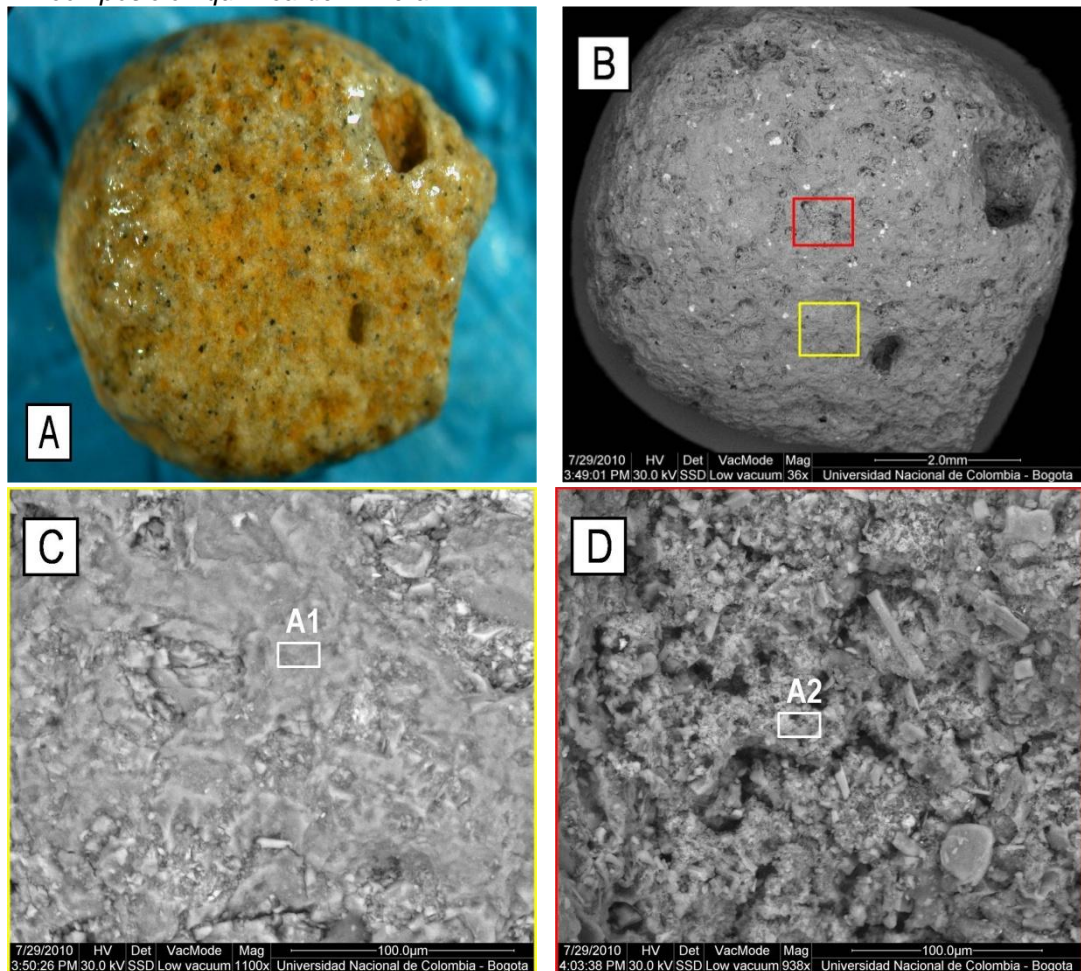
Fuente: Autor del proyecto

4.5.8 Microscopía electrónica, SEM

Fracción gruesa del agregado

En las siguientes imágenes se observa el análisis de la primera partícula tamaño grava, destacándose la textura y la composición de las zonas estudiadas:

Figura 46. Microfotografías mostrando: **A.** Microfotografía del primer agregado tipo toba bajo el estéreo microscopio. Se destaca presencia de poros y en la muestra, además de minerales oxidados de color naranja, entre otros **B.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Se destaca la textura de los poros en la muestra, además los sectores analizados con la microsonda de rayos X, en un sector de la matriz (recuadro amarillo) y en un cristal (recuadro rojo) **C:** Detalle del sector de la matriz analizado. **A1** representa el análisis areal para la determinación de la composición química de la matriz. **D.** Detalle del mineral analizado **A2** análisis areal para composición química del mineral.



Fuente: Autor del proyecto

La tabla No 29 registra la concentración (% en peso) de los elementos presentes en los sectores analizados.

Tabla 29. Composición química.

PUNTO	O%	Al%	Si%	K%	Ca%	Fe%	Ti%	S%
A1	31.71	8.84	34.35	6.88	8	10.21		
A2	21.42	7.78	20.36	3.25	4.99	37.48	1.6	3.13

Fuente: Autor del proyecto

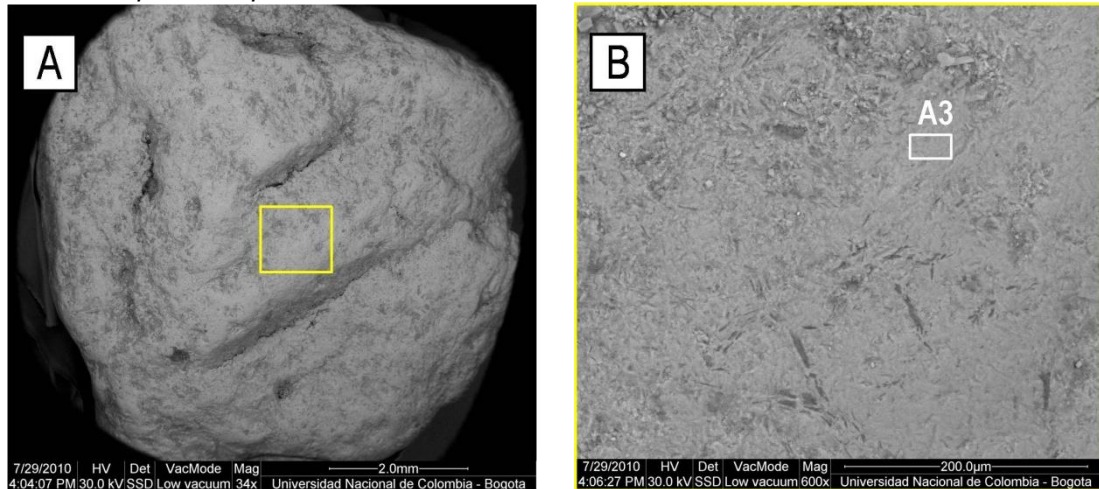
En las siguientes imágenes se observa el análisis de la segunda partícula tamaño grava, destacándose la textura y la composición de las zonas estudiadas.

Figura 47. Microfotografía del segundo agregado tipo toba bajo el estéreo microscopio. Se destaca el grado de severo de alteración de la muestra.



Fuente: Autor del proyecto

Figura 48. Microfotografías mostrando: **A.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Se destaca la textura superficial de la muestra y la zona analizada (recuadro amarillo) con la microsonda de rayos X. **B.** Detalle del sector de la matriz analizado. **A3** representa el análisis areal para la determinación de la composición química.



Fuente: Autor del proyecto

La tabla No 30 registra la concentración (% en peso) de los elementos presentes en el sector analizado.

Tabla 30. Composición química.

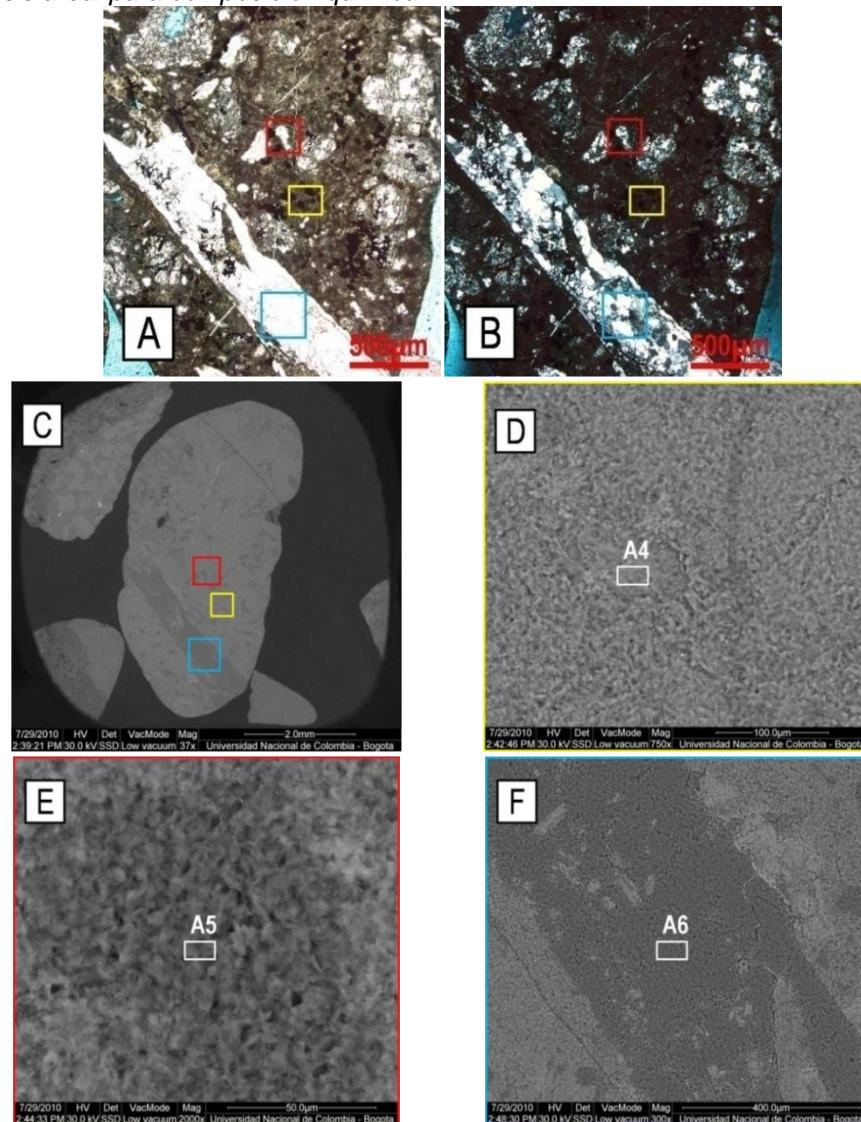
PUNTO	O%	Al%	Si%	Ca%	Fe%	S%	Mn%
A3	9.54	1.39	3.66	1.83	78.5	1.28	3.8

Fuente: Autor del proyecto

Fracción fina del agregado

En las siguientes imágenes se observa el análisis de la primera partícula tamaño arena, destacándose la localización, el color, la textura y la composición de las zonas estudiadas:

Figura 49. Microfotografías mostrando: **A.** Fotografía a través del microscopio de luz polarizada en el cual se observa un fragmento de toba con vidrio volcánico en su matriz, resaltándose su alteración severa (tonos marrones), además se indica los sitios de análisis (recuadros amarillo, rojo y azul) relacionados con la alteración de la matriz y de los minerales, vistos en nicoles paralelos. **B.** La misma imagen anterior, pero con nicoles cruzados. **C.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Se destaca los sectores de análisis con la microsonda de rayos X. **D.** Detalle del sector de la matriz analizado. A4 representa el análisis areal para la determinación de la composición química. **E.** Detalle de un mineral analizado. A5 análisis areal para composición química. **F.** Detalle de una vena mineralizada analizada. A6 análisis areal para composición química.



Fuente: Autor del proyecto

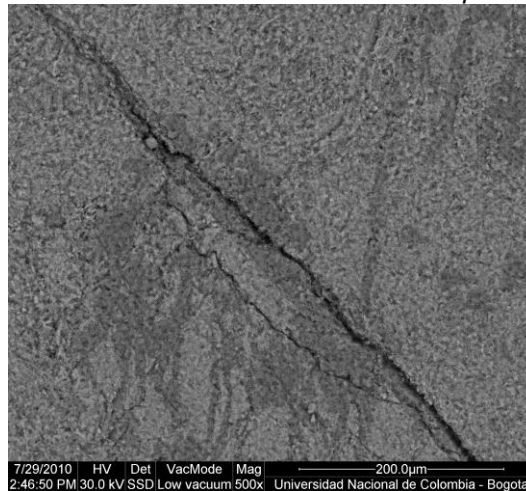
La tabla No 31 registra la concentración (% en peso) de los elementos presentes en los sectores analizados.

Tabla 31. Composición química.

PUNTO	O%	Al%	Si%	Ca%	Fe%	Mg%	Ti%
A4	24.48	8.8	21.32	19.91	22.89	1.45	1.15
A5	30.86	1.87	56.57	4.36	6.35		
A6	34.91		62.43	2.66			

La siguiente imagen muestra la microfracturación del agregado analizado.

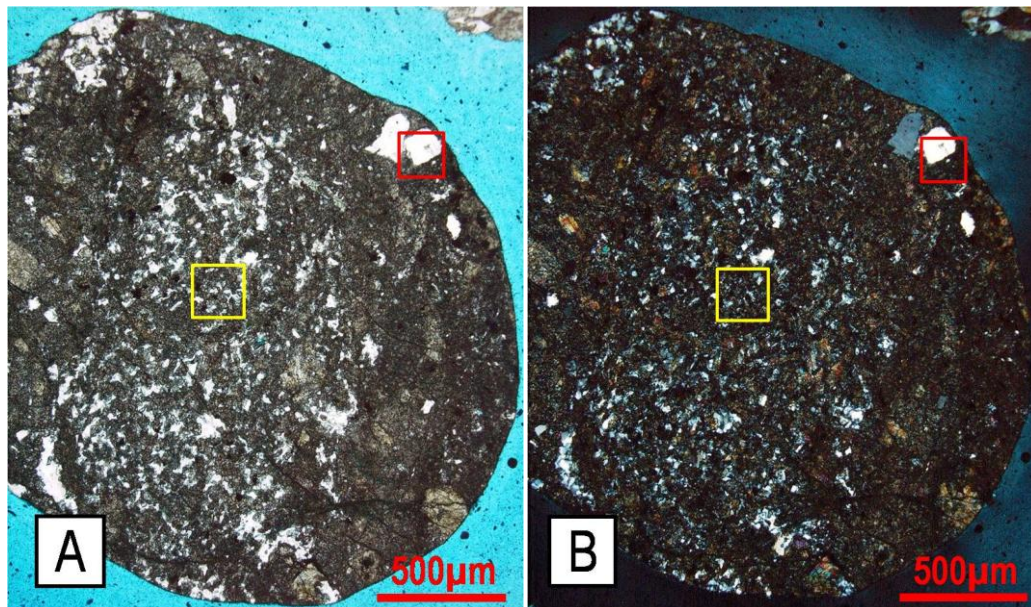
Figura 50. Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Se destaca la microfracturas presente en la muestra.



Fuente: Autor del proyecto

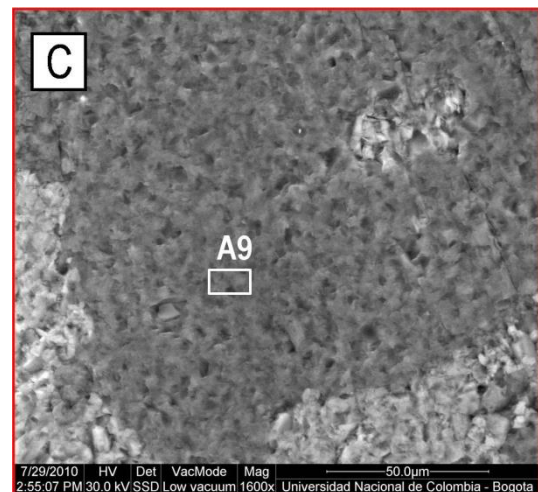
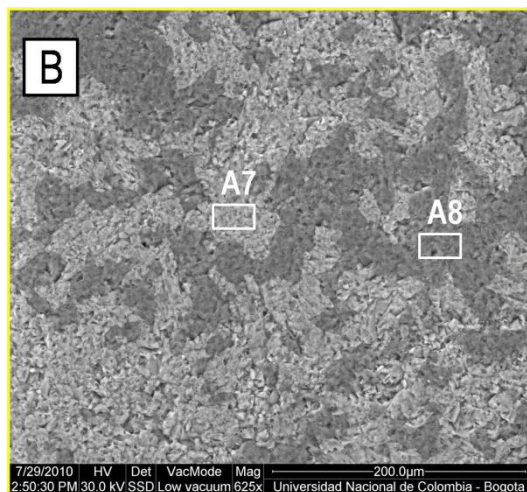
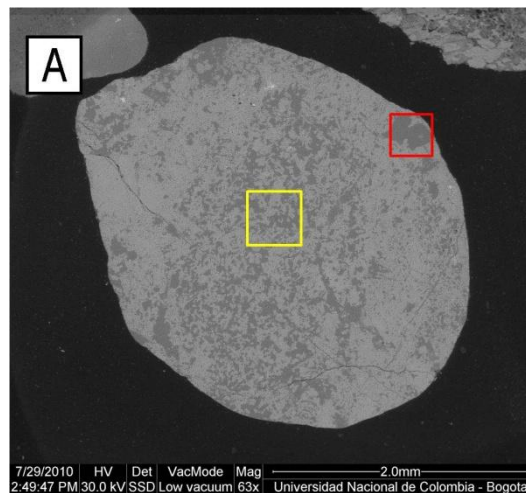
En las siguientes imágenes se observa el análisis de la segunda partícula tamaño arena, destacándose la localización, el color, la textura y la composición de las zonas estudiadas:

Figura 51. Microfotografías mostrando: **A.** Fotografía a través del microscopio de luz polarizada en el cual se observa un fragmento de toba con vidrio volcánico en su matriz, resaltándose su alteración moderada a severa (tonos marrones), y fenocristales de plagioclasa, se indica los sitios de análisis (recuadros amarillo y rojo) relacionados con los fenocristales presentes en el agregado y la alteración de la matriz, vistos en nicoles paralelos. **B.** La misma imagen anterior, pero con nicoles cruzados.



Fuente: Autor del proyecto

Figura 52. Microfotografías mostrando: **A.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Se destaca los sectores de análisis con la microsonda de rayos X. **B.** Detalle del sector de la matriz analizado. A7 y A8 representa los análisis areales para la determinación de la composición química. **C.** Detalle de un mineral analizado. A9 análisis areal para composición química.



Fuente: Autor del proyecto



La tabla No 32 registra la concentración (% en peso) de los elementos presentes en los sectores analizados.

Tabla 32. Composición química.

PUNTO	O%	Al%	Si%	Ca%	Fe%
A7	23.38	9.13	21.21	28.85	17.43
A8	33.56		56.77	5.5	4.17
A9	33.45		58.88	4.17	3.5

Fuente: Autor del proyecto

4.6 GENERALIDADES CANTERA D

4.6.1 Geología

La roca de interés es un Gabro que se dispone en franjas alargadas con dirección NW en los municipios de Medellín, El Retiro, Santa Elena, Barbosa, Bello, Copacabana y Envigado. Son rocas foliadas, esquistosas, y con evidencias de deformación (Correa y Martens, 2000). En la literatura se conocen como Anfibolitas de Medellín (Pam), se observan en la figura 53.

Figura 53. Fragmentos de roca con textura gnéisica en la fuente de materiales



Fuente: Autor del proyecto

La geomorfología de la zona Corresponde a la disección de depósitos de vertiente con filos estrechos, de tope agudo a ligeramente convexos y alargados sobre todo en dirección perpendicular al río Medellín. La vertientes asociadas son de ángulo fuerte (mayor de 30° y rectilíneas). El grado de incisión de las corrientes es moderado a bajo. El proyecto se ubica en la unidad geomorfológica denominada de Cuchillas (Ch).



4.6.2 Tectónica

La falla el Salto presenta una fuerte expresión morfológica, formando escarpes con pendientes muy pronunciadas (cuchillas Ancón Norte y Contador) y Valles profundos desarrollados en los lineamientos de las quebradas y puede afectar la zona distal en donde se encuentra la fuente de materiales de la empresa.



4.7 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CANTERA D

4.7.1 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, 500 revoluciones en seco

La realización de éste ensayo tiene como finalidad, determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados empleando la máquina de los ángeles. Los materiales después de ser desgastados al finalizar el ensayo, se lavan por el tamiz #12 y por diferencia de pesos con la cantidad de material cargado originalmente, se determina el porcentaje de desgaste de los materiales pétreos. El procedimiento a realizar es el común establecido por esta norma.

Gradación utilizada: B

$$\text{Desgaste del agregado} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5000 - 4204)}{(5000)} * 100 = 16 \%$$

4.7.2 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, Curva de desgaste cada 100 revoluciones

El objetivo principal de este ensayo es revisar la uniformidad de los materiales con respecto a su propiedad de dureza. Se hace con la Máquina de desgaste de los Ángeles basados en lo indicado en la nota 3 de esta norma. Se toma la masa de los agregados retenida en la malla #12 tras 100 revoluciones. Esto se repite hasta completar las 500 revoluciones. La cantidad de material en el tambor siempre debe ser la tomada inicialmente, es decir, los finos siempre deben ir adentro. Por diferencia de pesos se calcula el valor del Desgaste.

Gradación utilizada: B

$$\text{Desgaste del agregado}_{100 \text{ rev}} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5006 - 4717)}{(5006)} * 100 = 6 \%$$



$$\text{Desgaste del agregado}_{200 \text{ rev}} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5006 - 4453)}{(5006)} * 100 = 11 \%$$

$$\text{Desgaste del agregado}_{300 \text{ rev}} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5006 - 4302)}{(5006)} * 100 = 14 \%$$

$$\text{Desgaste del agregado}_{400 \text{ rev}} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5006 - 4084)}{(5006)} * 100 = 18 \%$$

$$\text{Desgaste del agregado}_{500 \text{ rev}} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5006 - 3871)}{(5006)} * 100 = 23 \%$$

4.7.3 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, Desgaste del árido después de 3 días saturado y superficialmente seco

En muchas ocasiones el material pétreo utilizado en mezclas asfálticas contiene un porcentaje de humedad debido a que proviene de río o se ha explotado de una cantera a campo abierto. Con este ensayo se pretende simular ese contenido de humedad que al ser absorbido por el agregado, en los poros superficiales, puede alterar la dureza o resistencia al impacto. Razón por la cual se han dejado sumergidos en agua, tres días, los agregados pétreos para luego ser ensayados en la Máquina de los Ángeles. Por diferencia de pesos se calcula el valor del Desgaste luego de ser tamizados por la malla #12.

Gradación utilizada: B

$$\text{Desgaste del agregado} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5000 - 4110)}{(5000)} * 100 = 18 \%$$



4.7.4 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menor de 37,5 mm utilizando la Máquina de los Ángeles, Desgaste del árido después de someterse a alta temperatura

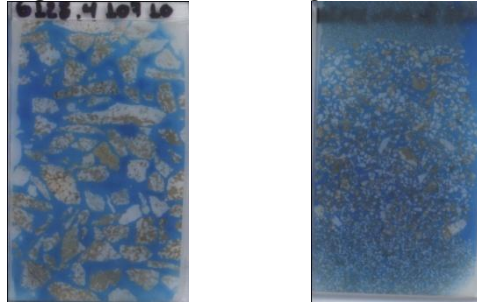
El ensayo de desgaste de los agregados en máquina de los Ángeles da una pista de la resistencia al impacto que los pétreos dan como respuesta durante la fabricación y colocación de la mezcla asfáltica. Esta prueba pretende involucrar la condición de temperatura de mezclado para resaltar el efecto producido con respecto a la condición normal de ensayo. Los agregados fueron calentados en un horno a 150°C durante 3 horas e inmediatamente se ensayaron. Se calcula el desgaste como el porcentaje de material retenido en la malla #12 después de 500 revoluciones, lavado y seco, con respecto al peso inicial.

Gradación utilizada: B

$$\text{Desgaste del agregado} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}})}{M_{\text{inicial}}} * 100 = \frac{(5002 - 4206)}{(5002)} * 100 = 16 \%$$

4.7.5 Análisis petrográfico

Figura 54. Secciones delgadas de la cantera D.



Sección G128.4-10710

Sección G128.80.10.40-10810

Fuente: Autor del proyecto

Constituyentes y composición

El tipo de roca predominante es de origen ígneo y corresponde principalmente a gabros con textura fanerítica (cristales bien formados de tamaño homogéneo) en cuya composición abundan las plagioclasas y en menor porcentaje hornblendas y mica biotita. Las otras rocas identificadas son de origen metamórfico y corresponde principalmente a neis hornblendico compuestos, entre otros. En la fracción más fina se concentran los minerales componentes de los gabros, abundando plagioclasas y hornblendas.

En las tabla 33 y 34 se especifican los resultados obtenidos del conteo de partículas de la muestra



Tabla 33. Cálculo de Resultados de Conteo de Partículas.

ORIGEN	PORCENTAJE INDIVIDUAL RETENIDO EN EL TAMIZ	COMPOSICIÓN DE FRACCIONES RETENIDAS EN LOS TAMICES						
		Porcentaje de Partículas						
		T-1/2"	T-3/8"	T-No 4	T-No 10	T-No 40	T-No 80	T-No 200
IGNEO	Gabro	65.4	73.1	69.3	72.9	45.5	13.6	0.0
	Tonalita	2.9	6.0	8.0	9.4	6.1	0.0	0.0
METAMÓRFICO	Neiss	25.0	13.7	13.3	10.6	6.8	0.6	0.0
	Esquisto	6.7	4.9	6.0	5.9	6.1	0.0	0.0
MONOMINERALES	Plagioclasa	0.0	2.2	3.3	1.2	9.8	42.6	47.3
	Cuarzo	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.6	0.0
	Hornblenda	0.0	0.0	0.0	0.0	9.1	24.9	32.7
	Biotita	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	12.4	12.0
	Piroxeno	0.0	0.0	0.0	0.0	8.3	3.0	2.7
	Feldespatos	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	1.8	2.0
	Muscovita	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0
	Opacos	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	3.3
TOTAL		100	100	100	100	100	100	100

Fuente: Autor del proyecto

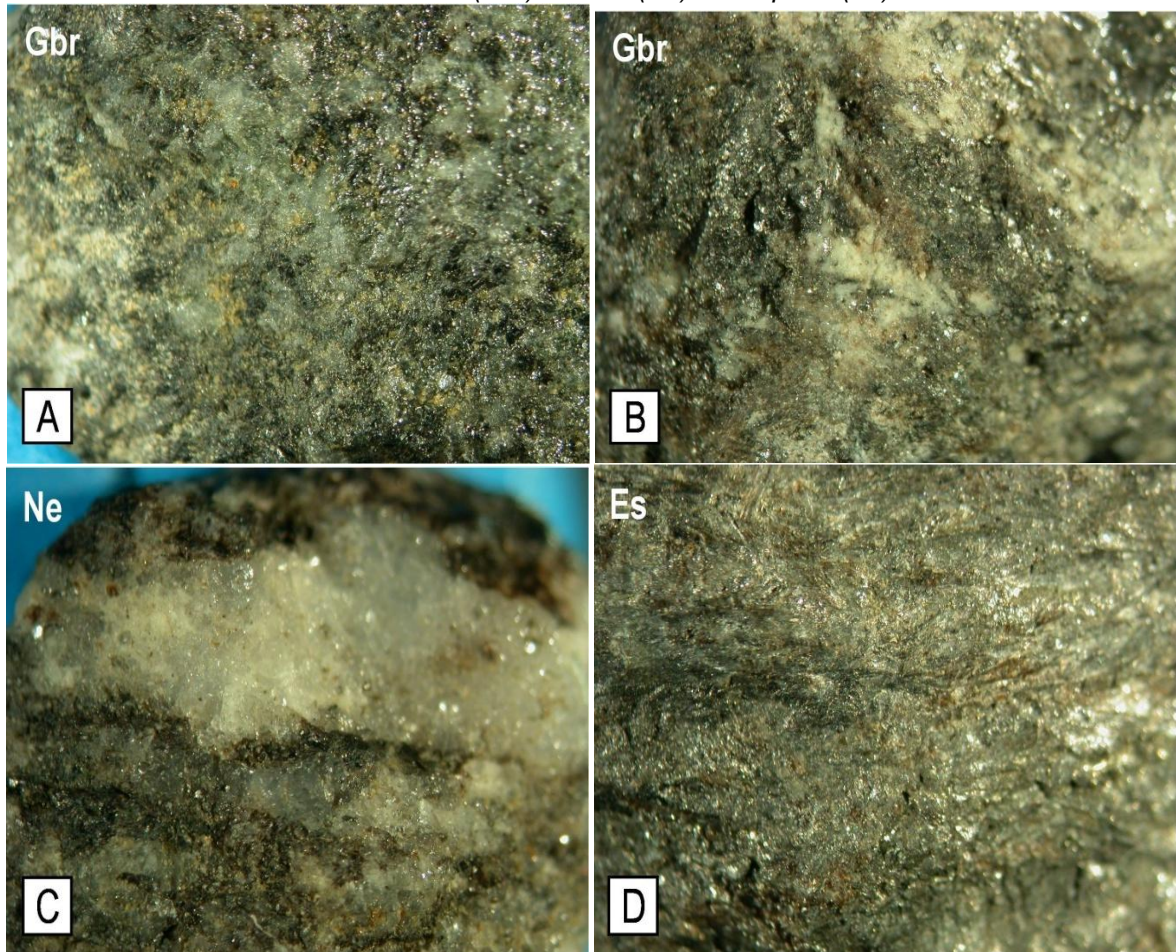


Tabla 34. Composición de la muestra.

CONSTITUYENTES	Porcentaje de Partículas						
	T-1/2"	T-3/8"	T-No 4	T-No 10	T-No 40	T-No 80	T-No 200
ÍGNEOS	68.3	79.1	77.3	82.4	51.5	13.6	0.0
SEDIMENTARIOS	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
METAMÓRFICOS	31.7	18.7	19.3	16.5	12.9	0.6	0.0
MONOMINERALES	0.0	2.2	3.3	1.2	35.6	85.8	100.0
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100

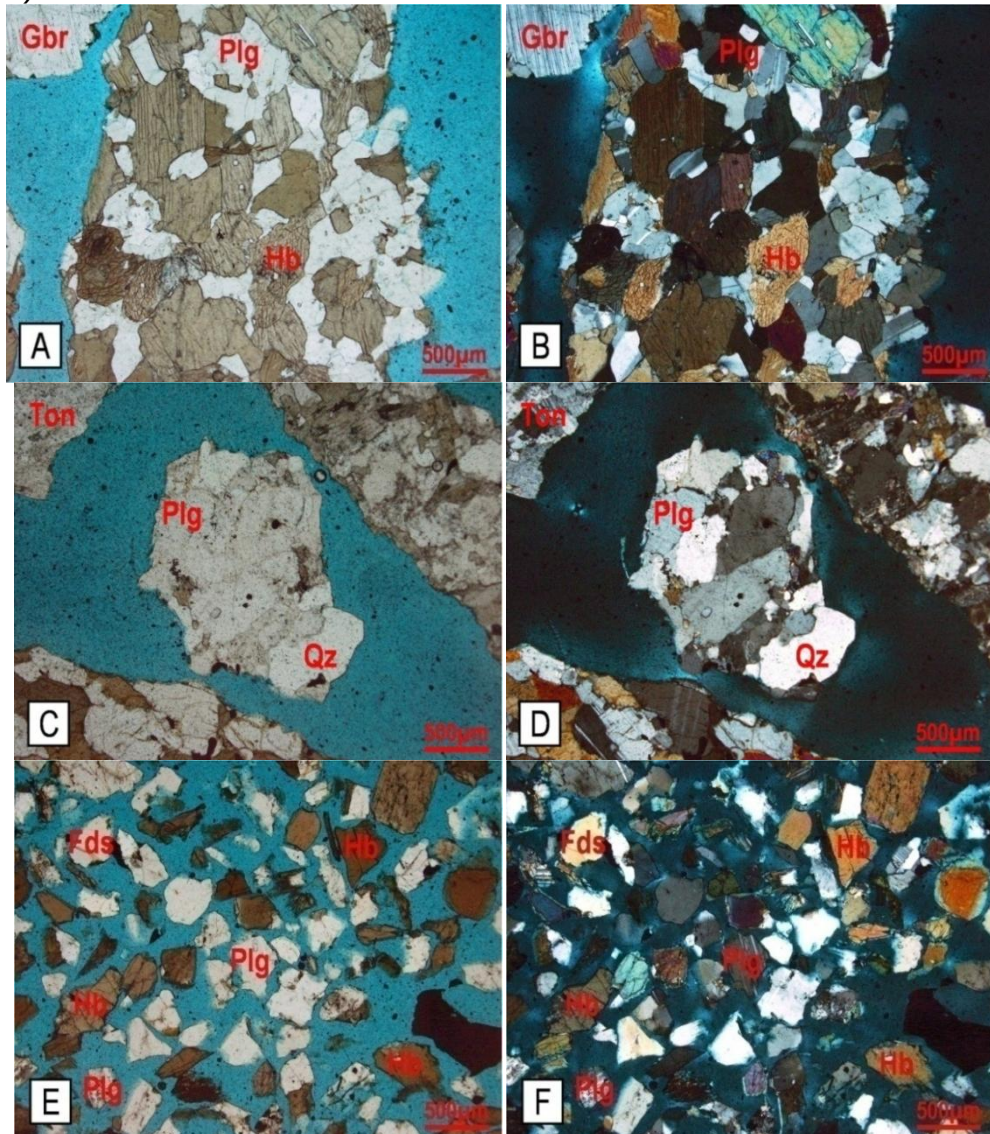
Fuente: Autor del proyecto

Figura 55. Microfotografías de agregados bajo el estéreo microscopio, mostrando **A-B.** Gabros (Gbr) **C.** Neis (Ne)-**D.** Esquisto (Es).



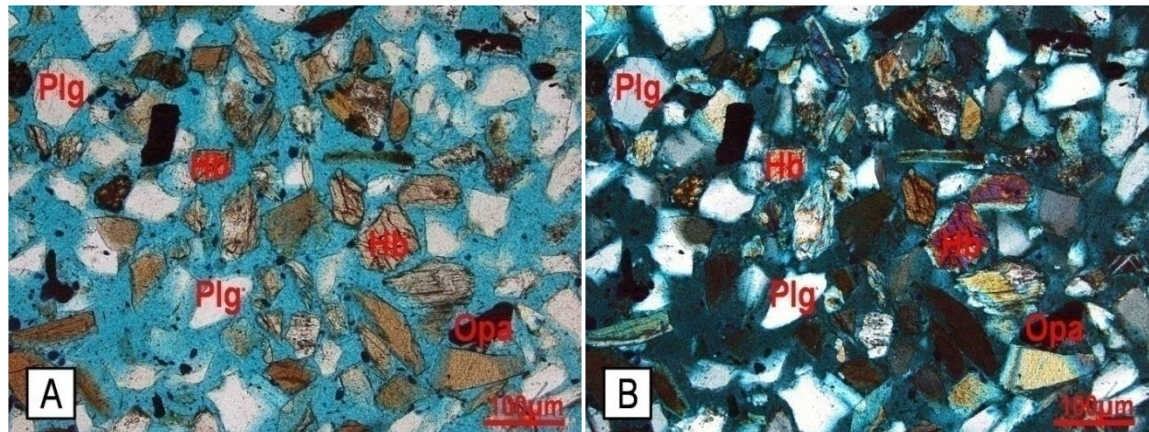
Fuente: Autor del proyecto

Figura 56. Microfotografías de agregados del tamiz No 10 bajo el microscopio petrográfico mostrando Gabro (Gbr) con cristales de plagioclasa (Plg) y hornblenda (Hb), del tamiz No 10 en 4 aumentos, vistas con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (A y B). Tonalita (Ton) con cristales de plagioclasa (Plg) y cuarzo (Qz) del tamiz No 10 en 4 aumentos, vistas con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (C y D). Agregados del tamiz No 80 en 4 aumentos, entre los cuales se resalta la plagioclasa (Plg) y la hornblenda (Hb), vistos con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (E y F).



Fuente: Autor del proyecto

Figura 57. Microfotografías de agregados bajo el microscopio petrográfico mostrando: Agregados del tamiz No 200, en 10 aumentos, entre los cuales se resaltan hornblendas (Hb), plagioclasas (Plg) y opacos (Opa), entre otros, vistos con nicols paralelos y nicols cruzados, respectivamente (A y B).



Fuente: Autor del proyecto

Porosidad y Fracturación

En términos generales, la porosidad es de tipo primaria y secundaria. En el primer caso se produce naturalmente por el empaquetamiento de los granos, mientras que en el segundo se relaciona con el fenómeno de disolución.

En este caso los agregados no presentan porosidad.

Alteración

La alteración hace referencia a la modificación sufrida en la composición o estructura interna de una roca situada en la superficie terrestre o en sus proximidades, debido a la acción de agentes atmosféricos.

Para los agregados de tamices $\frac{3}{4}$ " a No 4, el grado de alteración se determinó con base en la modificación superficial del color natural. El agregado que conserva el color de la roca origen sin presencia de manchas, se considera no alterado; de lo contrario, si se observan manchas o alteraciones de color, se agrupan y se diferencian en tres niveles cualitativos:



- Leve: presencia de manchas de coloraciones muy tenues o coloraciones más fuertes que se extienden sobre un área pequeña de la superficie del agregado.
- Moderada: presencia de manchas de coloraciones notorias tanto en tonalidad como en extensión.
- Severa: presencia de manchas con coloraciones fuertes que abarcan una extensión importante de la superficie del agregado.

A nivel microscópico los procesos de meteorización química actúan siempre en la superficie de los minerales y la intensidad de la reacción depende directamente de la superficie específica y del grado de fragmentación mecánica previa que tenga el material. Es así como el ataque a los minerales primarios puede ser seguido por una redistribución atómica en la red cristalina remanente, lo que conduce a un nuevo mineral más estable (en ese ambiente) que el anterior. El resultado de las acciones de meteorización es la formación de minerales de arcilla (Besoain, 1985).

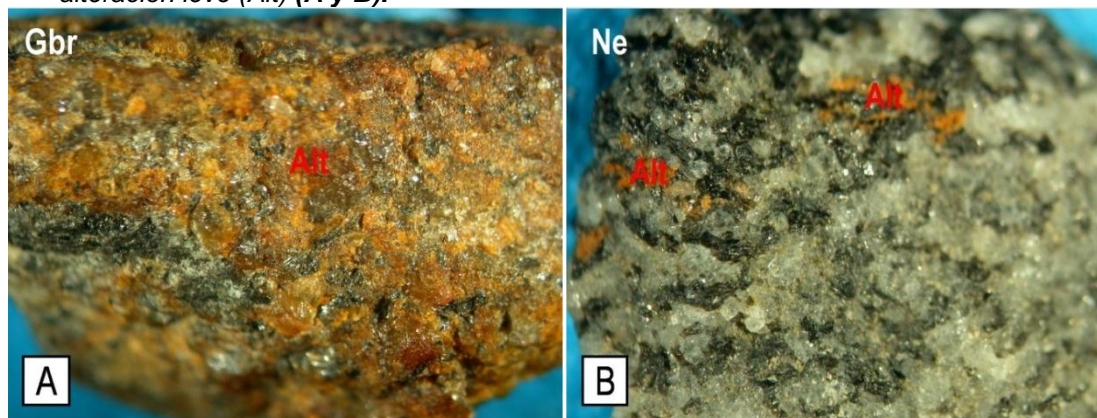
El grado de meteorización se determinó teniendo en cuenta principalmente los niveles de sericitización de las plagioclasas; no obstante, también se tuvo en cuenta otros tipos de alteración tales como oxidación, aunque esta se presentó de manera muy esporádica.

Tabla 35. Alteración

ALTERACIÓN	NIVELES DE LAS FRACCIONES ANALIZADAS				
	Porcentaje de Partículas				
	T-1/2"	T-3/8"	T-No 4	T-No 10	T-No 40
Sin alteración	67.3	70.4	65.3	82.4	87.9
Leve	29.8	27.0	30.7	11.8	9.1
Moderada	2.9	2.6	4.0	5.9	2.3
Severa	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8
TOTAL	100	100	100	100	100

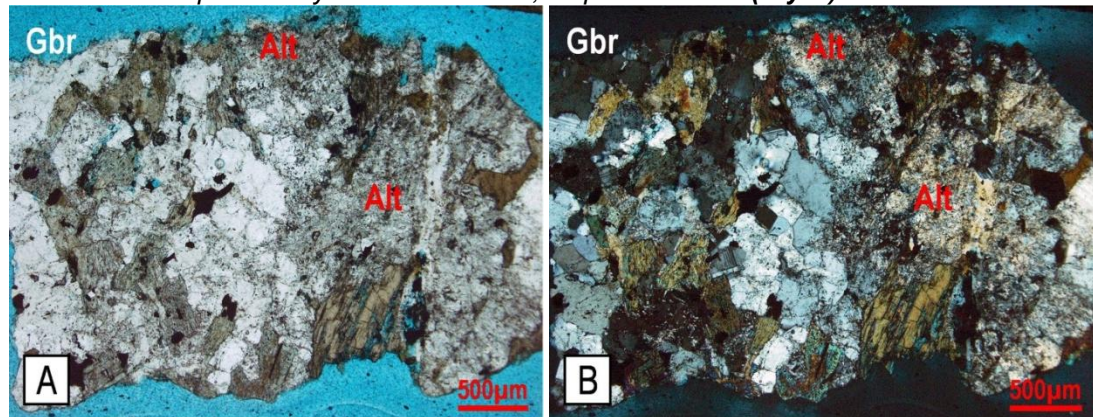
Fuente: Autor del proyecto

Figura 58. Microfotografías de agregados del tamiz No 4 alterados bajo el estéreo microscopio, mostrando: un gabro (Gbr) con alteración moderada (Alt) y un neiss (Ne) con alteración leve (Alt) (A y B).



Fuente: Autor del proyecto

Figura 59. Microfotografías de agregados del tamiz No 10 bajo el microscopio petrográfico mostrando: Alteración moderada de un gabro (Gbr) con plagioclasa sericitizada (Alt), vista con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (A y B).



Fuente: Autor del proyecto

Tabla 35^a. Contenido teórico de SiO₂ en las muestras

Tipo de roca/mineral	Cuarzo	Plagioclasa	Tonalita/ Feldespato	Neiss/ Esquisto	Hornblenda/ Piroxeno	Moscovita/ Gabro	Biotita	Opaco
Contenido de SiO ₂	100%	67%	66%	59%	51%	45%	41%	0%
	Grado de acidez							<
	<i>Acido</i>				<i>Básico</i>			
Porcentaje de partículas en las muestras	0.31	17.08	5.35	13.17	12.65	46.40	4.42	0.62

Fuente: Kumar (2004)

Según lo anterior la mayoría del material proviene de un magma de composición máfica, en la muestra cerca del 94% corresponde a material de composición intermedia (grado de acidez cercano al 50%, ó PH neutro), lo que no afecta la adherencia entre los agregados y el asfalto. Kumar (2004).



4.7.6 Difracción de rayos X

En la siguiente tabla se describe la semi-cuantificación de los componentes por altura del pico (intensidad) teniendo en cuenta los picos más intensos de cada mineral presente; obtenida mediante el análisis de difracción de rayos-X (DRX). Los datos se derivan de los correspondientes Difractogramas.

Tabla 36. Datos extraídos de los Difractogramas.

CONSTITUYENTE	MÉTODO DEL POLVO (a)	MINERALOGÍA DE ARCILLAS (b)
Montmorillonita		≈5%
Cloritas	≈5%	≈5%
Micas	≈11%	≈17%
Caolinita	≈8%	≈18%
Anfíboles	≈38%	≈22%
Cuarzo	≈6%	≈15%
Feldespatos	≈28%	≈17%
Interestratificados ⁸		<5%
Total	≈ 100 %	≈ 100 %

Fuente: Autor del proyecto

De acuerdo con los resultados anteriores, se observa que hay un predominio de minerales de tipo no filosilicato como anfíboles, feldespatos y cuarzo (61.5%). seguido por la presencia de minerales arcillosos o filosilicatos, entre los que se destaca la caolinita y las micas (38.5%),

⁸ *Interestratificados: Resultado de meteorización química de las micas; pueden ser tipo clorita-esmectita

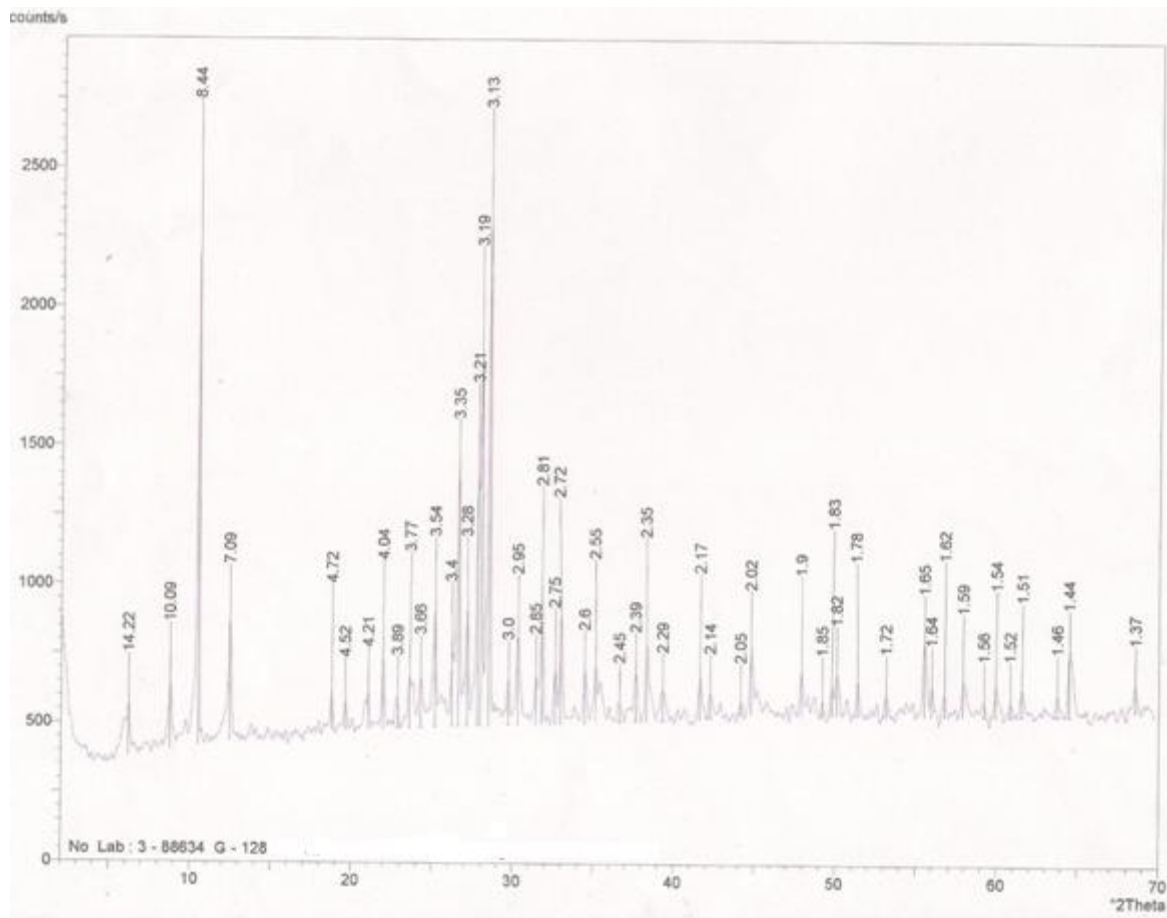


Tabla 37. Mineralogía global de la muestra.

CONSTITUYENTE	PORCENTAJE APROXIMADO (%)
Montmorillonita	4.3
Cloritas	4.3
Micas	14.5
Caolinita	15.4
Anfiboles	32.5
Cuarzo	5.1
Feldespatos	23.9
Total	100

Fuente: Autor del proyecto

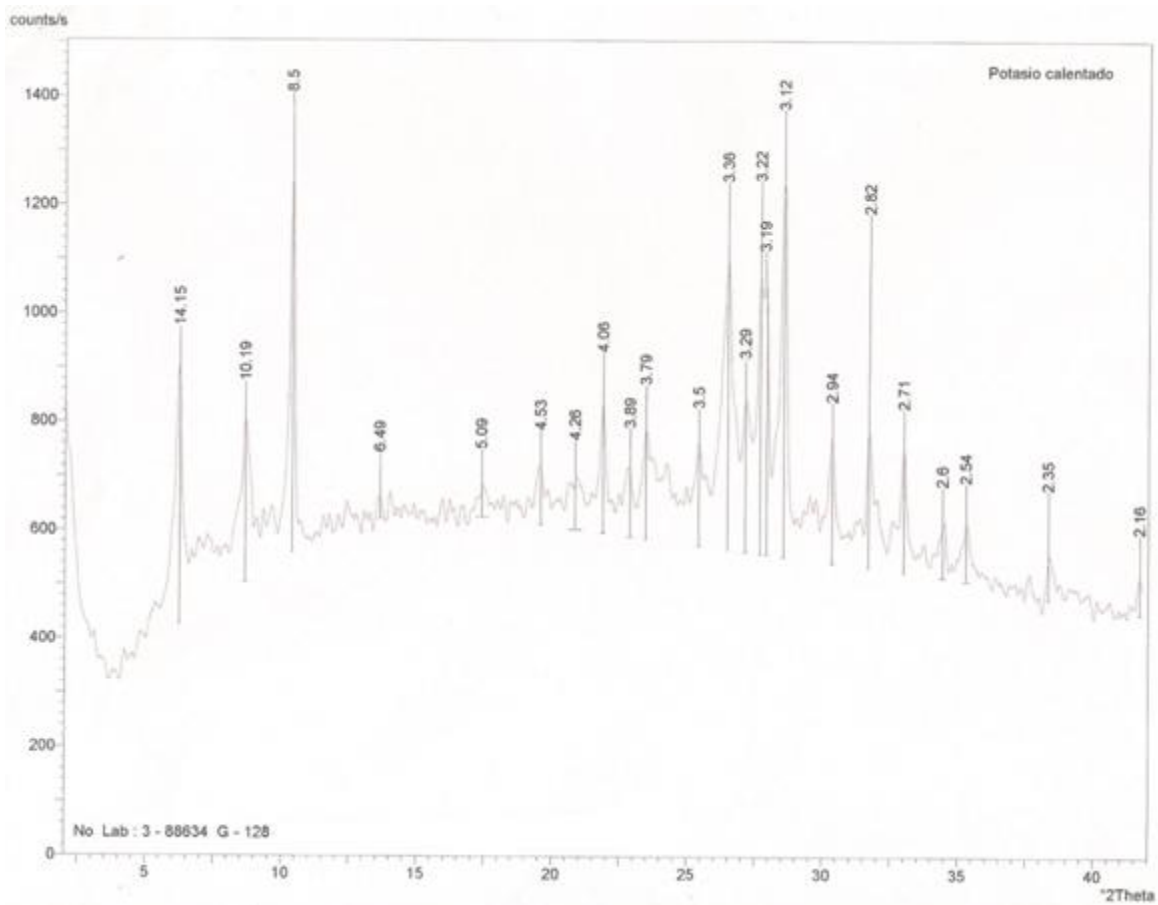
Figura 60: Difractograma obtenido en el análisis de la muestra total por DRX (método del polvo)



Fuente: Autor del proyecto



Figura 61: Difractograma obtenido en el análisis de arcillas por rayos x (tratamiento K y calentamiento a 550°C).



Fuente: Autor del proyecto



4.7.7 Fluorescencia de rayos X

Los resultados obtenidos en forma de compuestos y de elementos, se describen a continuación:

Tabla 38. Resultados FRX muestra

CONSTITUYENTE	% EN PESO
SiO ₂	49.919
Al ₂ O ₃	15.821
Fe ₂ O ₃	12.234
CaO	9.380
MgO	5.979
Na ₂ O	3.173
TiO ₂	1.498
K ₂ O	0.925
P ₂ O ₅	0.322
S	0.321
MnO	0.217
Ba	0.06
V	0.04
Cr	0.027
Zr	0.024
Zn	0.021
Sr	0.017
Cu	0.011
Rb	0.004
Y	0.004
Totales	100

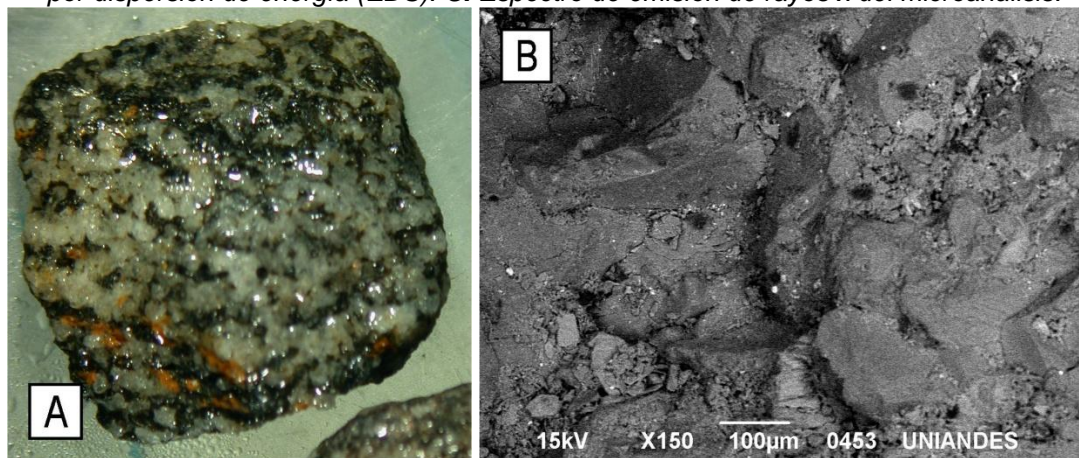
Fuente: Autor del proyecto

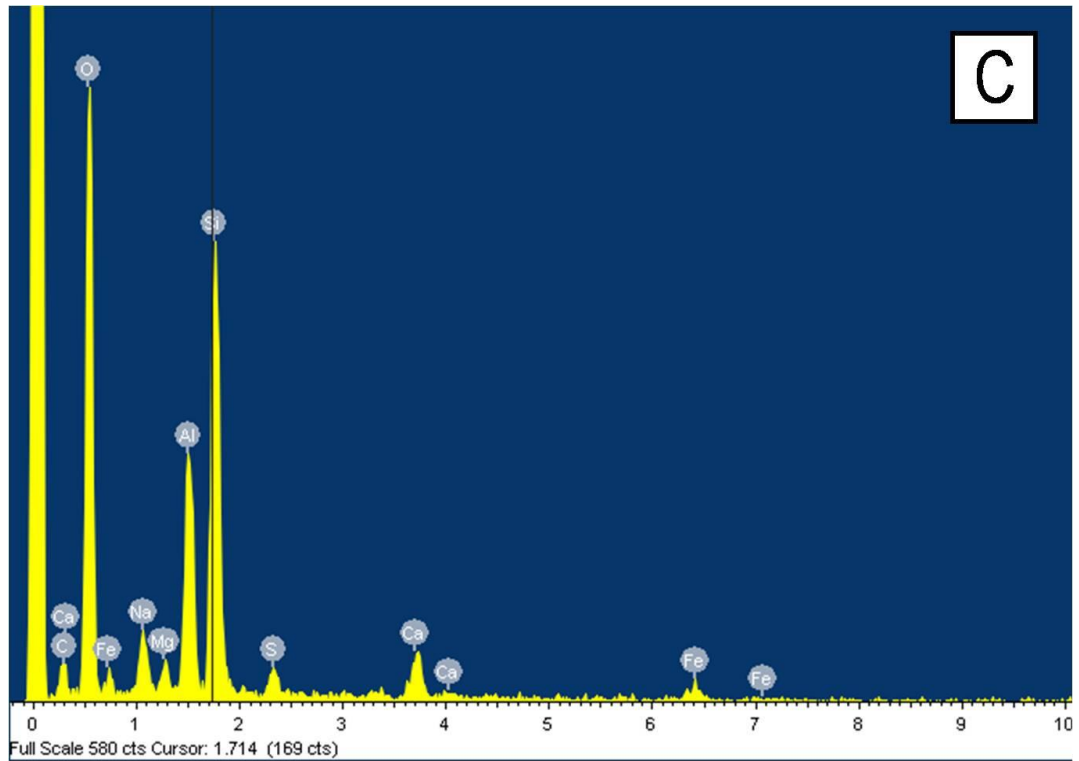
4.7.8 Microscopía electrónica, SEM

Fracción gruesa del agregado

En las siguientes imágenes se observa el análisis de las partículas tamaño grava, destacándose la textura y la composición de las zonas estudiadas:

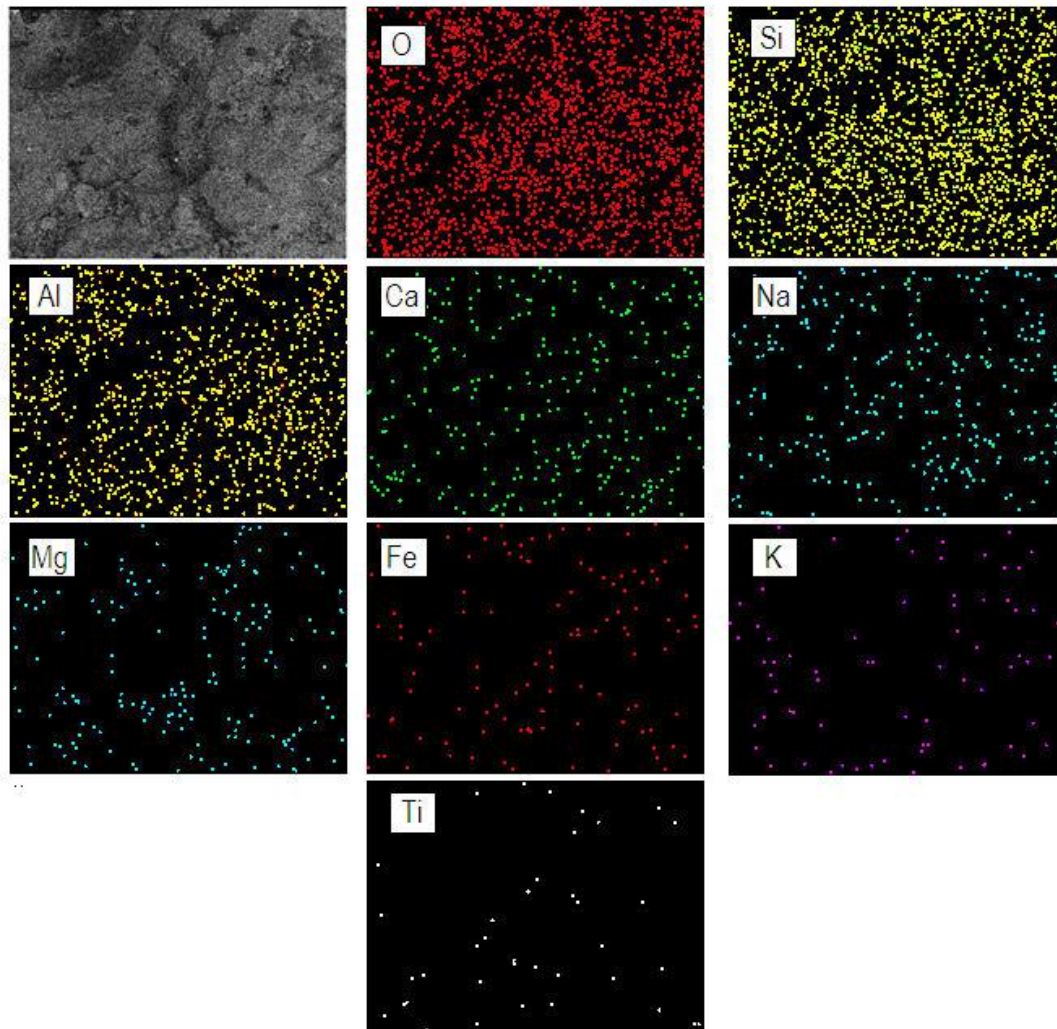
Figura 62. Microfotografías mostrando: **A.** Microfotografía del agregado tipo tonalita bajo el estéreo microscopio. Se destaca los cristales de hornblenda de tonalidad verdosa oscura y plagioclasa de color claro. **B.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior, resaltándose la textura superficial de los cristales. Sobre este sector se realizó el microanálisis cuantitativo con el detector de espectroscopía por dispersión de energía (EDS). **C.** Espectro de emisión de rayos x del microanálisis.





Fuente: Autor del proyecto

Las siguientes imágenes muestran los mapas de puntos (mapping) obtenidos en el microanálisis con el detector de espectroscopia por dispersión de energía (EDS).



La tabla No 39 registra la concentración (% en peso) de los elementos presentes en el agregado analizado.

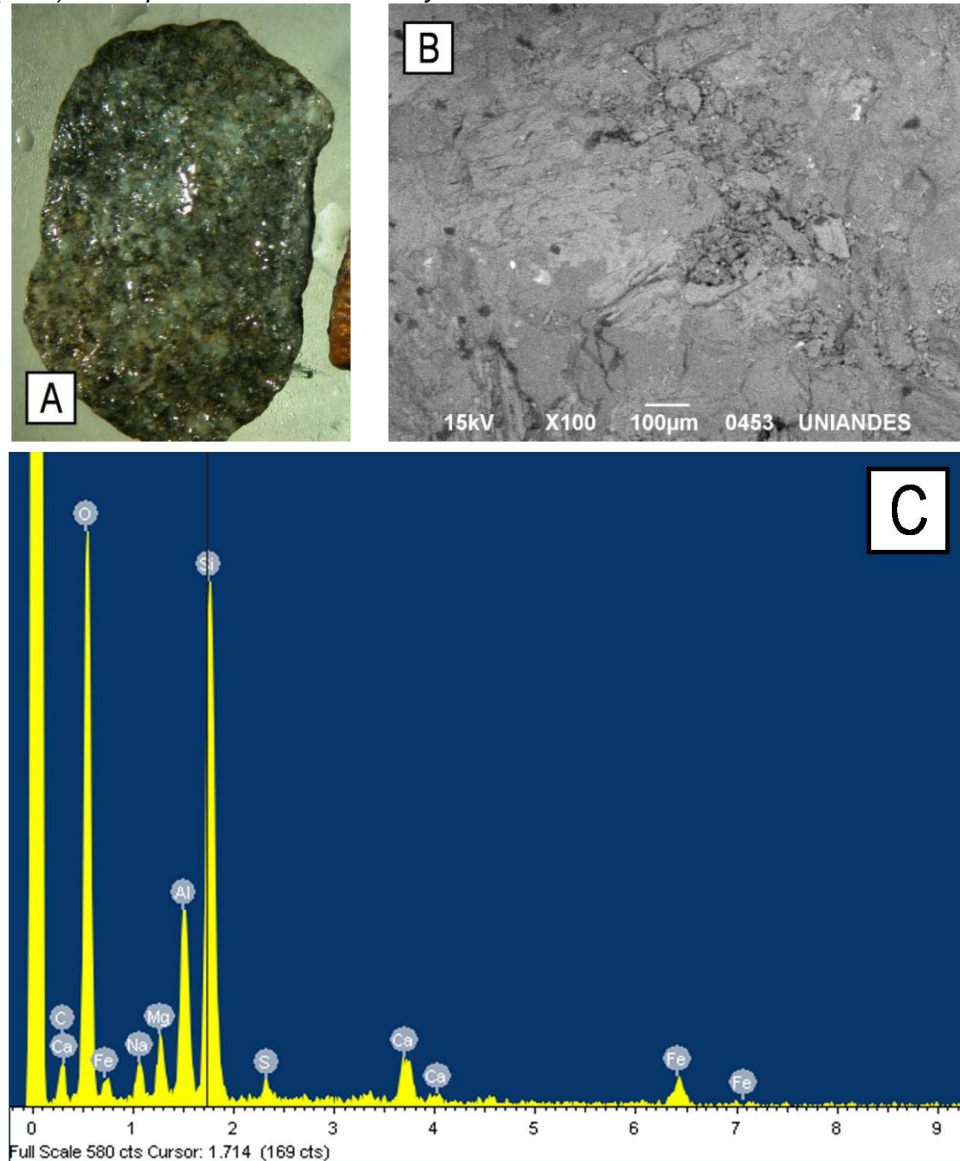
Tabla 39. Composición química

O%	Al%	Si%	K%	Ca%	Mg%	Na%	S%
58.72	9.10	18.94	4.00	3.67	1.18	2.77	1.63

Fuente: Autor del proyecto

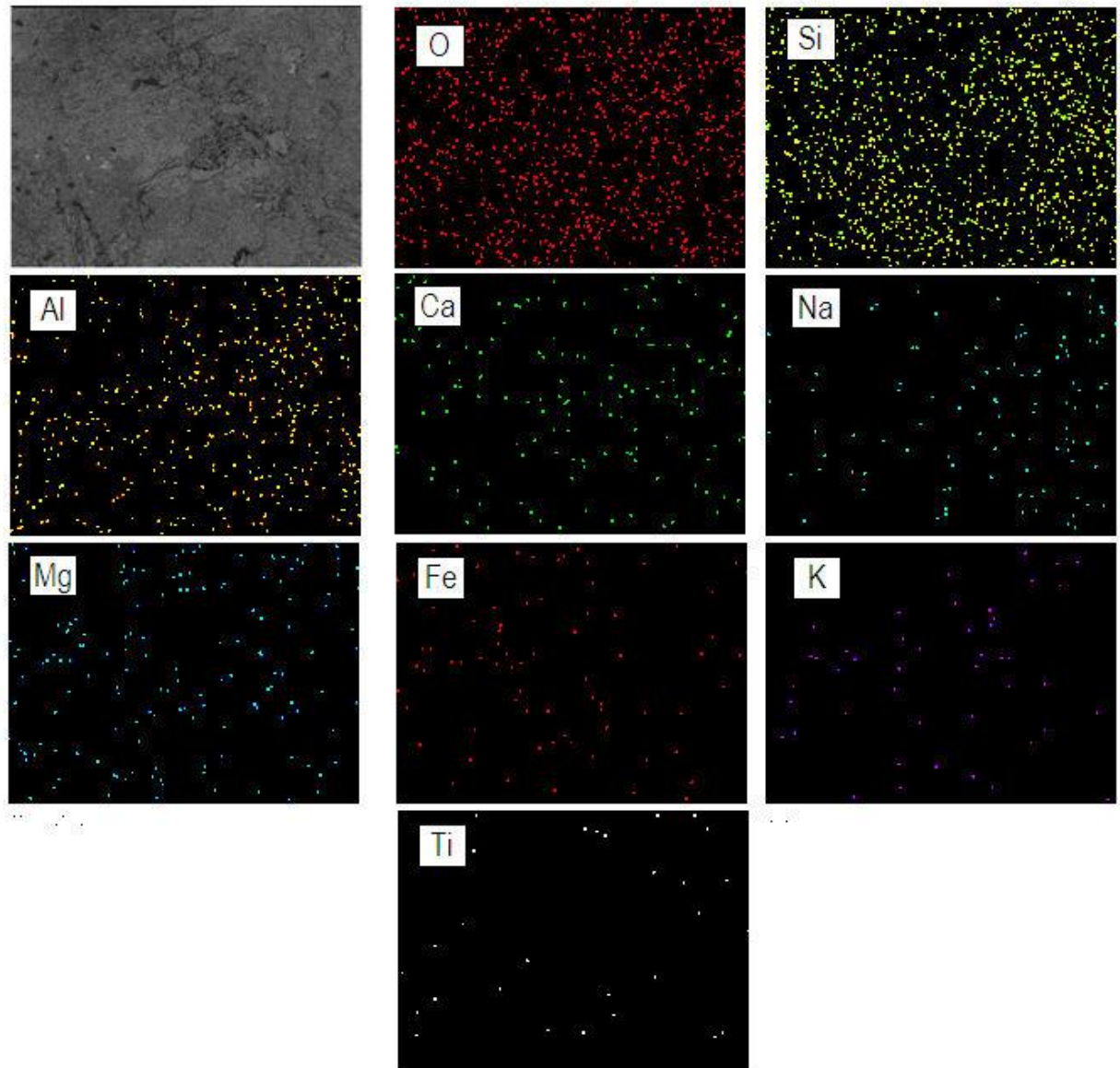
En las siguientes imágenes se observa el análisis de la segunda partícula tamaño grava, destacándose la textura y la composición de las zonas estudiadas

Figura 63. Microfotografías mostrando: **A.** Microfotografía del agregado tipo gabro bajo el estéreo microscopio. Se destaca los cristales de hornblenda de tonalidad verdosa oscura. **B.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior, resaltándose la textura superficial de los cristales. Sobre este sector se realizó el microanálisis cuantitativo con el detector de espectroscopía por dispersión de energía (EDS). **C:** Espectro de emisión de rayos x del microanálisis.



Fuente: Autor del proyecto

Las siguientes imágenes muestran los mapas de puntos (mapping) obtenidos en el microanálisis con el detector de espectroscopía por dispersión de energía (EDS).



La tabla No 40 registra la concentración (% en peso) de los elementos presentes en el agregado analizado.

Tabla 40. Composición química

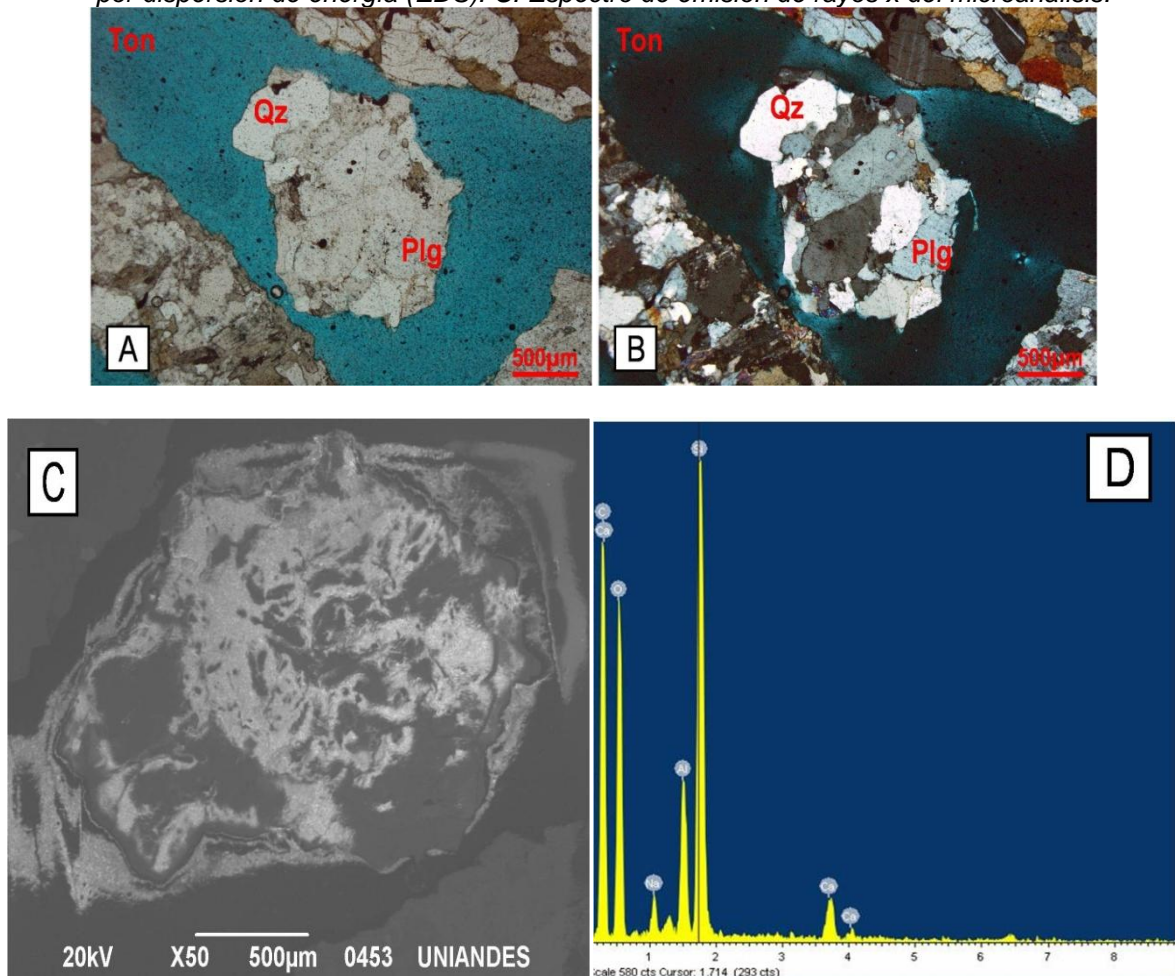
O%	Al%	Si%	Ca%	Fe%	Mg%	Na%	S%
55.27	7.04	21.40	3.96	7.32	2.20	1.93	0.88

Fuente: Autor del proyecto

Fracción fina del agregado:

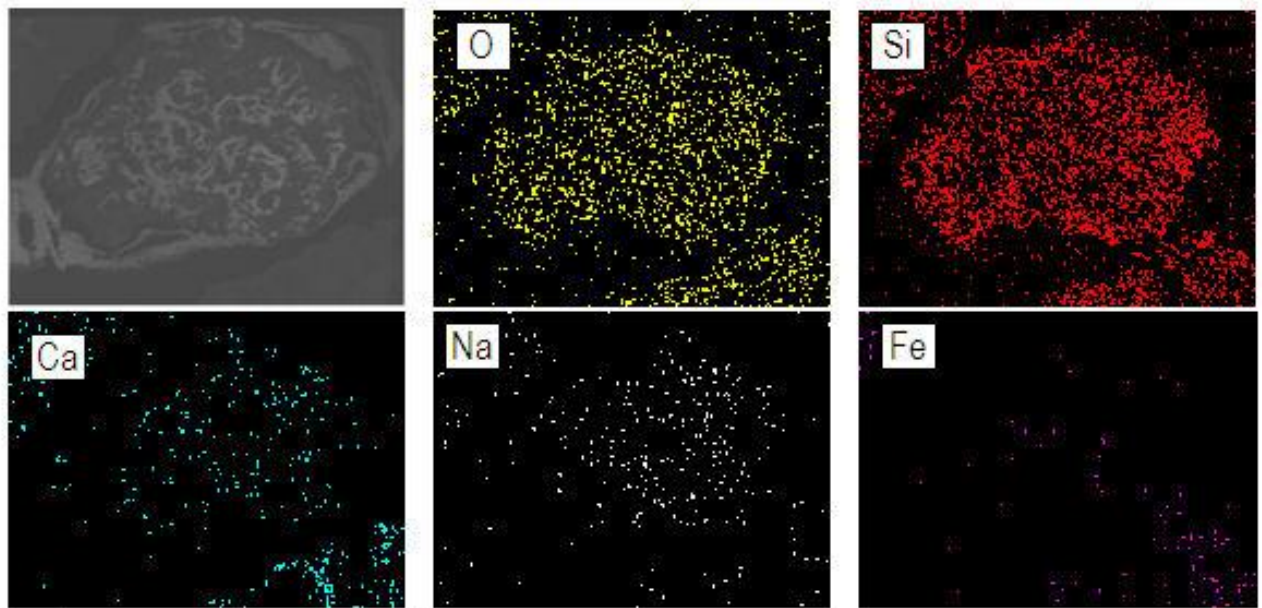
En las siguientes imágenes se observa el análisis de la primera partícula tamaño arena, destacándose la localización, el color, la textura y la composición de las zonas estudiadas:

Figura 64. Microfotografías mostrando: **A.** Fotografía a través del microscopio de luz polarizada en el cual se observa un fragmento de Tonalita (Ton) con cristales de plagioclasa (Plg) y cuarzo (Qz), vistos en nicoles paralelos. **B.** La misma imagen anterior, pero con nicoles cruzados. **C.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior, resaltándose la textura superficial de los cristales. Sobre este sector se realizó el microanálisis cuantitativo con el detector de espectroscopía por dispersión de energía (EDS). **D.** Espectro de emisión de rayos x del microanálisis.



Fuente: Autor del proyecto

Las siguientes imágenes muestran los mapas de puntos (mapping) obtenidos en el microanálisis con el detector de espectroscopia por dispersión de energía (EDS).



La tabla No 41 registra la concentración (% en peso) de los elementos presentes en el agregado analizado.

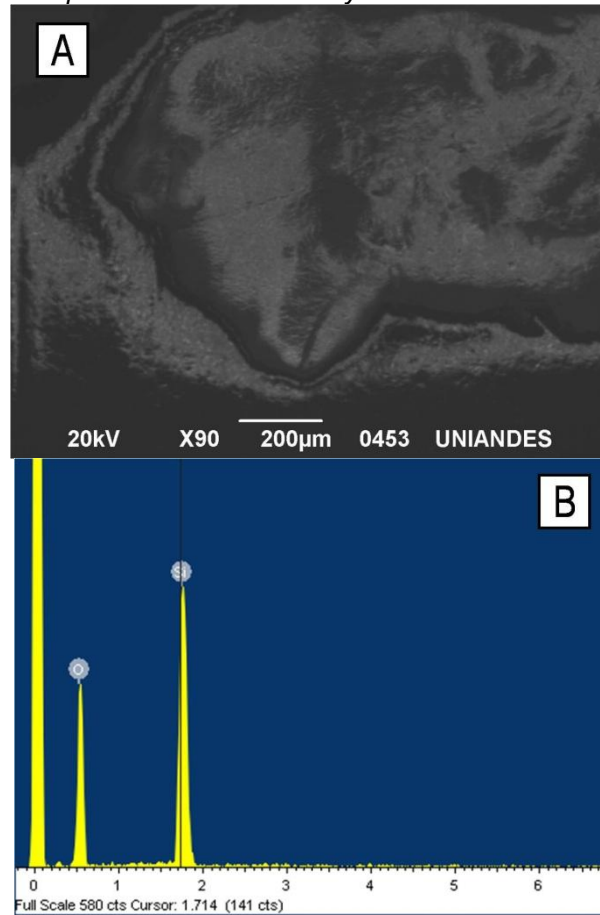
Tabla 41. Composición química.

O%	Al%	Si%	Ca%	Na%
72.64	5.25	17.42	2.47	2.22

Fuente: Autor del proyecto

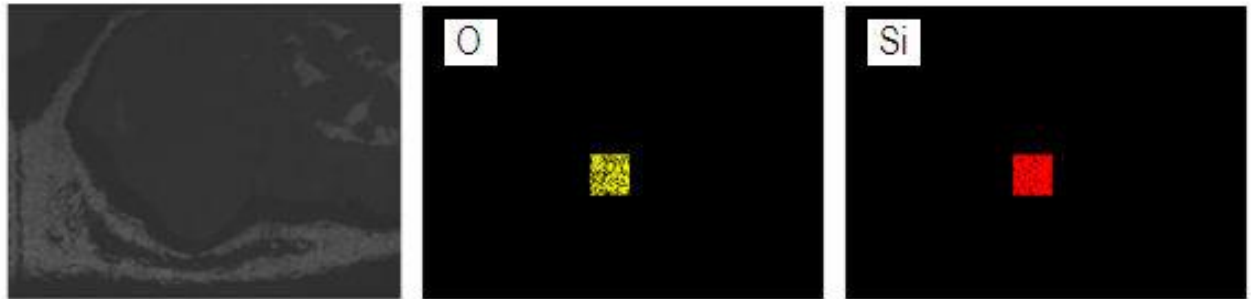
En las siguientes imágenes se observa el análisis de un sector de la primera partícula tamaño arena.

Figura 65. Microfotografías mostrando: **A.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido de un sector del mismo agregado anterior. Sobre este sector se realizó el microanálisis cuantitativo con el detector de espectroscopía por dispersión de energía (EDS). **B.** Espectro de emisión de rayos x del microanálisis.



Fuente: Autor del proyecto

Las siguientes imágenes muestran los mapas de puntos (mapping) obtenidos en el microanálisis con el detector de espectroscopía por dispersión de energía (EDS).



La tabla No 42 registra la concentración (% en peso) de los elementos presentes en el sector analizado.

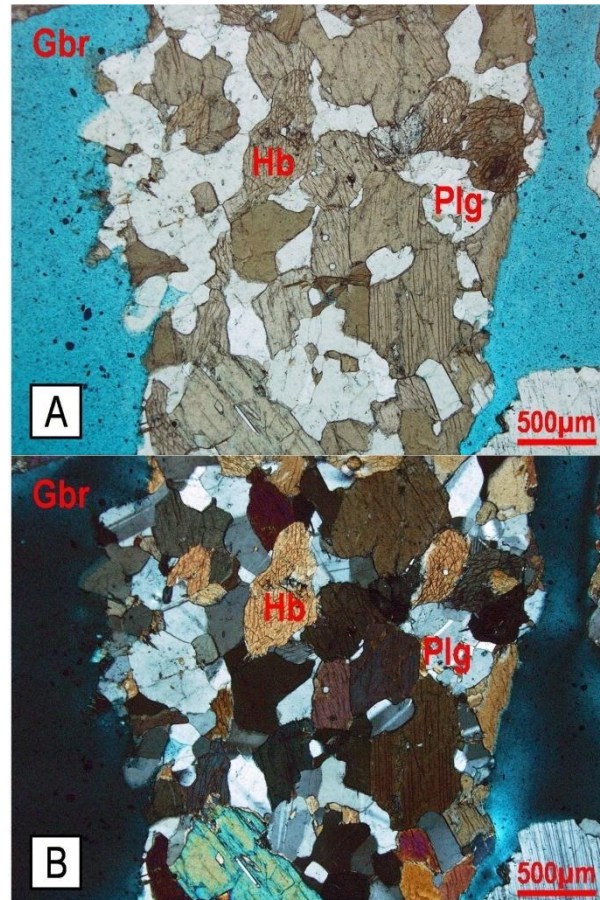
Tabla 42. Composición química.

O%	Si%
75.68	24.32

Fuente: Autor del proyecto

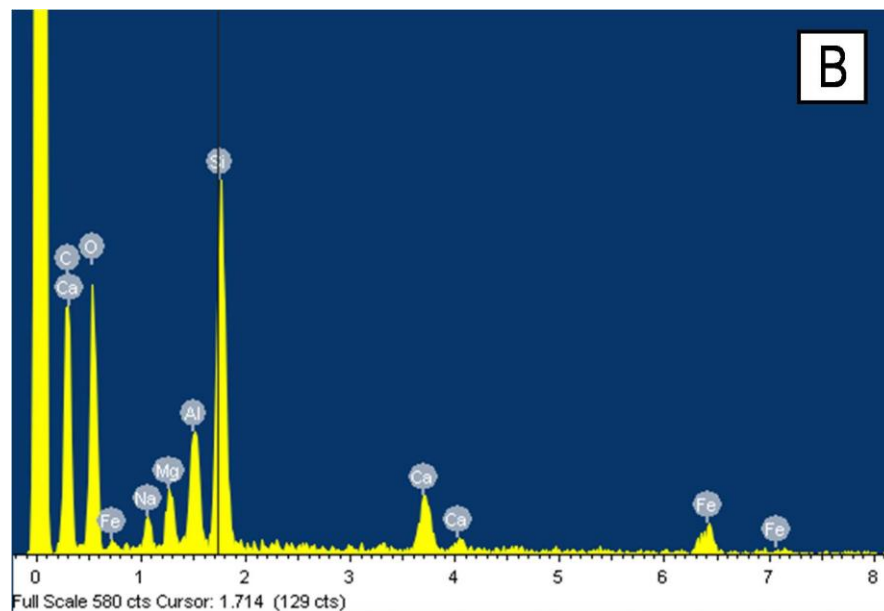
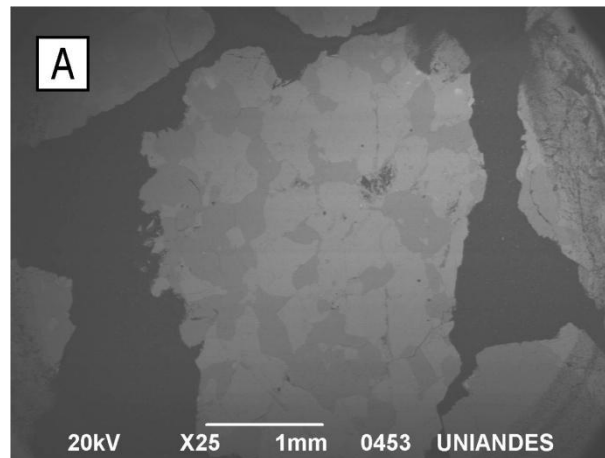
En las siguientes imágenes se observa el análisis de la segunda partícula tamaño arena, destacándose la localización, el color, la textura y la composición de las zonas estudiadas:

Figura 66. Microfotografías mostrando: **A.** Fotografía a través del microscopio de luz polarizada en el cual se observa un fragmento de Gabro (Gbr) con cristales de plagioclasa (Plg) y hornblenda (Hb), vistos en nicoles paralelos. **B.** La misma imagen anterior, pero con nicoles cruzados.



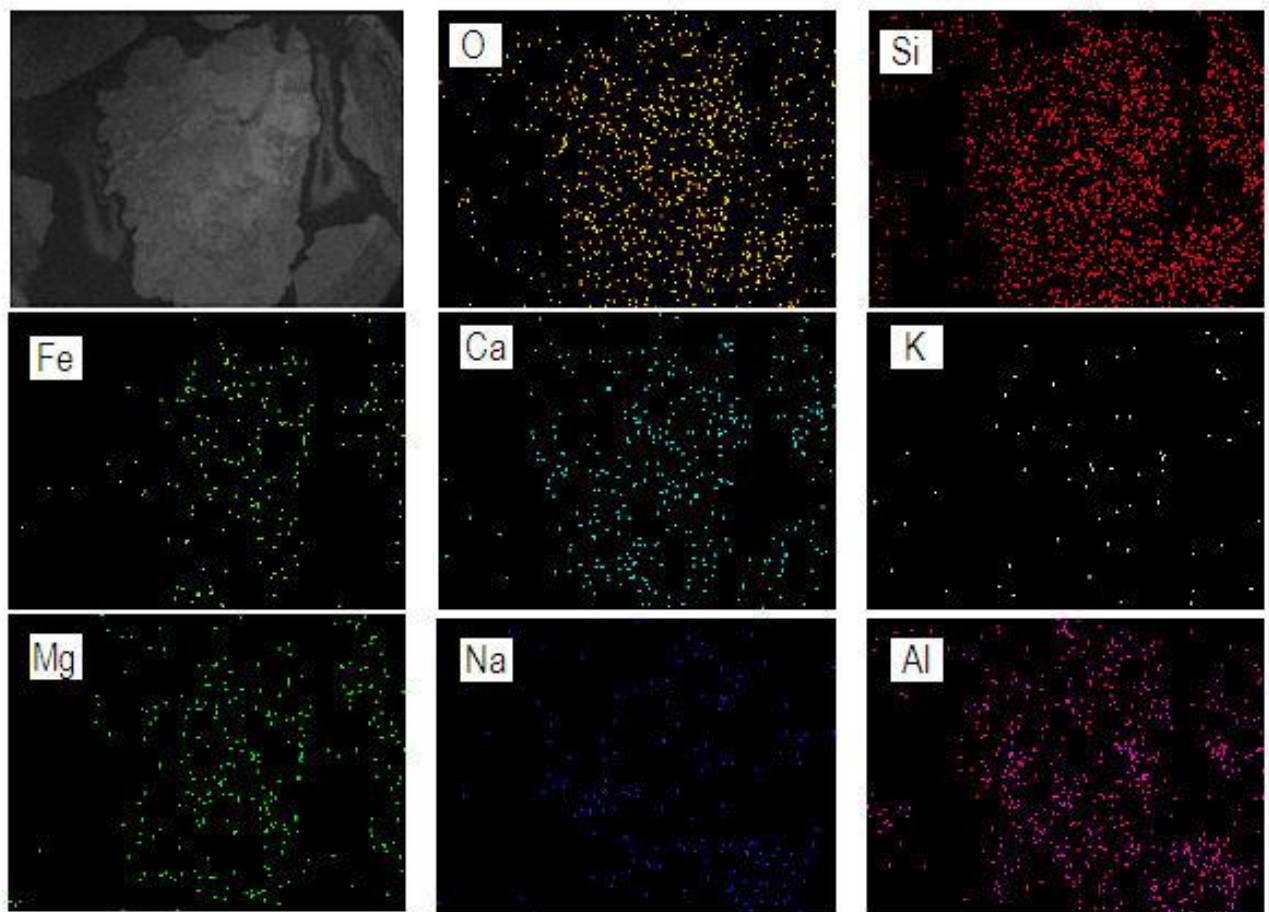
Fuente: Autor del proyecto

Figura 67. Microfotografías mostrando: **A.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido del mismo agregado anterior. Sobre este sector se realizó el microanálisis cuantitativo con el detector de espectroscopía por dispersión de energía (EDS). **B.** Espectro de emisión de rayos x del microanálisis.



Fuente: Autor del proyecto

Las siguientes imágenes muestran los mapas de puntos (mapping) obtenidos en el microanálisis con el detector de espectroscopía por dispersión de energía (EDS).



La tabla No 43 registra la concentración (% en peso) de los elementos presentes en el agregado analizado.

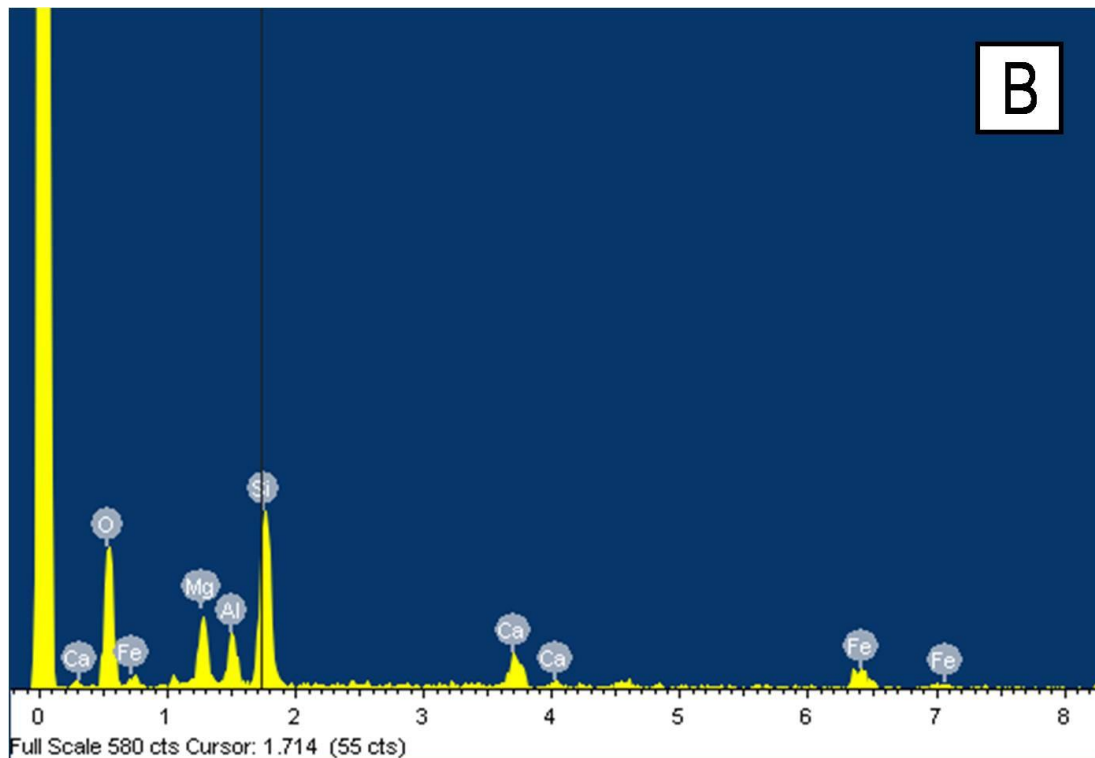
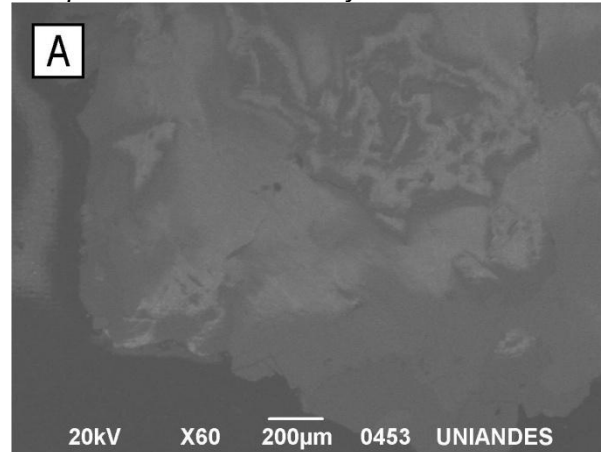
Tabla 43. Composición química

O%	Al%	Si%	Ca%	Fe%	Mg%	Na%
64.78	5.25	15.46	3.99	5.08	2.99	2.45

Fuente: Autor del proyecto

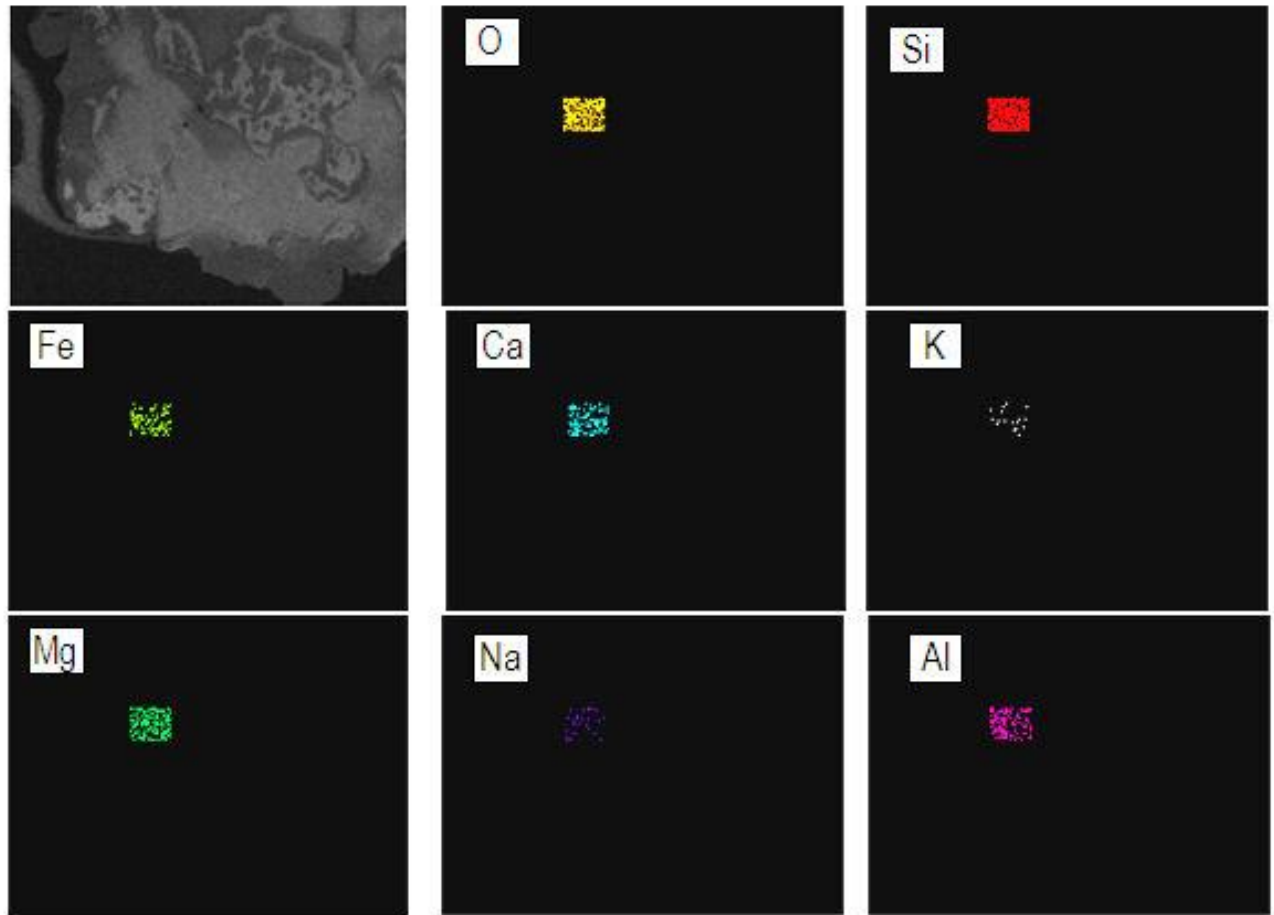
En las siguientes imágenes se observa el análisis de un sector de la segunda partícula tamaño arena.

Figura 68. Microfotografías mostrando: **A.** Microfotografía a través del microscopio electrónico de barrido de un sector del mismo agregado anterior. Sobre este sector se realizó el microanálisis cuantitativo con el detector de espectroscopía por dispersión de energía (EDS). **B.** Espectro de emisión de rayos x del microanálisis.



Fuente: Autor del proyecto

Las siguientes imágenes muestran los mapas de puntos (mapping) obtenidos en el microanálisis con el detector de espectroscopio por dispersión de energía (EDS).



La tabla No 44 registra la concentración (% en peso) de los elementos presentes en el sector analizado.

Tabla 44. Composición química

O%	Al%	Si%	Ca%	Fe%	Mg%
51.17	5.39	21.35	5.55	8.64	7.9

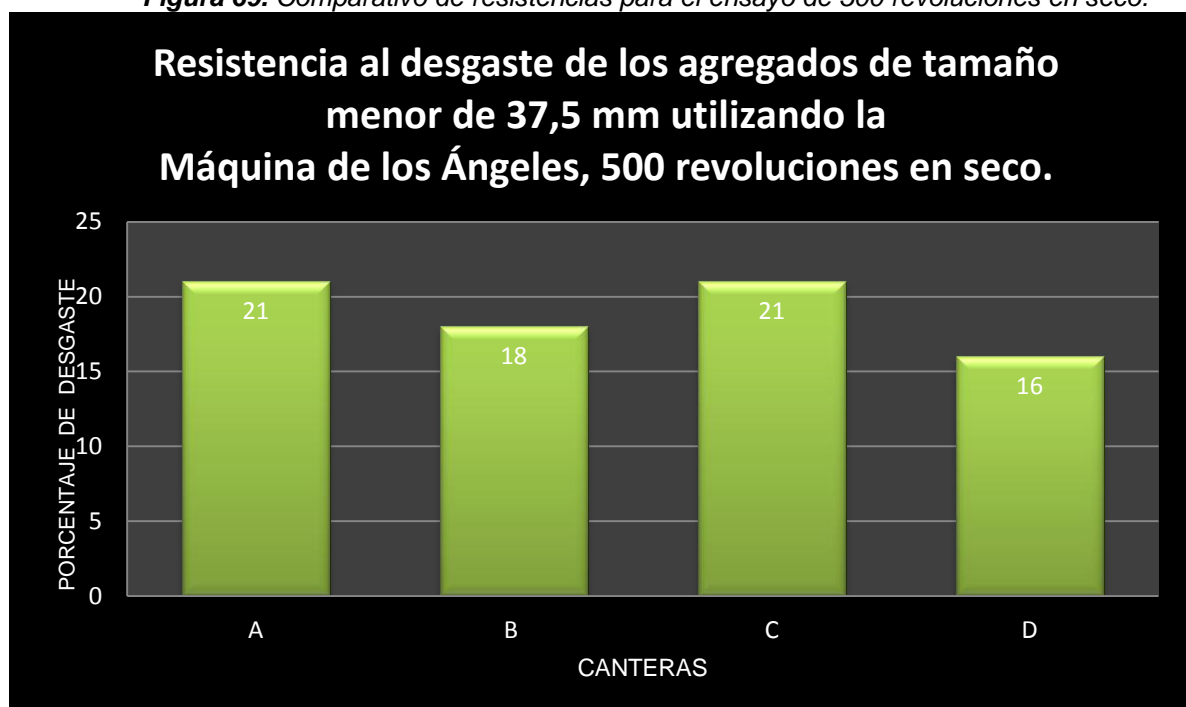
Fuente: Autor del proyecto



5. COMPARATIVO DE RESULTADOS DE RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASION EN LA MAQUINA DE LOS ANGELES.

5.1 RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑO MENOR DE 37,5 MM UTILIZANDO LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES, 500 REVOLUCIONES EN SECO

Figura 69. Comparativo de resistencias para el ensayo de 500 revoluciones en seco.



Fuente: Autor del proyecto

En esta figura se puede observar que los agregados analizados, cumplen con la especificación INVIAS, ya que su desgaste no excede el 25% en peso, después de someterse a 500 revoluciones. El agregado más competente en este ensayo es el de la cantera D.

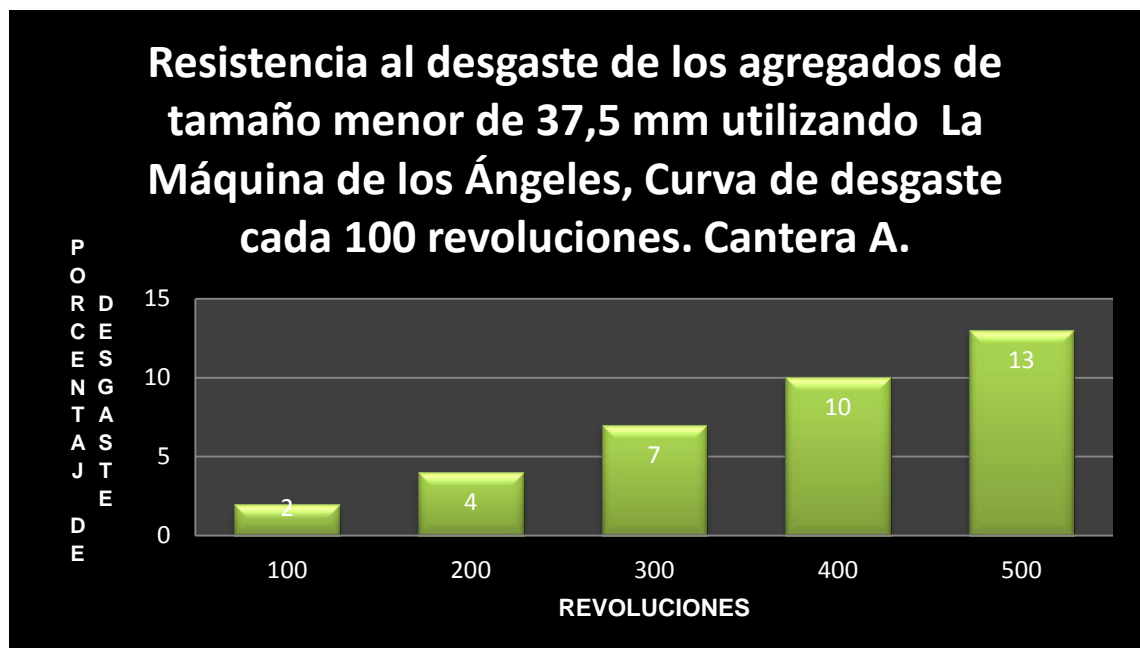


5.2 RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑO MENOR DE 37,5 MM UTILIZANDO LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES, CURVA DE DESGASTE CADA 100 REVOLUCIONES.

En las siguientes graficas se observa el desgaste progresivo de los cuatro conjuntos de agregados analizados.

Con este ensayo se busca llevar un tanto un control como una medida, el proceso de desgaste de cada conjuntos de agregados evaluado. Se puede evidenciar que el agregado con mayor resistencia el desgaste en este ensayo es el correspondiente a la cantera A, así mismo el agregado de la cantera D, muestra los valores menos aceptables ya que su desgaste es el más alto (23%), y se acerca al límite expuesto por el INVIAS que corresponde al 25%.

Figura 70. Escala de desgaste cada 100 revoluciones, Para la cantera A.



Fuente: Autor del proyecto

Figura 71. Escala de desgaste cada 100 revoluciones, Para la cantera B.



Fuente: Autor del proyecto

Figura 72. Escala de desgaste cada 100 revoluciones, Para la cantera C.



Fuente: Autor del proyecto

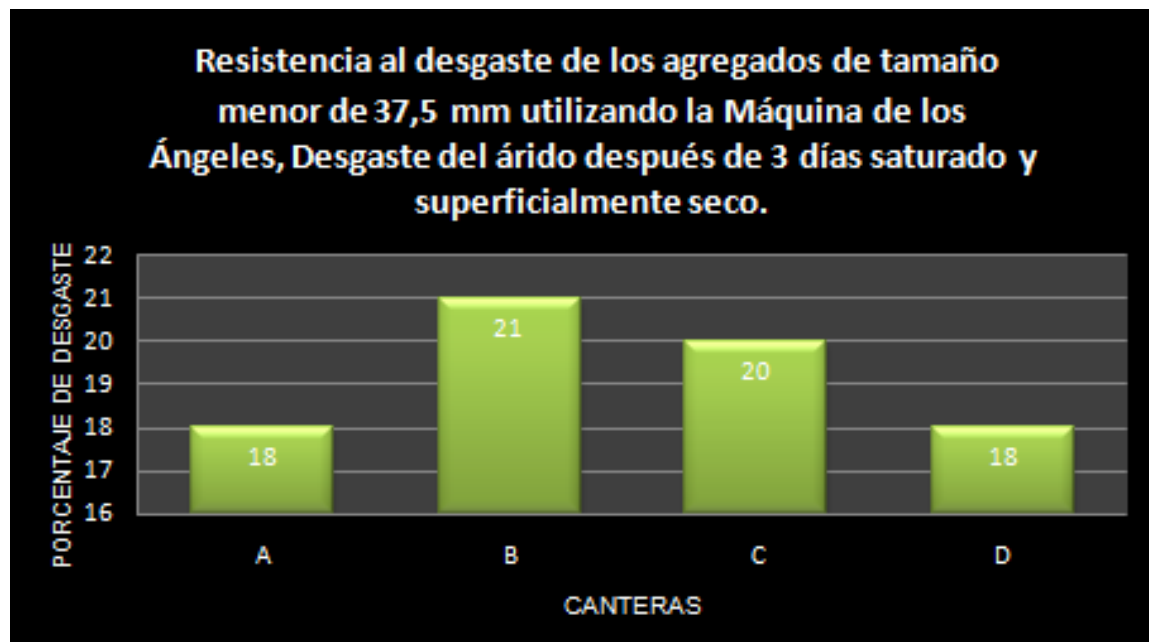
Figura 73. Escala de desgaste cada 100 revoluciones, Para la cantera D.



Fuente: Autor del proyecto

5.3 RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑO MENOR DE 37,5 MM UTILIZANDO LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES, DESGASTE DEL ÁRIDO DESPUÉS DE 3 DÍAS SATURADO Y SUPERFICIALMENTE SECO.

Figura 74. Comparativo de desgaste después de tres días de saturado en agua.

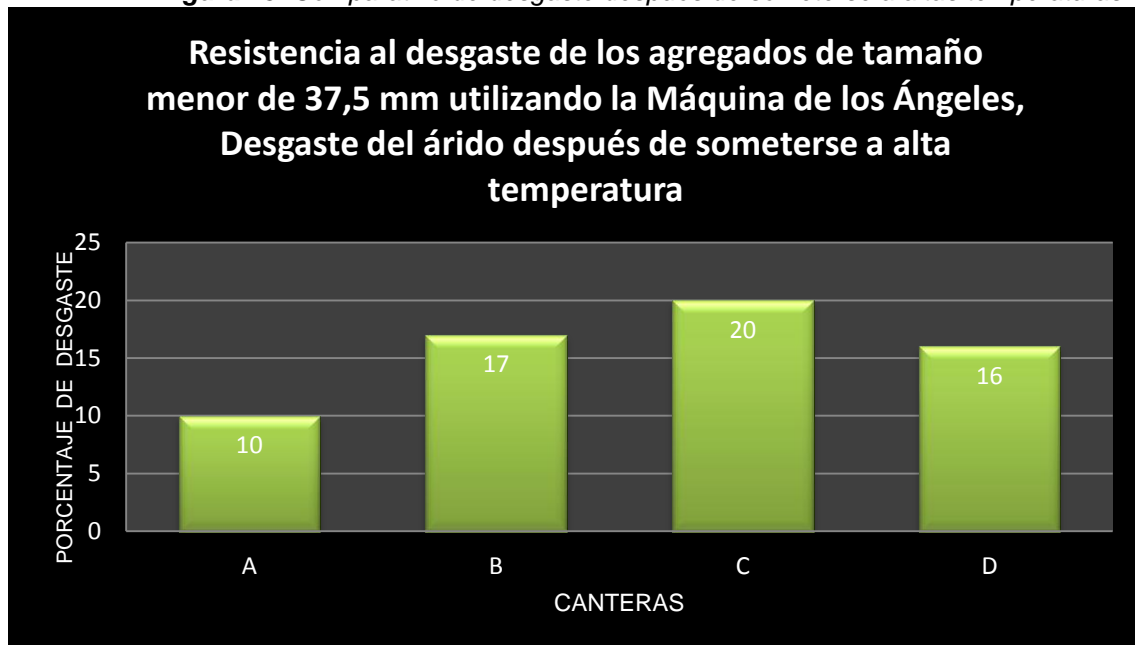


Fuente: Autor del proyecto

La figura muestra como los agregados de la cantera B se ven afectados tras su contacto con el agua, muy seguramente esto se debe a que es la muestra con mayor contenido de montmorillonita (12.7%), pero aun así no sobrepasan un nivel de desgaste mayor al 25%, por lo que cumple la especificación INVIAS.

5.4 RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑO MENOR DE 37,5 MM UTILIZANDO LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES, DESGASTE DEL ÁRIDO DESPUÉS DE SOMETERSE A ALTA TEMPERATURA.

Figura 75. Comparativo de desgaste después de someterse a altas temperaturas.



Fuente: Autor del proyecto

La figura anterior evidencia que los agregados pétreos analizados no muestran mayor afectación tras ser sometidos a altas temperaturas, Y siguen manteniendo su porcentaje de desgaste por debajo del 25%, por ello cumplen con lo especificado por el INVIAS.



6. RESUMEN DE RESULTADOS POR CANTERA

Cantera A.

El 75% del material presenta una composición intermedia, es decir, un grado de acidez del 50%. Los fragmentos de roca (líticos) encontrados en orden de abundancia son basaltos, gabros y tonalitas; así como cherts y cuarcitas. Como minerales se observa plagioclasa alterando a sericita, y en la fracción más fina hornblenda, cuarzo, piroxeno y micas (muscovita y biotita).

Los resultados de ensayos de DRX, FRX, muestran en orden de abundancia, la presencia de cuarzo (29.3 %) y feldespatos (17.1%), así como un contenido de arcillas, con 20.7% de caolinita y 12.2% de motmorillonita, siendo esta última una arcilla expansiva, pero para el caso, se considera un porcentaje bajo a moderado, que no afecta considerablemente los índices expansivos del material. Soportado en los análisis de fluorescencia de rayos X, se confirma que los mayores constituyentes son de sílica, (59.9% de SiO₂), alúmina (14,4% de Al₂O₃) y óxidos de Hierro (8.9%).

El grado de alteración del material es moderado relacionado básicamente con la presencia de sericita como alteración de la plagioclasa, sílice amorfa, con bajas proporciones de óxidos de hierro a nivel superficial.

Respecto a la porosidad y fracturamiento, el material se considera de baja porosidad, poco fracturamiento y sin permeabilidad.

Cantera B.

De acuerdo con los resultados petrográficos, el 70% del material posee una composición intermedia a acida, en su mayoría con aporte de roca volcánica tipo toba, seguida por andesitas y tonalitas. El mineral más común en la formación de estas rocas es la plagioclasa, seguida por un porcentaje de hornblenda y cuarzo. Lo anterior se correlaciona con los resultados de ensayos de DRX, FRX, (en donde se muestran en orden de abundancia los feldespatos (plagioclasas), anfíboles (hornblenda) y cuarzo en la fracción gruesa), y microscopía electrónica.



Lo cual no favorece la adhesividad entre Agregado –ligante, y se requiere de la utilización de aditivos mejoradores de dicha característica.

En cuanto al grado de alteración, ésta es leve a moderada, relacionada básicamente con oxidaciones de hierro y sericitización de las plagioclasas.

La composición mineralógica identificada por DRX, demuestra la presencia de dos (2) arcillas una de las cuales es expansiva (montmorillonita). La otra arcilla identificada es la caolinita, que no presenta cambios volumétricos en presencia de agua.

Cantera C.

La petrografía de esta fuente, indica que el 72% del material presenta una composición ácida a intermedia, en su mayoría con aporte de roca volcánica entre las que tenemos: tobas, seguidas por andesitas, tonalitas y gneises. El mineral más común en la formación de estas rocas es la plagioclasa, seguida por la fracción de hornblenda y cuarzo. Lo anterior coincide con los resultados de ensayos de DRX, FRX, y microscopía.

Los análisis de DRX, arrojaron como resultado, que el principal constituyente mineralógico lo representa el cuarzo (26,8%); la caolinita (20,8%), anfíboles (18%), feldespatos (16,8%) y clorita (11%). El grado de alteración del material, está ligado a la presencia de sílice amorfa, sericita y minerales arcillosos, como alteración de plagioclasas; así como la presencia de oxidaciones de hierro superficiales. De la misma manera, los análisis de FRX indican como principales constituyentes químicos la sílica, alúmina y el hierro, todos en forma de compuestos de óxido.

Los resultados de petrografía y microscopía electrónica, muestran que la porosidad (ligada al empaquetamiento natural del material) y la permeabilidad (ligada con el fracturamiento) de estos materiales se considera baja, siendo de tipo primaria. La permeabilidad es casi despreciable, dado que no existen fracturas como tal en el conjunto matriz-clastos.

Es de resaltar que esta muestra no presenta arcillas expansivas.



Cantera D

Los análisis muestran que la composición total y estadística de las rocas presentes es de carácter intermedia, en donde su principal componente corresponde a Gabros, y mineralógicamente son anfíboles, feldespatos y caolinita, el conjunto de estos tres componentes es mayor al 61% de la muestra en total.

Según lo anterior el 94% del material posee una composición intermedia con grado de acidez del 50%, que se correlacionan con los resultados de ensayos de DRX y FRX. Esto favorece la adhesividad árido - ligante, de acuerdo al comportamiento estadístico de los Asfaltos Colombianos.

Al analizar los ensayos de DRX y FRX es evidente el bajo contenido de (montmorillonita), y elementos nocivos para la mezcla asfáltica lo que aumenta la calidad del agregado.



7. CONCLUSIONES

- Se concluye que las 4 muestras cumplen las especificaciones generales INVIAS para desgaste, estudiadas en este proyecto, para su uso en mezcla asfáltica.
- De acuerdo con los resultados de desgaste en la máquina de los Ángeles, el agregado con el mejor comportamiento estadístico es el de la cantera A. y cumple la especificación para uso en mezcla asfáltica.
- El material de la cantera B, al entrar en contacto con el agua baja notoriamente su resistencia a la abrasión. Así como el agregado de la cantera C, muestra los comportamientos más constantes de las 4 muestras analizadas, así mismo cuenta con los resultados de abrasión más altos, En términos generales, los agregados de la cantera D cumplen con la especificación INVIAS, ya que no excede el límite del 25%.
- De acuerdo a los resultados petrográficos, las muestras poseen un nivel de acidez intermedio, esto no afecta la adhesividad con el ligante asfáltico.
- Los análisis de DRX y FRX, confirman lo anterior y muestran que los agregados tienen niveles bajos de montmorillonita, entre los que se destaca la cantera B por poseer el más alto 12.7 y la cantera C por no poseer, lo que no afecta la mezcla asfáltica.
- Tras analizar los resultados de microscopía electrónica, se observó que los agregados de las 4 muestras no presentan fracturamiento ni porosidad severa, y pueden ser utilizados en mezcla asfáltica.



8. RECOMENDACIONES

- Se recomienda planificar el muestreo y las investigaciones In Situ, antes de comenzar a explotar una cantera, de la cual no se tiene certeza si su material se pueda aprovechar adecuadamente o cumpla con las especificaciones mínimas de desgaste para lo que se requiere según la norma respectiva .
- Teniendo en cuenta lo anterior, se recomienda realizar los estudios aquí presentados antes de empezar la fase de explotación, para así conocer y clasificar la calidad del agregado presente.
- se recomienda realizar estos estudios a mayor profundidad, para caracterizar la roca basamento, y determinar si es apto para su uso en mezcla asfáltica.
- Se recomienda la realización de los ensayos aquí reportados, a cada una de los diferentes tipos de rocas en el conjunto de agregados analizados.



9. BIBLIOGRAFIA

- ALCOBÉ, X. (1998). Análisis de fases por difracción de rayos X de polvo por el método de rietveld aspectos prácticos y ejemplos.
- AMIGÓ, J. (2000) Nociones de cristalografía aplicadas al estudio de materiales policristalinos por difracción de rayos x.
- AMVA, ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ. (1999). Manejo Integral de Canteras y explotaciones mineras de materiales para la construcción en el Valle de Aburrá. Medellín.
- ASOGRAVAS. 2007. Que son los agregados. www.asogras.org. Consultado 10 de agosto de 2010.
- BESOAIN M., E. (1985). Los suelos. In: Tosso T, J. (Ed.). Suelos volcánicos de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- BOUQUETY, M.N., Descantes, L. Barcelo, F. de Larrard., y B. Clavaud. (2007). Experimental study of crushed aggregate shape. Construction and Building Materials.
- GIRALDO, M., y SÁNCHEZ, D., (2004). Cartografía geológica del contacto del cuerpo sur de la Dunita de Medellín con sus rocas asociadas. Universidad Nacional de Colombia.
- http://www.franciscorama.com/docs/conservacion_historia.pdf



- INVIAS.,(2007). Normas de ensayos de materiales para carretera, Suelos y Agregados. Norma-I.N.V.E-218-07
- KUMAR, S., (2004): Evaluation of asphalt—aggregate bond and stripping potential. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad de Texas
- RAMIREZ J, URIBE J. (1984). Inventario de Materiales Petreos para la Construcción en el Valle de Aburra. Ensayos de Laboratorio. Trabajo de grado. Universidad Nacional. Facultad de Minas.
- RAMÍREZ. I. 2008. Sostenibilidad de la explotación de materiales de construcción en el valle de aburra. Trabajo de grado de maestría. Universidad nacional de Colombia.
- TOPAL. A., y SENGOZ. B. (2005). Determination of fine aggregate angularity in relation with the resistance to rutting of hot-mix asphalt.
- CHO.Park., y HWANG.S., (2010). A predictive equation for dynamic modulus of asphalt mixtures used in Korea. Construction and Building Materials.