



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Análisis comparativo de materiales pétreos de canteras de Tungurahua
y su potencial para la elaboración de pavimentos permeables.

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Civil

Autor:

Villacís Medina Luis Daniel

Tutor:

Mg. Sc. Alfonso Patricio Arellano Barriga

Riobamba, Ecuador. 2026

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, Luis Daniel Villacís Medina, con cédula de ciudadanía 1804409926, autor del trabajo de investigación titulado: “Análisis comparativo de materiales pétreos de canteras de Tungurahua y su potencial para la elaboración de pavimentos permeables”, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mi exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 25 de junio de 2026.



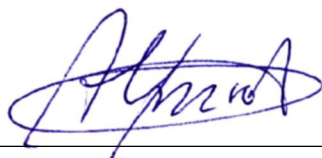
Luis Daniel Villacís Medina

C.I: 1804409926

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, Alfonso Patricio Arellano Barriga catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: “Análisis comparativo de materiales pétreos de canteras de Tungurahua y su potencial para la elaboración de pavimentos permeables”, bajo la autoría de Luis Daniel Villacís Medina; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 25 días del mes de junio de 2026.



Alfonso Patricio Arellano Barriga

C.I: 0601823313

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “Análisis comparativo de materiales pétreos de canteras de Tungurahua y su potencial para la elaboración de pavimentos permeables”, presentado por Luis Daniel Villacís Medina, con cédula de identidad número 1804409926, bajo la tutoría de Mg. Alfonso Patricio Arellano Barriga; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba, 25 de junio de 2026.

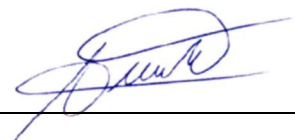
Carlos Saldaña, Mgs.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Vladimir Pazmiño, Mgs.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Andrés Marcillo, Mgs.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO





CERTIFICACIÓN

Que, **VILLACÍS MEDINA LUIS DANIEL** con CC: **1804409926**, estudiante de la Carrera de **INGENIERIA CIVIL**, Facultad de **INGENIERIA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado “**ANÁLISIS COMPARATIVO DE MATERIALES PÉTREOS DE CANTERAS DE TUNGURAHUA Y SU POTENCIAL PARA LA ELABORACIÓN DE PAVIMENTOS PERMEABLES**”, cumple con el 1 % de plagio y 9% de IA, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **COMPILATIO**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 18 de junio de 2025

Ing. Alfonso Patricio Arellano Vaca, Mgs
TUTOR

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico con profundo amor y gratitud a mis padres Daniel y Magalli, con su esfuerzo, sacrificio, apoyo incondicional y ejemplo de vida, hicieron posible mi formación personal y profesional. Cada uno de sus consejos y enseñanzas fueron la motivación para seguir adelante y alcanzar este logro.

Asimismo, se dedica a mi familia, por su comprensión, confianza y constante aliento durante todo este proceso académico.

Finalmente, esta investigación se dedica a mi hija Barbie que me inspiró a dar lo mejor de mí para cumplir esta meta.

AGRADECIMIENTO

A mis padres y a mi familia, por su apoyo incondicional, su paciencia, comprensión y confianza, valores que me impulsaron a perseverar hasta alcanzar este objetivo.

A la Universidad Nacional de Chimborazo y a la Carrera de Ingeniería Civil, por brindarme la formación académica y profesional que ha permitido fortalecer mis conocimientos y prepararme para enfrentar los retos de mi profesión.

Mi especial agradecimiento a mi tutor de tesis y a los miembros del tribunal, por su tiempo, orientación, conocimientos y valiosas observaciones, las cuales contribuyeron significativamente al desarrollo y culminación de esta investigación.

Finalmente, agradezco a todas las personas e instituciones que colaboraron de manera directa o indirecta en la realización de este trabajo de investigación, haciendo posible la consecución de este importante logro académico.

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA.....	
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
CERTIFICADO ANTIPLAGIO	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
RESUMEN	
ABSTRACT	
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1 Planteamiento del problema.	17
1.2 Justificación del problema.	18
1.3 Objetivos.....	18
1.3.1 Objetivo General.....	18
1.3.2 Objetivos Específicos.	18
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	19
2.1 Pavimentos permeables	19
2.2 Importancia de los materiales pétreos	19
2.3 Normas técnicas aplicables.....	19
2.4 Contexto regional	19
2.5 Antecedentes.....	19
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	21
3.1 Tipo y enfoque de investigación.....	21
3.2 Área de estudio	21
3.3 Muestreo	21
3.4 Ensayos de laboratorio.....	21
3.5 Análisis de resultados	21
3.6 Selección de cantera más idónea	22
CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
4.1 Resultados.....	23

4.1.1	Localización y caracterización de minas activas en la provincia de Tungurahua.....	23
4.1.2	Mina ALVORTIZ.....	23
4.1.3	Mina KUMOCHI.....	24
4.1.4	Mina VOLCÁN	25
4.1.5	Mina LAS JUNTAS.....	25
4.1.6	Mina RUMICHACA	26
4.1.7	Información geológica.....	27
4.2	Análisis de Pruebas de Laboratorio y Propiedades de los Materiales	28
4.2.1	Granulometría.....	30
4.2.2	Capacidad de Absorción	30
4.2.3	Forma y Textura Superficial	30
4.2.4	Densidad Aparente y Contenido de vacíos	31
4.2.5	Peso Específico.....	33
4.2.6	Resistencia al desgaste.....	33
4.3	Análisis Comparativo con Investigaciones Previas de Pavimentos Permeables.	34
4.3.1	Contraste de distribución granulométrica.....	35
4.3.2	Comparativa de densidades	40
4.3.3	Comparativa de la Capacidad de Absorción.....	44
4.3.4	Comparativa de la Resistencia al Desgaste	48
4.4	Elección de la cantera con que posee el material pétreo más idóneo para el diseño de pavimentos permeables.	49
4.4.1	Requisitos técnicos de los agregados para pavimentos	49
4.4.2	Selección de la cantera más adecuada	50
4.5	Discusión	51
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.		54
5.1	Conclusiones.....	54
5.2	Recomendaciones	54
BIBLIOGRAFÍA.....		
ANEXOS.....		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ensayos propuestos para la caracterización de las canteras.....	17
Tabla 2. Características geológicas de cada fuente de material pétreo [17].	27

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de las canteras seleccionadas dentro de la provincia de Tungurahua	16
Figura 2. Esquema metodológico	22
Figura 3. Ubicación y delimitación de la cantera ALVORTIZ [16].	24
Figura 4. Ubicación y delimitación de la cantera KUMOCHI [16].	25
Figura 5. Ubicación y delimitación de la cantera VOLCÁN [16].	25
Figura 6. Ubicación y delimitación de la cantera LAS JUNTAS 1 [16].	26
Figura 7. Ubicación y delimitación de la cantera RUMICHACA [16].	26
Figura 8. Resultados del Ensayo Granulométrico	29
Figura 9. Resultados del Ensayo de Absorción	29
Figura 10. Resultados del Ensayo de Textura y Forma Superficial.....	29
Figura 11. Resultados del Ensayo de Densidad Aparente	32
Figura 12. Resultados del Ensayo de Contenido de Vacíos.....	32
Figura 13. Resultados del Ensayo de Peso Especifico	32
Figura 14. Resultados del Ensayo de Resistencia al Desgaste	32
Figura 15. Curvas granulométricas de capas Base-Arena en pavimentos articulados [19]	35
Figura 16. Curvas granulométricas de capas Base-Granular en pavimentos articulados [19]	35
Figura 17. Curvas granulométricas de Subrasante en pavimentos articulados [19].....	35
Figura 18. Curvas granulométricas de las canteras estudiadas	35
Figura 19. Curvas granulométricas de capas Base en pavimentos flexibles [20]	37
Figura 20. Curvas granulométricas de Sub-base en pavimentos flexibles [20]	37
Figura 21. Curvas granulométricas de Subrasante en pavimentos flexibles [20]	37
Figura 22. Curvas granulométricas de las canteras estudiadas	37
Figura 23. Curvas granulométricas de la Sub-base en pavimentos rígidos [21]	38
Figura 24. Curvas granulométricas de la Subrasante en pavimentos rígidos [21]	38
Figura 25. Curvas granulométricas de las canteras estudiadas	38
Figura 26. Esgurrimiento vs Gravas finas subrasante[22].....	39
Figura 27. Esgurrimiento vs Gravas finas base [23].....	39
Figura 28. Peso volumétrico seco de la base granular en p. articulados [19].....	40
Figura 29. Peso volumétrico seco de la subrasante en p. articulados [19]	40
Figura 30. Peso volumétrico seco de la base cama de arena en pavimentos articulados [19]	40
Figura 31. Densidades aparentes de las canteras estudiadas	40
Figura 32. Peso volumétrico seco de la base en pavimentos flexibles [20]	42
Figura 33. Peso volumétrico seco de la subrasante en pavimentos flexibles [20]	42
Figura 34. Peso volumétrico seco de la sub-base en pavimentos flexibles [20]	42
Figura 35. Densidades aparentes de las canteras estudiadas	42

Figura 36. Peso volumétrico seco de capas granulares en pavimentos rígidos [21]	43
Figura 37. Densidades aparentes de las canteras estudiadas	43
Figura 38. Capacidad de absorción de capas granulares en pavimentos articulados [19]..	44
Figura 39. Capacidad de absorción del material pétreo de las canteras estudiadas	44
Figura 40. Capacidad de absorción de las capas finas de p. flexibles [20]	45
Figura 41. Capacidad de absorción de las capas gruesas de p. flexibles [20]	45
Figura 42. Capacidad de absorción de las capas granulares de pavimentos rígidos [21]...	45
Figura 43. Capacidad de absorción de las canteras estudiadas	45
Figura 44. Relación entre la Absorción y la infiltración en pavimentos rígidos [24]	47
Figura 45. Pérdida de masa del agregado grueso en pavimentos articulados [19].....	48
Figura 46. Pérdida de masa del agregado grueso en pavimentos flexibles [20].....	48
Figura 47. Pérdida de masa del agregado grueso en pavimentos rígidos [21]	48
Figura 48. Pérdida de masa del agregado grueso de las canteras estudiadas	48

RESUMEN

Esta investigación evalúa las propiedades físicas y mecánicas de los materiales pétreos obtenidos de cinco canteras activas en la provincia de Tungurahua que son: ALVORTIZ, KUMOCHI, RUMICHACA, LAS JUNTAS 1 Y VOLCÁN, para determinar su potencial en la elaboración de capas granulares para pavimentos permeables. La metodología se desarrolló con un enfoque cuantitativo y descriptivo comparativo mediante la recolección de muestras in situ y la ejecución de ensayos en el laboratorio de ingeniería civil de la Unach, que fueron granulometría, densidad aparente y contenido de vacíos, peso específico, capacidad de absorción y resistencia al desgaste. Los datos obtenidos se compararon con los resultados de investigaciones previas sobre pavimentos articulados, flexibles y rígidos. La comparación demostró que el comportamiento de los áridos está influenciado por su origen geológico presentando niveles de absorción y porosidad superiores a los utilizados en pavimentos convencionales. De las canteras evaluadas la cantera ALVORTIZ destacó al poseer el mejor desempeño mecánico con apenas un 28.18% de pérdida de masa por desgaste, la mayor densidad aparente de 1966 kg/m^3 , y una composición granulométrica gruesa con un 55.98% de gravas. Por otra parte, las canteras RUMICHACA y VOLCÁN mostraron una alta fragilidad que supera los límites normativos recomendados para ciertas capas de rodadura. Se concluyó que, aunque varias minas cumplen con las especificaciones básicas, el material pétreo proveniente de la cantera ALVORTIZ es el que tiene más potencial para el diseño de pavimentos permeables de las muestras analizadas porque garantiza el mejor equilibrio entre resistencia estructural y funcionalidad hidráulica para la infiltración de aguas pluviales.

Palabras clave: Pavimentos permeables, materiales pétreos, agregados, canteras de Tungurahua, infiltración, propiedades físicas y mecánicas.

ABSTRACT

This research evaluates the physical and mechanical properties of stone materials obtained from five active quarries in Tungurahua Province: ALVORTIZ, KUMOCHI, RUMICHACA, LAS JUNTAS 1, and VOLCÁN, to determine their potential for use in the construction of granular layers for permeable pavements. The methodology was developed using a quantitative, descriptive, and comparative approach through in situ sample collection and laboratory testing conducted at the Civil Engineering Laboratory of UNACH. The tests included particle size distribution, bulk density and void content, specific gravity, water absorption capacity, and abrasion resistance. The data obtained were compared with the results of previous studies on interlocking, flexible, and rigid pavements. The comparison demonstrated that the behavior of the aggregates is influenced by their geological origin, exhibiting higher absorption and porosity levels than those commonly used in conventional pavements. Among the evaluated quarries, ALVORTIZ showed the best mechanical performance, with only 28.18% mass loss due to abrasion, the highest bulk density of 1,966 kg/m³, and a coarse gradation consisting of 55.98% gravel. In contrast, the RUMICHACA and VOLCÁN quarries exhibited high fragility, exceeding the recommended regulatory limits for certain wearing courses. It was concluded that, although several quarries meet the basic specifications, the stone material from the ALVORTIZ quarry has the greatest potential for the design of permeable pavements among the analyzed samples, as it provides the best balance between structural strength and hydraulic functionality for stormwater infiltration.

Keywords: Permeable pavements, stone materials, aggregates, Tungurahua quarries, infiltration, physical and mechanical properties.

Reviewed by:

Ms.C. Ana Maldonado León

ENGLISH PROFESSOR

C.I.0601975980

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

El creciente desarrollo urbano y la expansión de la infraestructura vial han generado una mayor demanda de materiales pétreos que cumplan con las especificaciones técnicas necesarias para garantizar la durabilidad y funcionalidad de las obras civiles. La aplicación de pavimentos permeables se ha consolidado como una solución sostenible para la gestión de aguas pluviales y escorrentías, al permitir la infiltración del agua en el subsuelo, reduciendo el riesgo de inundaciones y mejorando la recarga de acuíferos [1]. Esta característica se produce por su alto contenido de vacíos interconectados, en un orden de 15% a 35% dependiendo de los materiales usados y su aplicación [2]. La permeabilidad de estas infraestructuras contribuye a mitigar los efectos de la urbanización sobre el ciclo hidrológico y también promueve prácticas de construcción más responsables con el medio ambiente.

El concreto permeable, conocido también como concreto poroso es una mezcla de árido grueso, cemento y agua, en cantidades adecuadas para crear una masa de partículas gruesas que se mantiene adherida por una capa delgada de pasta [3]. El contenido de agregado fino es limitado en la mezcla permeable, porque compromete a la interconexión de los vacíos dentro del concreto y esto genera la reducción de la infiltración de agua dentro de la infraestructura [4].

Para asegurar el correcto desempeño de este tipo de pavimentos, es necesario conocer a detalle las propiedades físicas e hidráulicas de los agregados pétreos utilizados en sus capas constitutivas. Características como la granulometría y resistencia a la abrasión son determinantes para garantizar un equilibrio entre permeabilidad y estabilidad estructural. Estudios recientes destacan que la elección adecuada de agregados, junto con un control óptimo de la compactación, influye directamente en la porosidad y durabilidad de estas estructuras [5]. También, [6] evidencian que el tamaño de los agregados y su proporción en la mezcla tiene una correlación directa con las propiedades hidráulicas y mecánicas del pavimento, lo que muestra la necesidad de una caracterización detallada de los materiales pétreos antes de su uso con objetivos de alcanzar niveles adecuados de permeabilidad.

En Tungurahua, existen varias canteras que suministran materiales pétreos para proyectos viales y de construcción. La mayoría de estas canteras, aunque se encuentran registradas en el catastro minero no disponen de información sobre las características específicas de sus agregados pétreos, y menos en el contexto de sus propiedades hidráulicas y permeables. El estudio de estas fuentes y de los materiales que producen es importante para evaluar su idoneidad y optimizar los procesos de selección y aplicación de materiales en estructuras drenantes [7].

La UNACH está ejecutando el proyecto llamado “Uso de materiales andinos para la construcción de pavimentos permeables sostenibles” desde hace más de 1 año. En la primera fase de este proyecto ha recolectado las características físicas, mecánicas e hidráulicas en varias vías de la región, en pavimentos rígidos, flexibles y articulados. En la segunda fase se ha determinado cuales de esas variables están correlacionadas con la escorrentía o la infiltración en cada tipo de pavimento separadamente. Los resultados de esto indican que la

presencia de material pétreo grueso (gravas y arenas) en la subrasante y en la subbase permiten más infiltración en la estructura. La presencia de finos taponaría la estructura y aumenta el escurrimiento. Las acciones de compactación los acomodan, pero su distribución dependería de algunas propiedades físicas de los materiales que se usan en los estratos que conforman el pavimento.

En este contexto, el estudio también abre la posibilidad de evaluar “Materiales alternativos en la producción de hormigones y mampuestos”, especialmente aquellos de origen andino o subutilizados en la región, con el fin de mejorar la permeabilidad, reducir la generación de finos y promover soluciones constructivas más sostenibles. Esto redirige la investigación a profundizar el estudio de las propiedades físicas de los materiales pétreos que se extraen de las canteras locales, con el fin de generar información detallada que pueda ser utilizada para la aplicación de prototipos de pavimentos con mayor infiltración y menor escurrimiento.

Por lo tanto, la presente investigación tiene como objetivo determinar las siguientes propiedades físicas de los materiales pétreos provenientes de cinco canteras de la provincia de Tungurahua, mediante la ejecución de ensayos de laboratorio en las instalaciones de la UNACH.

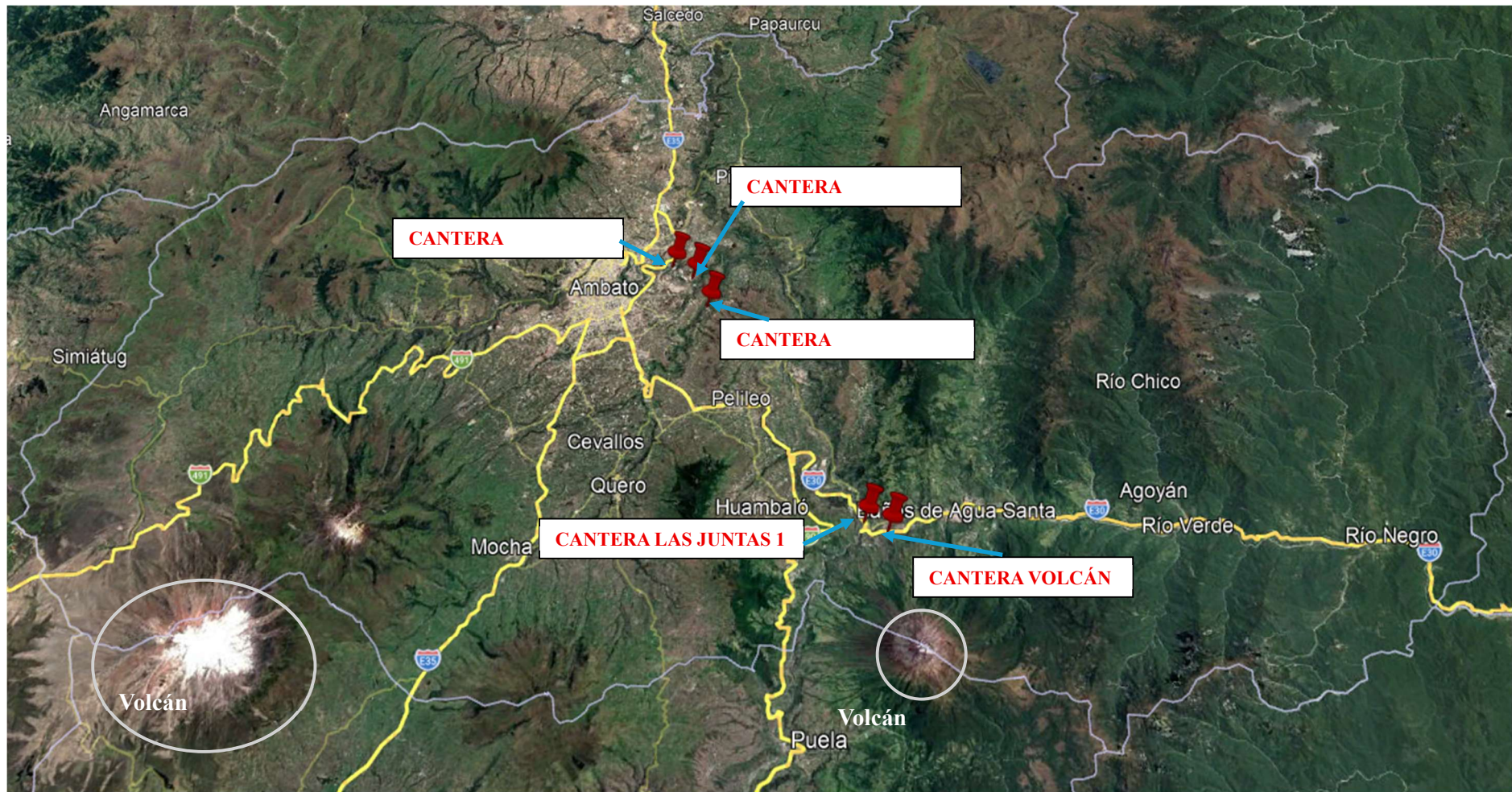


Figura 1. Ubicación de las canteras seleccionadas dentro de la provincia de Tungurahua

Tabla 1. *Ensayos propuestos para la caracterización de las canteras.*

Propiedades físicas		
Propiedad	Ensayo / Norma típica	Importancia o relevancia
Granulometría	ASTM C136 / NTE INEN 696	Permite determinar la curva de gradación óptima para alcanzar la máxima densidad y mínima porosidad del agregado combinado (arena + grava).
Peso específico y absorción por capilaridad	ASTM C127 (grueso), ASTM C128 (fino)	Necesario para calcular la relación volumen/sólido y ajustar la cantidad de agua efectiva.
Densidad real y aparente compactada	ASTM C29	Base del método de densidad óptima, ya que el punto de máxima densidad indica la proporción ideal de finos y gruesos.
Contenido de vacíos, densidad óptima	Derivado de ASTM C29	Se busca minimizarlo para optimizar la dosificación del hormigón.
Forma y textura superficial	ASTM D4791, ASTM C1252	Influye en la trabajabilidad y adherencia pasta-agregado; los agregados angulosos ofrecen mejor adherencia.
Resistencia al desgaste (Los Ángeles)	ASTM C131 / ASTM C535	Evalúa la resistencia mecánica del agregado frente a abrasión y fricción durante mezclado o compactado.

Los resultados obtenidos servirán como base para recomendar la elección de las canteras que produzcan materiales pétreos que se ajusten a los requerimientos necesarios para pavimentos permeables. Este tema de investigación pertenece al Proyecto “Uso de materiales andinos para el diseño sostenible de pavimentos permeables sostenibles”.

1.1 Planteamiento del problema.

Los pavimentos permeables son una alternativa sostenible para la gestión de aguas pluviales y escorrentías que pueden generar problemáticas como inundaciones, erosión de suelos y disminución de la recarga de acuíferos. Estos permiten la infiltración del agua de lluvia y reducen el escurrimiento superficial [8].

El desempeño hidráulico y estructural de estos pavimentos dependen directamente de las propiedades de los materiales pétreos utilizados en su construcción. Estos materiales deben cumplir requisitos técnicos que garanticen la permeabilidad, estabilidad estructural y durabilidad del pavimento. Sin embargo, en Tungurahua, la información disponible de acceso público y académico relacionada con las características de los materiales pétreos provenientes de las canteras activas es muy escasa.

Los estudios sobre materiales pétreos en la provincia no están enfocadas en este tipo de pavimentos permeables y se concentran principalmente en aplicaciones tradicionales para obras civiles [9]. Esta falta de información dificulta la evaluación de fuentes de agregados y materiales locales, lo que limita la aplicación de pavimentos permeables.

1.2 Justificación del problema.

La presente investigación se justifica por la necesidad de generar información técnica confiable y de acceso público sobre las propiedades de los materiales pétreos extraídos de las canteras de la provincia de Tungurahua, específicamente en relación con su aplicabilidad en la elaboración de pavimentos permeables. Actualmente, la información limitada dificulta la adecuada selección de agregados destinados a los estratos que conforman este tipo de pavimentos.

Identificar cual cantera de Tungurahua produce materiales que se ajusten de mejor manera a los requerimientos técnicos establecidos para pavimentos permeables permitirá optimizar el uso de los recursos pétreos locales. De esta forma los resultados del estudio contribuirán a mejorar la calidad técnica de los proyectos que incorporen pavimentos permeables, reduciendo riesgo de fallas y costos extra.

La investigación aportará datos actualizados y específicos sobre la caracterización física e hidráulica de los materiales pétreos locales y sus canteras de origen, relacionados con pavimentos permeables.

Así mismo, el estudio facilitará la comparación objetiva de canteras, estableciendo criterios técnicos claros para la selección de agregados.

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo General.

- Analizar las principales características de materiales pétreos provenientes de cinco canteras de la provincia de Tungurahua para establecer su potencial en la aplicación de capas granulares destinadas a conformar pavimentos permeables.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Localizar y caracterizar 5 minas activas en la provincia de Tungurahua para obtener las muestras de material pétreo.
- Realizar las pruebas de Laboratorio en la UNACH, para obtener el análisis granulométrico, el peso específico y absorción por capilaridad, densidad real aparente y compactada, contenido de vacíos, densidad óptima, forma y textura superficial, resistencia al desgaste.
- Comparar esas características con las obtenidas en las investigaciones previas del proyecto Uso de materiales andinos para el diseño sostenible de pavimentos permeables.
- Identificar la cantera que produce los materiales pétreos que mejor se ajusten a los requisitos técnicos establecidos para capas granulares de pavimentos permeables.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Pavimentos permeables

Los pavimentos permeables son sistemas constructivos diseñados para permitir la infiltración del agua de lluvia hacia el subsuelo, reduciendo el escurrimiento superficial y favoreciendo la recarga de acuíferos. A diferencia de los pavimentos tradicionales, están compuestos por capas de materiales con alto grado de porosidad, lo que facilita el paso del agua a través de la estructura [1].

2.2 Importancia de los materiales pétreos

El desempeño de un pavimento permeable está estrechamente vinculado a las propiedades físicas, mecánicas e hidrológicas de los agregados utilizados. La granulometría, por ejemplo, influye directamente en la porosidad del sistema, una distribución adecuada de tamaños permite el desarrollo de espacios interconectados entre partículas, facilitando el paso del agua [6]. También, la compactación controlada influye en la resistencia del sistema sin comprometer excesivamente su permeabilidad [5].

2.3 Normas técnicas aplicables

En primera instancia, se adoptan las normas de la American Society for Testing and Material (ASTM), las cuales proporcionan los estándares internacionales de referencia para la ejecución técnica y los rangos de tolerancia en los ensayos de materiales. Complementariamente, se aplican las Normas Técnicas Ecuatorianas (NTE INEN), garantizando que el estudio cumpla con las exigencias regulatorias y los requisitos de calidad vigentes en el país. Finalmente, la metodología se apoya en las adaptaciones de ensayos de laboratorio validadas en tesis de grado de la Universidad Nacional de Chimborazo, integrando procedimientos específicos y criterios técnicos que han demostrado ser efectivos para las condiciones particulares de los materiales y equipos disponibles en el Laboratorio de Ingeniería Civil.

2.4 Contexto regional

La provincia de Tungurahua cuenta con varias canteras activas que suministran agregados para obras civiles. Sin embargo, existe una limitada caracterización técnica de estos materiales en relación con su uso en soluciones sostenibles como los pavimentos permeables [9]. Esta falta de información obstruye la toma de decisiones sobre que materiales usar, además de su procedencia, lo que resalta la necesidad de un estudio enfocado en evaluar localmente la calidad de los materiales disponibles.

2.5 Antecedentes

Existen investigaciones en diferentes regiones que han demostrado que la calidad y características de los agregados pueden variar significativamente, afectando directamente el rendimiento de obras civiles. [10] recopila información sobre ciertas propiedades como el contenido de humedad, permeabilidad, granulometría y densidad de materiales pétreos procedente de tres canteras de la provincia. Sin embargo, su enfoque es la determinación de concentración y exhalación de radón-222. Así mismo, [9] en su investigación explora las

características de los agregados gruesos y finos de la cantera “Mina Mora” centrándose en determinar su permeabilidad, para comprobar que su uso en obras de drenaje sea idóneo.

También las investigaciones del proyecto “Uso de materiales andinos para el diseño sostenible de pavimentos permeables”, realizan el análisis de las propiedades de capas granulares en pavimentos, flexibles, articulados y rígidos, para finalmente establecer correlaciones entre propiedades físicas e hidráulicas.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.

3.1 Tipo y enfoque de investigación.

La investigación se desarrollará bajo un enfoque cuantitativo, de tipo descriptivo-comparativo, ya que busca caracterizar técnicamente materiales pétreos de distintas canteras y comparar sus propiedades con los requerimientos establecidos para pavimentos permeables.

3.2 Área de estudio

El estudio se desarrollará en la provincia de Tungurahua, considerando cinco canteras activas que abastecen de materiales pétreos a obras civiles. Estas canteras serán seleccionadas en función de su representatividad, accesibilidad y volumen de producción.

3.3 Muestreo

Se recolectarán muestras representativas de los materiales pétreos producidos por cada cantera. Las muestras serán tomadas directamente en sitio o en los puntos de acopio, siguiendo procedimientos técnicos que aseguren su representatividad.

3.4 Ensayos de laboratorio

Las muestras recolectadas serán sometidas a ensayos físicos y granulométricos conforme a normas técnicas nacionales e internacionales. Los ensayos por realizarse serán:

- Granulometría: ASTM C136 / NTE INEN 696
- Peso específico y absorción por capilaridad: ASTM C127 (grueso), ASTM C128 (fino)
- Densidad real aparente y compactada: ASTM C29
- Contenido de vacíos, densidad optima: Derivado de ASTM C29
- Forma y textura superficial: ASTM D4791, ASTM C1252 (Adaptación para el laboratorio de Ingeniería Civil de la Unach)
- Resistencia al desgaste (Los Ángeles): ASTM C131 / ASTM C535

Estos ensayos permitirán evaluar la aptitud de los materiales para su uso en pavimentos permeables, su elección se fundamenta en los requerimientos específicos para estructuras de pavimentos permeables, donde la granulometría y el contenido de vacíos son variables que gobiernan la porosidad interconectada, por ende, la capacidad de permeabilidad e infiltración hidráulica del sistema [11]. Así mismo, la evaluación de la resistencia al desgaste mediante el ensayo de la Máquina de Los Ángeles y la caracterización de la forma y textura superficial garantizan que los agregados soporten cargas de tráfico previstas sin sufrir degradación mecánica o trituración, fenómenos que reducirían frásticamente el índice de vacíos por colmatación y comprometerían la vida útil de la estructura del pavimento [12].

3.5 Análisis de resultados

Se realizará una comparación directa entre las propiedades de los materiales de cada cantera y los requisitos técnicos establecidos por el Ministerio de Transporte y Obras

Públicas en las especificaciones generales MOP-001-F [13], determinando el grado de cumplimiento de cada una.

3.6 Selección de cantera más idónea

La selección de la cantera más idónea se determinó mediante la comparación directa de los resultados de laboratorio de las fuentes de estudio (Alvortiz, Kumochi, Las Juntas 1, Volcán y Rumichaca) frente a los requisitos técnicos para capas granulares establecidos por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas [13] y además, con las características de los pavimentos analizados en el proyecto “Uso de materiales andinos para la construcción de pavimentos permeables sostenibles”.

El proceso por llevar a cabo para la caracterización de los materiales pétreos se presenta en la Figura 1.

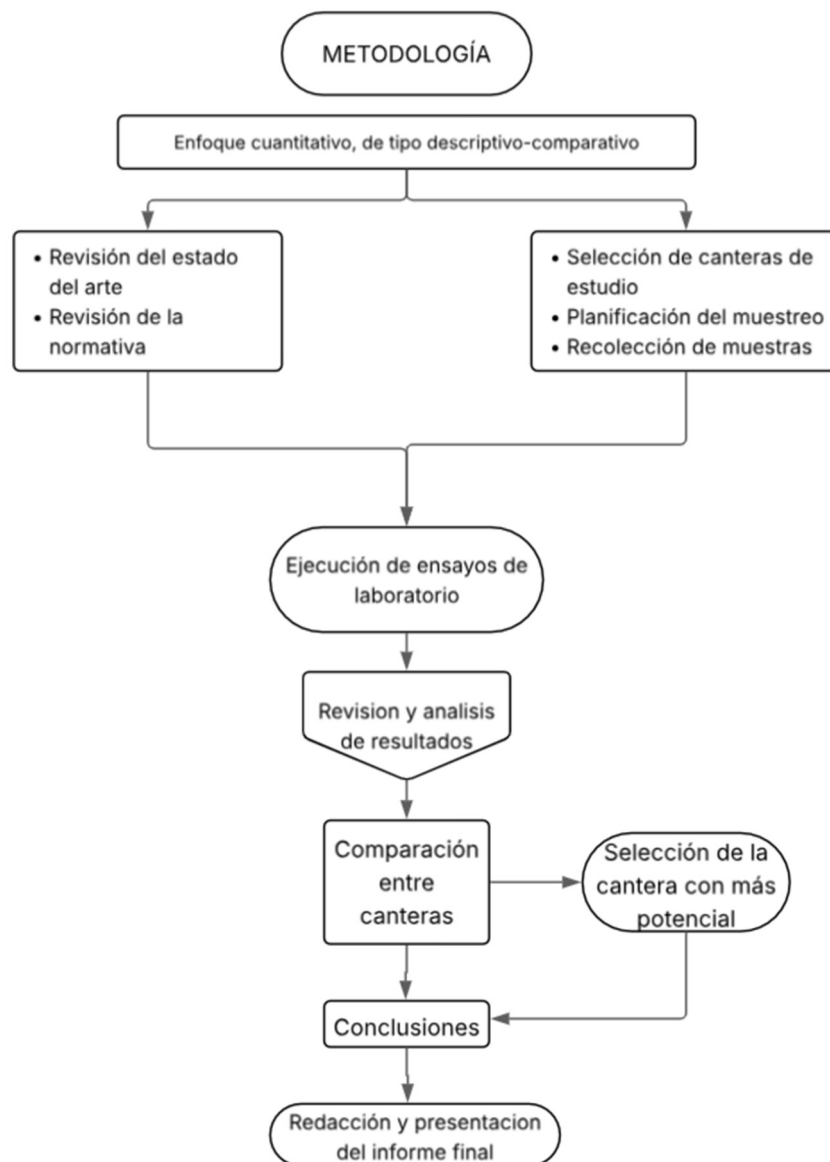


Figura 2. Esquema metodológico

CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados

4.1.1 Localización y caracterización de minas activas en la provincia de Tungurahua.

La fase inicial de los resultados comprende la identificación y validación de las fuentes de materiales pétreos. Se procedió con la localización y delimitación de las zonas de extracción. Para este estudio se seleccionaron fuentes estratégicas ubicadas en la provincia de Tungurahua, las cuales se eligieron siguiendo varios criterios que garanticen la representatividad y calidad de los áridos.

En primer lugar, se consideraron solamente canteras que se encuentren activas, también se aplicó un criterio de accesibilidad y logística, seleccionando los frentes de explotación con rutas de transporte viables que aseguren un suministro constante a la provincia. Finalmente, se verificó el estatus legal y ambiental de cada sitio, así como también su preponderancia en el mercado local y su trayectoria como proveedores principales de materiales pétreos.

La caracterización de las minas seleccionadas permitió identificar fuentes de explotación con diferentes formaciones geológicas, evidenciando una notable variabilidad en el origen y naturaleza de los materiales pétreos. Se observaron áridos provenientes de depósitos aluviales y coluviales, caracterizados por partículas redondeadas y superficies lisas, así como también materiales derivados de estratos de roca volcánica, los cuales presentan formas más angulares, texturas rugosas y mayor grado de trituración natural. Estas diferencias influyen directamente en propiedades como la adherencia con la pasta cementante, la resistencia mecánica y el comportamiento frente al desgaste [14].

También, se identificaron variaciones en la composición mineralógica y en la distribución granulométrica de los materiales, aspectos que impactan en su desempeño dentro de mezclas de hormigón o capas estructurales de pavimentos [15]. Las características observadas constituyen la base para interpretar de manera adecuada los resultados de los ensayos de laboratorio, permitiendo establecer relaciones entre el origen del material y sus propiedades físicas y mecánicas.

Aunque en el registro oficial del Geoportal de Catastro Minero [16] se muestra en la inscripción de las canteras que el material de interés es la arena, en la práctica operativa estas canteras también extraen, procesan y comercializan material pétreo grueso (gravas y triturados).

4.1.2 Mina ALVORTIZ

La concesión minera “ALVORTIZ”, identificada con el Código Catastral 200465 pertenece a la empresa Alvarado Ortiz Constructores Cia. Ltda., se encuentra legalmente inscrita desde el 14 de mayo de 2002 y opera bajo el régimen de pequeña minería. La cantera se localiza en la provincia de Tungurahua, cantón Ambato, parroquia Pishilata, abarcando una superficie total de 12 hectáreas [16]. El punto de extracción de la muestra se sitúa en la Zona 17S, bajo las coordenadas X=768942.00, Y=9862733.00, a una altitud de 2389 msnm,

el acceso a esta cantera se lo realiza por la Vía a las Viñas. Actualmente, el proyecto se encuentra en la fase de exploración-explotación, teniendo como mineral de interés principal la arena destinada a materiales de construcción. Esta cantera constituye una de las fuentes más relevantes de áridos en la zona urbana del cantón.

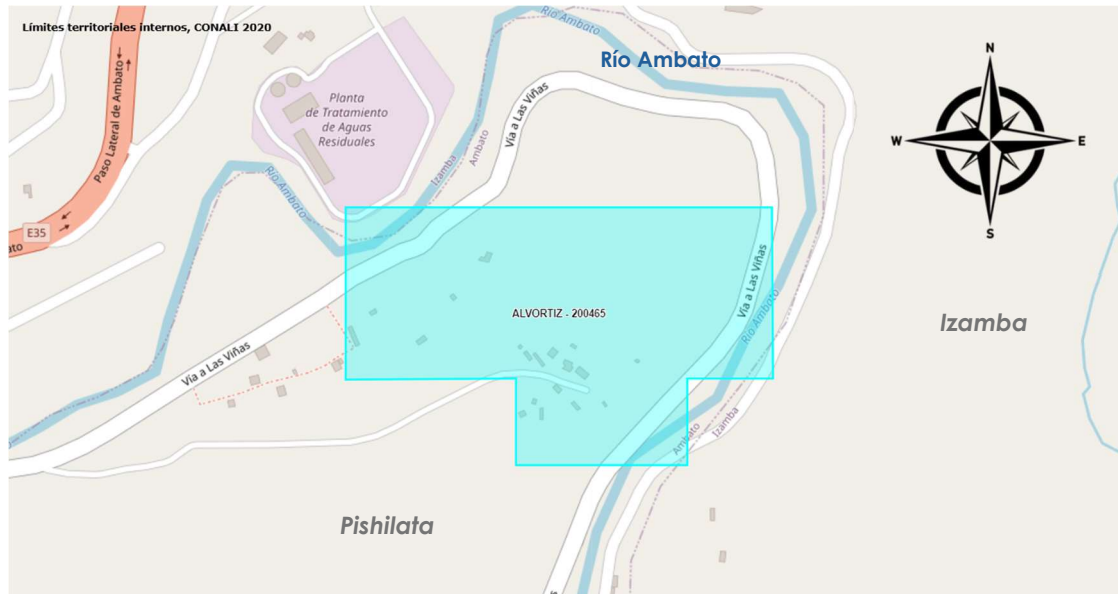


Figura 3. Ubicación y delimitación de la cantera ALVORTIZ [16].

4.1.3 Mina KUMOCHI

La segunda fuente de materiales seleccionada para la investigación corresponde a la concesión minera “KUMOCHI”, registrada bajo el Código Catastral 200485. La titularidad de esta cantera pertenece a Alday Janke Joan Cristin y se encuentra legalmente inscrita desde el 23 de octubre de 2002. Al igual que la fuente anterior, opera bajo el régimen de Pequeña Minería y se sitúa en la fase de explotación [16].

La cantera se encuentra en la provincia de Tungurahua, cantón Ambato, parroquia Izamba. Cuenta con una superficie de 6 hectáreas destinadas a la extracción de arena como material de construcción. El punto de muestreo se localiza en las coordenadas $X=770286.00$, $Y=9861853.00$, a una altitud de 2349 msnm, el acceso a la cantera se lo realiza por la Vía E35, también conocida como Paso Lateral Norte. Esta cantera representa un punto de suministro clave para el norte del cantón y permite comparar sus propiedades con la primera fuente de la misma región.

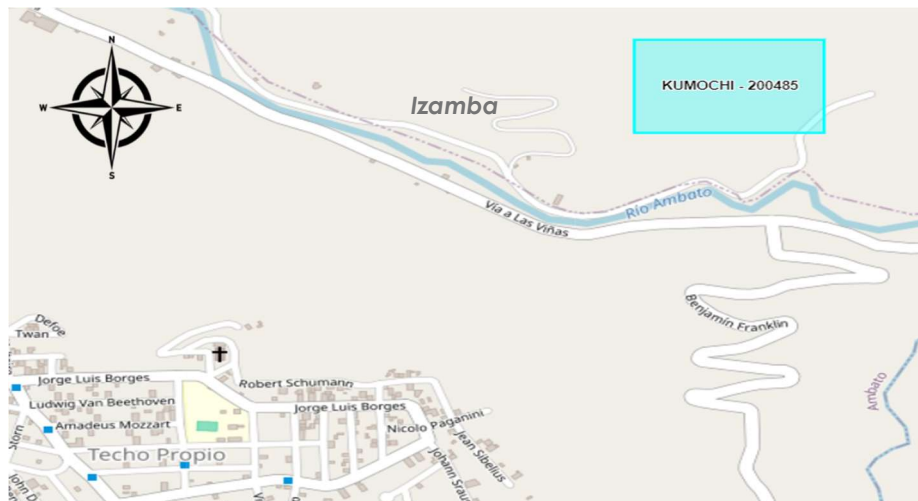


Figura 4. Ubicación y delimitación de la cantera KUMOCHI [16].

4.1.4 Mina VOLCÁN

La tercera fuente de suministro considerada en este estudio es la concesión denominada “CANTERA VOLCÁN”, identificada con el Código Catastral 290561. La titularidad de esta pertenece a Urquiza Pérez Pricela Verónica y se encuentra legalmente inscrita desde el 11 de octubre de 2012. A diferencia de las fuentes anteriores, esta opera bajo el régimen de Minería Artesanal. Se sitúa en la provincia de Tungurahua, cantón Baños, parroquia Baños, abarcando una superficie de 4 hectáreas, el material de interés es la arena [16]. El punto de extracción se ubica en las coordenadas $X=782451.00$, $Y=9844250.00$, a una altitud de 1991 msnm, el acceso a la cantera se lo realiza por la Vía Pelileo-Baños. La inclusión de esta cantera es relevante para evaluar si la procedencia geográfica influye significativamente en las propiedades de los áridos utilizados en la provincia.



Figura 5. Ubicación y delimitación de la cantera VOLCÁN [16].

4.1.5 Mina LAS JUNTAS

La cuarta fuente de extracción integrada al estudio es la concesión minera “LAS JUNTAS 1”, registrada con el Código Catastral 200989. Esta cantera, cuya titularidad corresponde a Núñez López Luis Alfonso, se encuentra legalmente inscrita desde el 2 de abril de 2013. Opera bajo el régimen de Pequeña Minería y se halla en la fase de exploración-

explotación. La mina se encuentra en la provincia de Tungurahua, cantón San Pedro de Pelileo, en la parroquia San Pedro de Pelileo, con una superficie total de 5 hectáreas [16]. El mineral de interés es la arena, el punto de control para esta fuente se sitúa en las coordenadas $X=781042.30$, $Y=9844825.88$, a una altitud de 1941 msnm. Esta cantera permite evaluar las propiedades de los áridos en el sector oriental de la provincia.

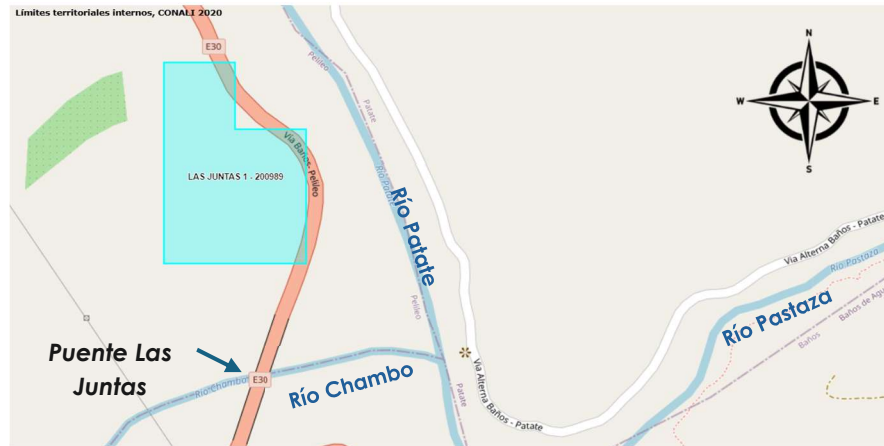


Figura 6. Ubicación y delimitación de la cantera LAS JUNTAS 1 [16].

4.1.6 Mina RUMICHACA

La quinta fuente de materiales integrada al proyecto de investigación es la concesión denominada “RUMICHACA”, registrada con el Código Catastral 291040. La titularidad de esta corresponde a Yauli Chaglla Luis Hernan, encontrándose legalmente inscrita desde el 22 de diciembre de 2014. Esta unidad opera bajo el régimen de Pequeña Minería y se halla en la fase de exploración-explotación. La cantera se localiza en la provincia de Tungurahua, cantón San Pedro de Pelileo, en la parroquia El Rosario (Rumichaca). La cantera abarca una superficie de 7 hectáreas destinadas a la extracción de arena para materiales de construcción [16]. El punto de muestreo se sitúa en las coordenadas $X=771291.26$, $Y=9859690.39$, a una altitud de 2502 msnm. Esta fuente permite analizar las propiedades de los agregados en un sector de transición geológica dentro del cantón Pelileo.

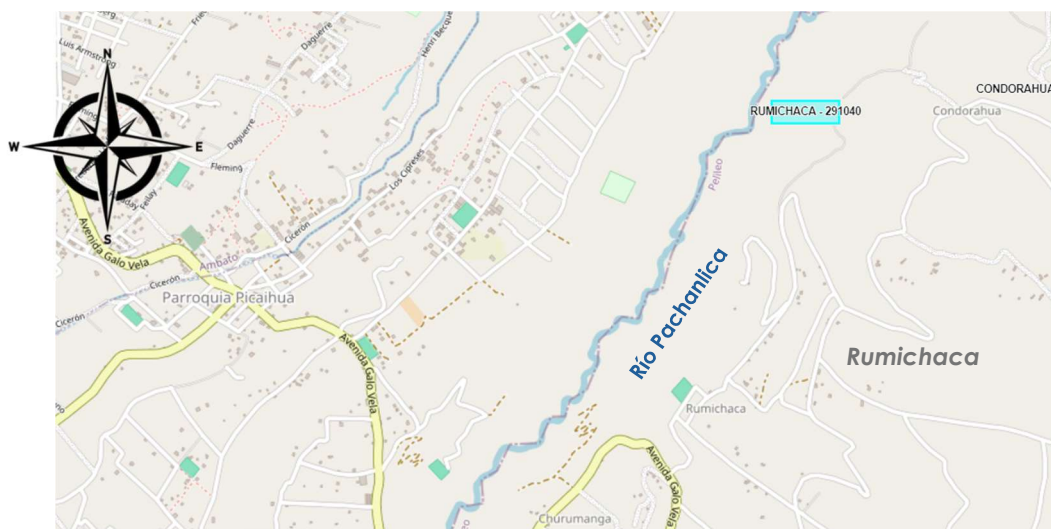


Figura 7. Ubicación y delimitación de la cantera RUMICHACA [16].

4.1.7 Información geológica

Tabla 2. Características geológicas de cada fuente de material pétreo [17].

Cantera	Formación	Composición	Textura superficial	Drenaje	Unidad morfológica	Profundidad aproximada
ALVORTIZ	Formación Latacunga	Lahares, brechas, lavas andesíticas-basálticas, tobas, areniscas, lutitas y conglomerados	Franco	Bueno	Vertiente rectilínea con fuerte disección	Moderadamente profundo
KUMOCHI	Depósitos coluvio aluviales	Fragmentos de rocas volcánicas de composición intermedia a ácida, principalmente andesitas, dacitas y riolitas	Franco arenoso	Bueno	Coluvio aluvial reciente	Moderadamente profundo
VOLCÁN	Lavas del Tungurahua	Lavas andesíticas y dacíticas de textura porfídica, plagioclasa y piroxenos	Franco arenoso	Excesivo	Flujo de lava antigua	Poco profundo
LAS JUNTAS 1	Depósitos aluviales (terrazas)	Gravas, cantos rodados y bloques de naturaleza volcánica (andesitas y dacitas).	Franco arenoso	Bueno	Terraza media	Poco profundo
RUMICHACA	Formación Latacunga	Lahares, brechas, lavas andesíticas-basálticas, tobas, areniscas, lutitas y conglomerados	Franco arenoso	Bueno	Vertiente rectilínea	Moderadamente profundo

4.2 Análisis de Pruebas de Laboratorio y Propiedades de los Materiales

La caracterización de los agregados pétreos constituye una etapa fundamental y obligatoria en el desarrollo de cualquier proyecto de infraestructura vial o edificación, ya que las propiedades de estos materiales dictan directamente el comportamiento mecánico, la trabajabilidad y la vida útil de las mezclas asfálticas o capas granulares. El presente análisis surge de la necesidad de evaluar técnicamente la calidad de los materiales extraídos de diversas zonas de explotación en la región central del país. Para este propósito, se llevó a cabo un programa de ensayos en los laboratorios de la Universidad Nacional de Chimborazo, bajo condiciones controladas y siguiendo los protocolos establecidos por las normas internacionales ASTM y la NEC. Esta fase permite transformar los datos obtenidos en el laboratorio en indicadores técnicos que permitan determinar el potencial de uso en pavimentos permeables de los áridos provenientes de las canteras Alvortiz, Kumochi, Volcán, Las Juntas 1 y Rumichaca.

La interpretación de los datos que se detallan a continuación no solo se limita a la exposición de cifras, sino a una evaluación comparativa del origen geológico de los materiales pétreos de la provincia de Tungurahua. En este sentido, entender como las condiciones de origen y la naturaleza mineralógica de cada cantera influyen en parámetros como la porosidad, la capacidad de absorción y resistencia.

El desglose de resultados se ha organizado de manera gráfica para facilitar su comprensión. Se inicia con la distribución granulométrica, factor que influye en el empaquetamiento de las partículas, seguido por el análisis de las densidades y el contenido de vacíos, los cuales son determinantes para el cálculo de dosificaciones y control de pesos volumétricos. Posteriormente, se abordan las propiedades de absorción y capilaridad, indicadores relevantes para prever la permeabilidad de las capas que conformaran. Finalmente, se presenta el análisis de resistencia al desgaste mediante la Máquina de los Ángeles, proporcionando una métrica clara sobre la dureza y tenacidad de los agregados bajo esfuerzos de abrasión e impacto.

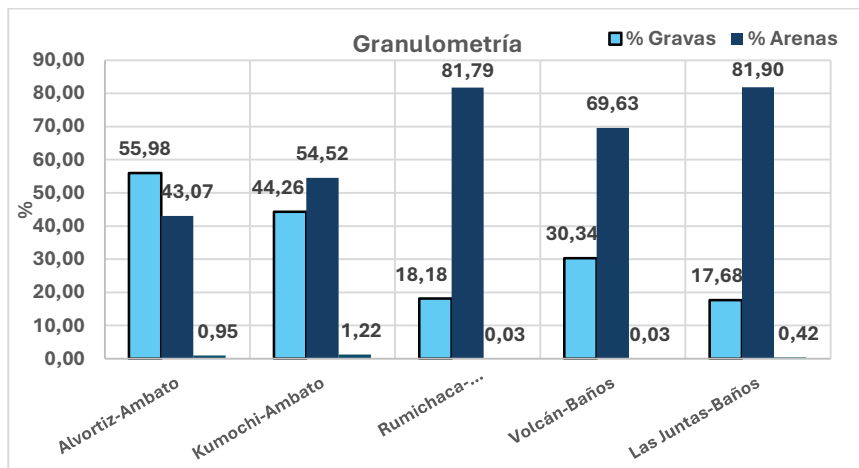


Figura 8. Resultados del Ensayo Granulométrico

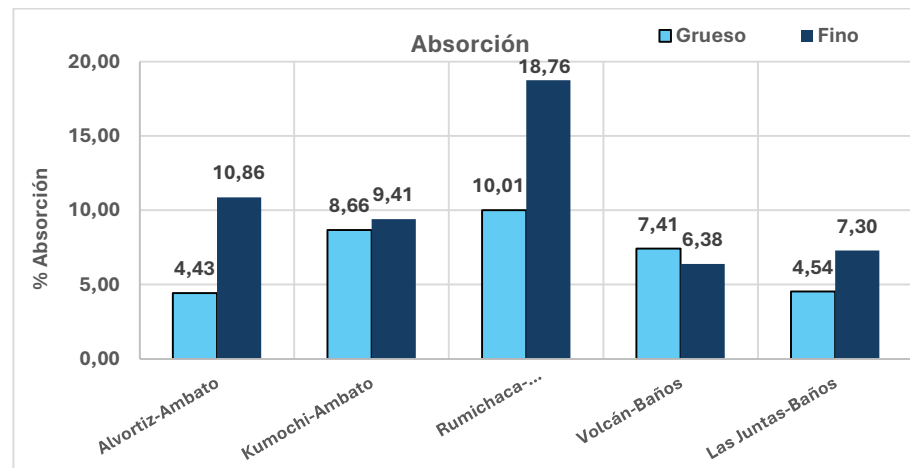


Figura 9. Resultados del Ensayo de Absorción

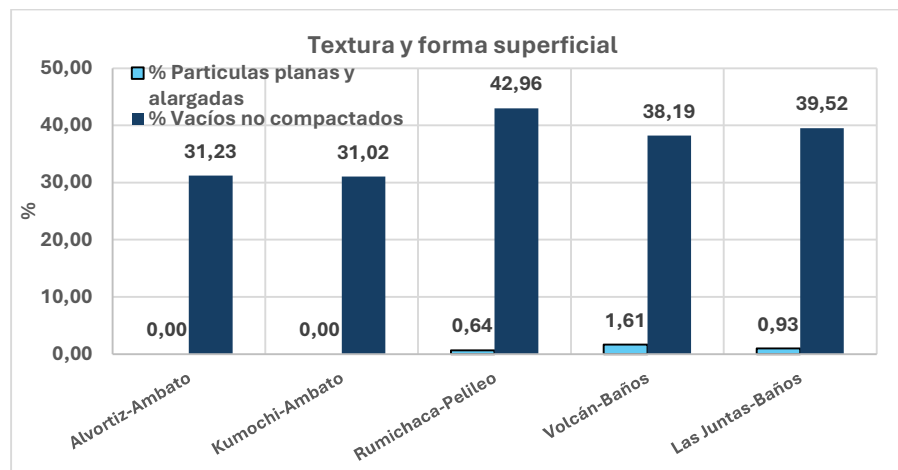


Figura 10. Resultados del Ensayo de Textura y Forma Superficial

4.2.1 Granulometría

En la Figura 8, se pueden observar los resultados del ensayo granulométrico, el cual determina la proporción de tamaños presentes en cada muestra, lo cual es importante para el empaquetamiento del material en capas granulares para pavimentos permeables.

La cantera ALVORTIZ, presenta la composición granular más robusta con un 55,98% de gravas, siendo la única mina predominantemente gruesa del estudio. KUMOCHI muestra una distribución equilibrada, casi de 50/50, con 44,26% de gravas y 54,52% de arenas. Estas dos canteras ubicadas en Ambato muestran porcentajes muy cercanos en la distribución de sus partículas.

En Pelileo, en la mina RUMICHACA, se presenta una composición de 81,79% de arenas, al igual que en Baños en las canteras VOLCAN y LAS JUNTAS 1, que están conformadas mayoritariamente por arenas con 69,63% y 81,90%.

4.2.2 Capacidad de Absorción

La absorción indica cuanta agua retiene el material, lo que afecta su permeabilidad, los resultados de este ensayo se pueden observar en la Figura 9.

La cantera ALVORTIZ registra la menor capacidad de absorción en agregados gruesos con un 4.43%, exhibiendo el comportamiento óptimo frente a la estabilidad de la mezcla, aunque su fracción fina retiene un 10.86%. A continuación, la fuente LAS JUNTAS 1 presenta un valor favorable de 4.54% en gruesos y 7.30% en finos.

En el sector de Baños, se evidencia una marcada diferencia en la capacidad de absorción al contrastar la fuente anterior con la cantera VOLCAN, la cual exhibe un incremento moderado con valores de 7.41% en gruesos y 6.38% en finos. Esta variación se explica a partir de sus rasgos geológicos: la mina VOLCAN posee un origen geológico estrictamente volcánico, caracterizado por matrices vítreas con alta porosidad y micro vacíos, mientras que LAS JUNTAS 1 corresponde a un depósito de origen aluvial, cuyos materiales han sufrido procesos de transporte, desgaste y acomodo que reducen notablemente su porosidad superficial.

Siguiendo la tendencia decreciente en la calidad del material, la fuente KUMOCHI presenta valores elevados y desfavorables, con un 8.66% de absorción en su porción gruesa y un 9.41% en la fracción fina.

Finalmente, la cantera RUMICHACA registra los valores más altos y críticos de todo el estudio, alcanzando un 10.01% de absorción en su fracción gruesa y un 18.76% en la fina. Estos porcentajes superan los límites máximos permisibles establecidos en las especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes MOP-001-F del Ministerio de Transporte y Obras Publicas [13].

4.2.3 Forma y Textura Superficial

Este análisis mide el acomodo de las partículas y la presencia de formas irregulares que puedan debilitar el material.

Como se observa en la Figura 10, ALVORTIZ y KUMOCHI no presentan partículas planas o alargadas (0%), y sus vacíos se mantienen bajos. Esto debido a su origen aluvial ya que presentan formas como cantos rodados por el arrastre de las corrientes de agua.

RUMICHACA presenta el mayor índice de vacíos no compactados (42,96%) lo que se traduce a un acomodo de partículas muy bajo lo que debilitaría las capas que pudiera conformar. Su porcentaje de partículas planas o alargadas es de 0.64%.

Las canteras VOLCAN y LAS JUNTAS 1, tienen valores casi idénticos de vacíos no compactados (38,19% y 39,52%) y su porcentaje de partículas planas o alargadas son de 1,61% y 0.93%.

Para estándares de materiales pétreos a usarse en capas granulares o mezclas asfálticas, el porcentaje máximo de partículas planas o alargadas debe ser menor al 10% cuando la relación ancho-espesor sea 1:5 [13], por lo que todas las canteras de la región cumplen bastante bien con este requerimiento.

4.2.4 Densidad Aparente y Contenido de vacíos

Este ensayo (Figura 11 y 12) mide el volumen de espacios de aire entre las partículas de los agregados, así como la relación de compactación reflejada en la densidad aparente del material. Un alto contenido de vacíos suele requerir más cemento o asfalto para lograr una mezcla densa, mientras que una mayor densidad aparente indica un mejor empaquetamiento de las partículas y una estructura más estable. Cabe señalar que este ensayo se ejecutó sobre una muestra en estado natural, el material no fue sometido a procesos previos de tamizado o segregación en fracciones fina y gruesa, por lo que los resultados obtenidos representan la densidad aparente y contenido de vacíos del material en la fuente.

La cantera ALVORTIZ registra el valor más bajo del estudio con apenas un 11,78% de contenido de vacíos, a su vez presenta la mayor densidad aparente con 1966 kg/m³, evidenciando un material más compacto y eficiente. KUMOCHI presenta un contenido de vacíos del 18,87% y una densidad aparente de 1704 kg/m³, manteniéndose en un rango adecuado para mezclas permeables como lo indica Comité ACI 522[11].

RUMICHACA es la mina con el índice más crítico, alcanzando un 26,91% de contenido de vacíos y la menor densidad aparente del estudio con 1337 kg/m³ lo que confirma una deficiente distribución y empaquetamiento de las partículas. Por otro lado, VOLCAN y LAS JUNTAS 1 poseen valores similares tanto en contenido de vacíos como en densidad aparente, registrando 21,93% y 1622 kg/m³, y 21,28% y 1625 kg/m³ respectivamente.

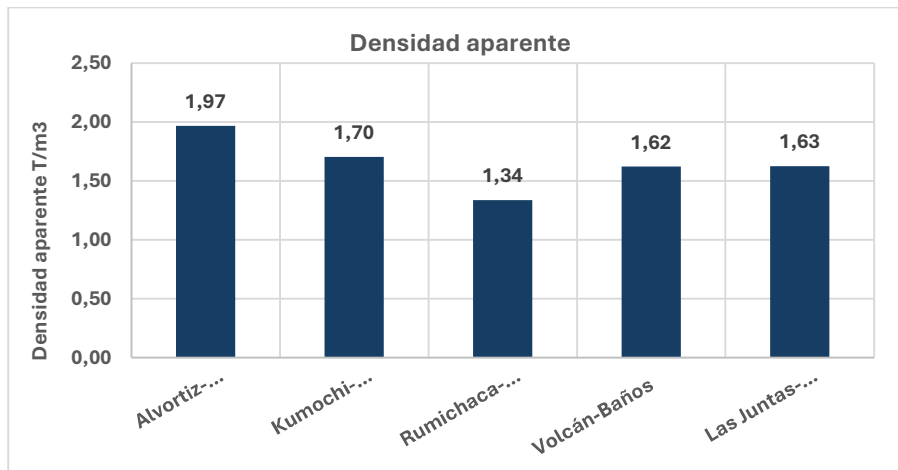


Figura 11. Resultados del Ensayo de Densidad Aparente

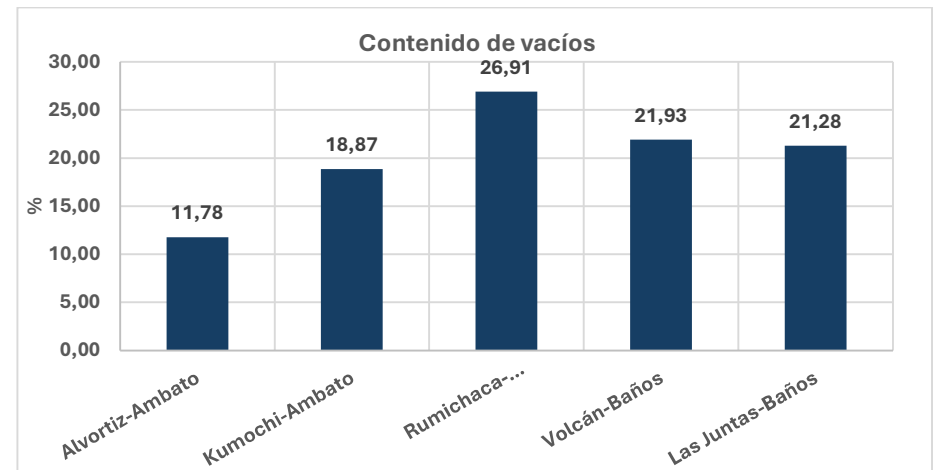


Figura 12. Resultados del Ensayo de Contenido de Vacíos

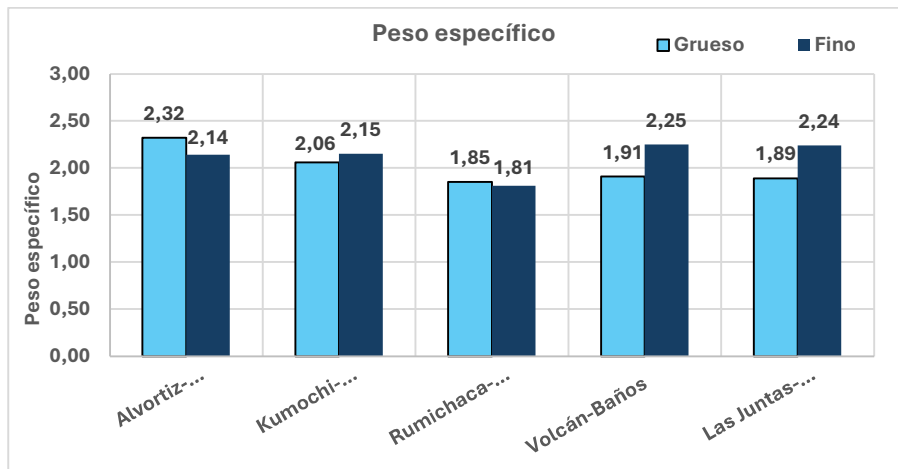


Figura 13. Resultados del Ensayo de Peso Específico

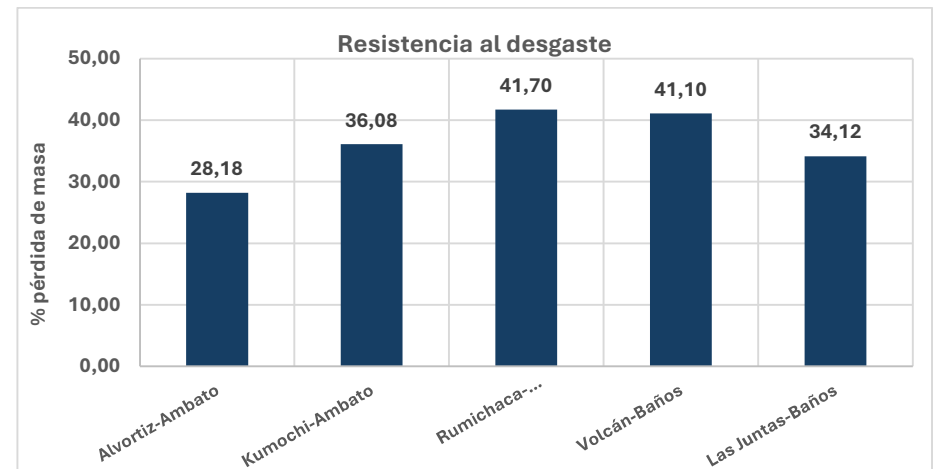


Figura 14. Resultados del Ensayo de Resistencia al Desgaste

4.2.5 Peso Específico

El ensayo de peso específico permite determinar la relación entre la masa y el volumen de las partículas del agregado.

En la Figura 13, se puede observar que la cantera ALVORTIZ presenta los valores más altos del estudio en agregado grueso y uno de los más altos en agregado fino, con pesos específicos de 2,32 y 2,14 respectivamente. KUMOCHI registra valores de 2,06 para agregado grueso y 2,15 para agregado fino, manteniéndose dentro de un rango adecuado para aplicaciones en mezclas asfálticas y de hormigón permeable [12].

Por otro lado, RUMICHACA presenta los valores más bajos tanto en agregado grueso como fino, con 1,85 y 1,81, lo que sugiere una mayor presencia de poros internos y una menor compactación natural del material. En las canteras VOLCAN y LAS JUNTAS 1 se observan valores similares. VOLCAN registra 1,91 en agregado grueso y 2,25 en fino, mientras que LAS JUNTAS 1 alcanza 1,89 y 2,24 respectivamente, destacándose principalmente por el elevado peso específico de la fracción fina.

El ensayo de peso específico reforzó las tendencias observadas en los demás parámetros. ALVORTIZ presentó los mayores valores de peso específico en agregado grueso y uno de los más altos en agregado fino, evidenciando una estructura mineral más densa y resistente. En cambio, RUMICHACA registró los valores más bajos tanto en finos como en gruesos, corroborando la presencia de materiales porosos y menos compactos.

4.2.6 Resistencia al desgaste

Determina la durabilidad del árido grueso (tamiz 1 ½" al tamiz No.8) [18] frente al impacto y la fricción. Los datos obtenidos de este ensayo se presentan en la Figura 14.

ALVORTIZ tiene el material pétreo más fuerte con solo 28,18% de pérdida. Por otro lado, KUMOCHI presenta un desgaste intermedio del 36,08%.

RUMICHACA es la mina más frágil con un 41,7% de pérdida de masa. VOLCAN también muestra una baja resistencia con una pérdida de masa del 41,10%, en contraste LAS JUNTAS 1, a pesar de su cercanía a la mina anterior, resiste bien con un 34,12% de pérdida de masa.

Los resultados de VOLCAN y RUMICHACA exceden el límite común del 40% recomendado para capas de rodadura asfáltica. Estos materiales se degradarían rápidamente bajo tráfico vehicular pesado, por lo que su uso ideal debería limitarse a sub-bases o elementos de concreto que no estén sujetos a abrasión directa, ya que en estas capas el límite permitido por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas es del 50% [13].

4.3 Análisis Comparativo con Investigaciones Previas de Pavimentos Permeables

La evaluación de los agregados de las canteras ALVORTIZ, KUMOCHI, RUMICHACA, LAS JUNTAS 1 y VOLCAN no debe entenderse como un estudio aislado, sino como una fase de validación y contraste dentro del proyecto macro denominado “Uso de materiales andinos para el diseño sostenible de pavimentos permeables”. Esta comparativa permite determinar si las propiedades identificadas en la presente investigación mantienen una correlación lógica con los parámetros de diseño establecidos en etapas previas, y si son compatibles con los requerimientos para los modelos de permeabilidad y resistencia deseados.

El diseño sostenible de infraestructuras viales en la región andina exige una comprensión profunda de la variabilidad de los áridos locales. Por ello, en los apartados siguientes se contrastan indicadores como la granulometría, densidad, absorción, contenido de vacíos y desgaste obtenidos en los laboratorios de la UNACH, frente a los resultados de otras investigaciones del proyecto. Este ejercicio de comparación técnica permite ratificar la viabilidad o potencial del uso de materiales provenientes de zonas como Ambato, Pelileo y Baños, asegurando que no se comprometa la integridad estructural ni la capacidad de infiltración de los pavimentos permeables en los que podrían utilizarse.

Dentro del proyecto existen investigaciones enfocadas en pavimentos articulados, flexibles y rígidos en diferentes sectores de la región. Por lo que para la siguiente comparativa se ha escogido una investigación de cada tipo de pavimento, que serían las de Poaquiza y Manobanda (Pavimentos Articulados) [19], Solorzano y Caspi (Pavimentos flexibles) [20], Arévalo y Maila (Pavimentos Rígidos) [21].

4.3.1 Contraste de distribución granulométrica

4.3.1.1 Pavimentos Articulados

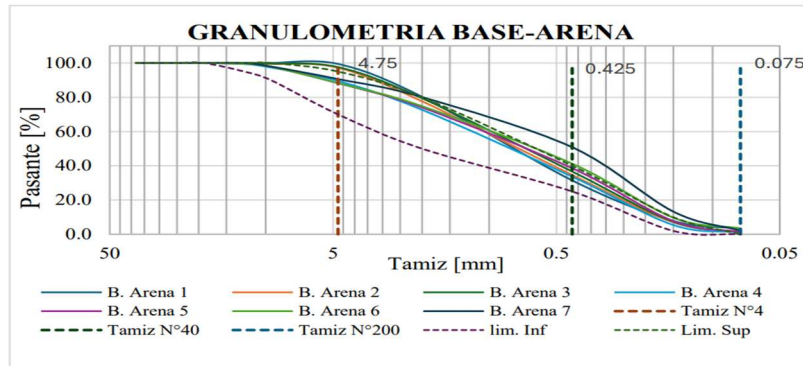


Figura 15. Curvas granulométricas de capas Base-Arena en pavimentos articulados [19]

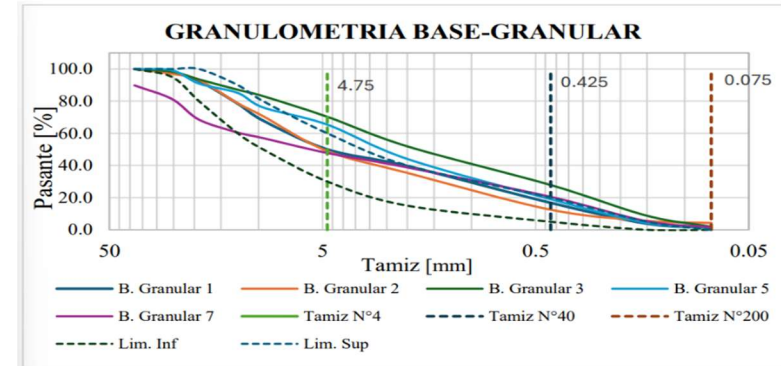


Figura 16. Curvas granulométricas de capas Base-Granular en pavimentos articulados [19]

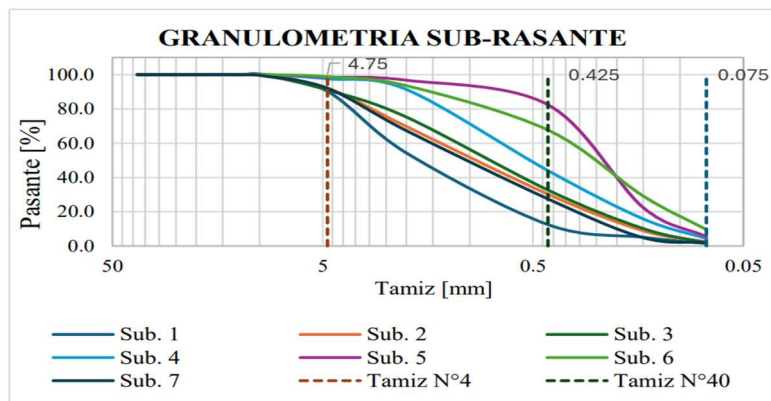


Figura 17. Curvas granulométricas de Subrasante en pavimentos articulados [19]

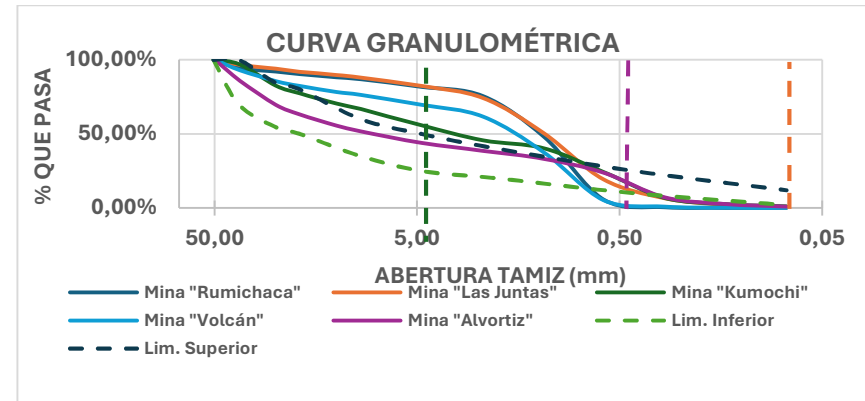


Figura 18. Curvas granulométricas de las canteras estudiadas

En las Figuras 15, 16 y 17, correspondientes a las capas Base-Arena, Base-Granular y Subrasante de pavimentos articulados, respectivamente, se presentan las curvas granulométricas de las diferentes muestras ensayadas en la investigación de [19]. En estas graficas, el eje vertical representa el porcentaje que pasa, mientras que el eje horizontal corresponde a la abertura del tamiz en milímetros, empleando una escala logarítmica. Por otro lado, en la Figura 18 se muestran las curvas granulométricas de las canteras analizadas en la presente investigación.

Al comparar estas curvas con las de las canteras estudiadas, se observa que algunos materiales presentan comportamientos granulométricos similares, especialmente en los rangos intermedios y gruesos. Las canteras Alvortiz y Kumochi presentan una disminución importante del contenido de finos, generando gradaciones más abiertas. Este comportamiento resulta favorable desde el punto de vista hidráulico, ya que puede incrementar la permeabilidad y facilitar la infiltración del agua, condición deseable en sistemas de pavimentos permeables articulados [22].

A continuación, en el caso de los pavimentos flexibles, las curvas de base (Figura 19), sub-base (Figura 20) y subrasante (Figura 21) presentan distribuciones granulométricas más densas y continuas, típicas de estructuras convencionales que buscan capacidad estructural y estabilidad. Comparativamente, las canteras de Tungurahua (Figura 22) muestran variaciones significativas entre materiales, observándose que algunas poseen una tendencia hacia gradaciones más uniformes. Esta característica podría limitar parcialmente la compactación tradicional requerida en pavimentos flexibles, pero al mismo tiempo representan una ventaja potencial para aplicaciones permeables[23].

Por otra parte, en los pavimentos rígidos se aprecia que las curvas granulométricas de sub-base (Figura 23) y subrasante (Figura 24) mantienen distribuciones controladas con límites granulométricos definidos. Al comparar estas curvas con las obtenidas de las canteras estudiadas (Figura 25), se identifica que ciertos materiales cumplen tendencias granulométricas cercanas a los rangos empleados en investigaciones previas.

De manera general, la comparación entre los tres tipos de pavimentos evidencia que los materiales de las canteras de Tungurahua poseen comportamientos granulométricos variables, influenciados por el origen geológicos y el proceso de explotación de cada cantera [15].

4.3.1.2 Pavimentos Flexibles

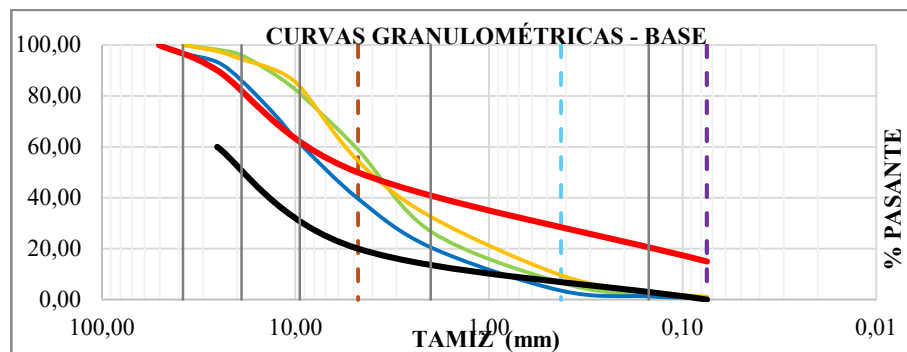


Figura 19. Curvas granulométricas de capas Base en pavimentos flexibles [20]

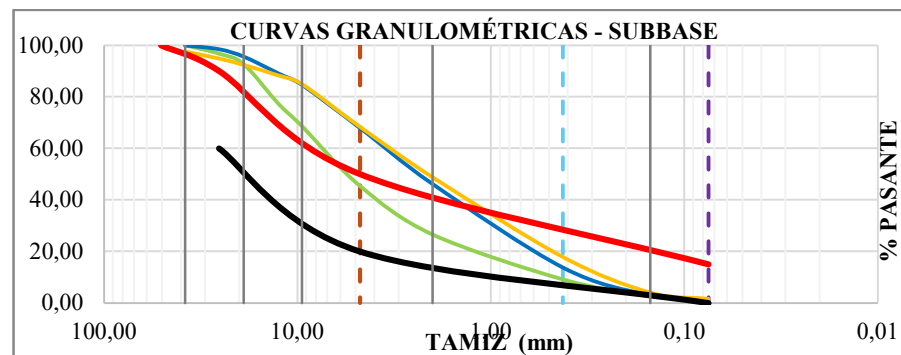


Figura 20. Curvas granulométricas de Sub-base en pavimentos flexibles [20]

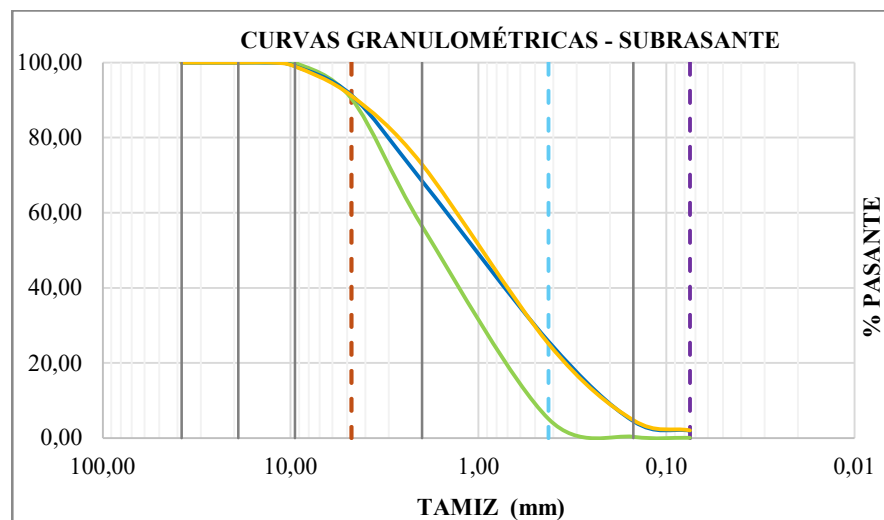


Figura 21. Curvas granulométricas de Subrasante en pavimentos flexibles [20]

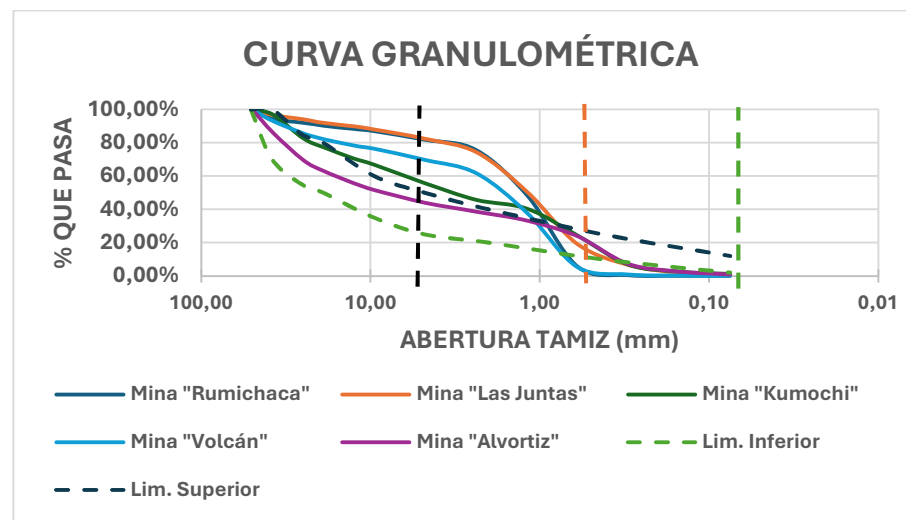


Figura 22. Curvas granulométricas de las canteras estudiadas

4.3.1.3 Pavimentos Rígidos

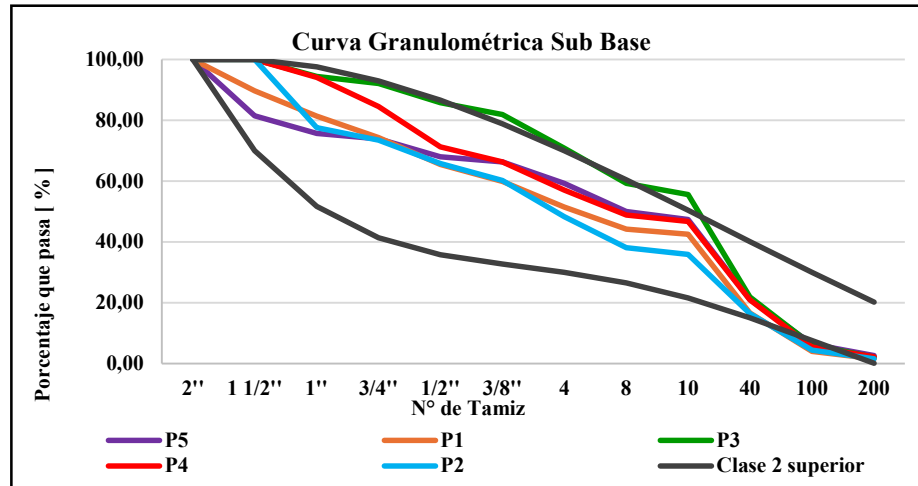


Figura 23. Curvas granulométricas de la Sub-base en pavimentos rígidos [21]

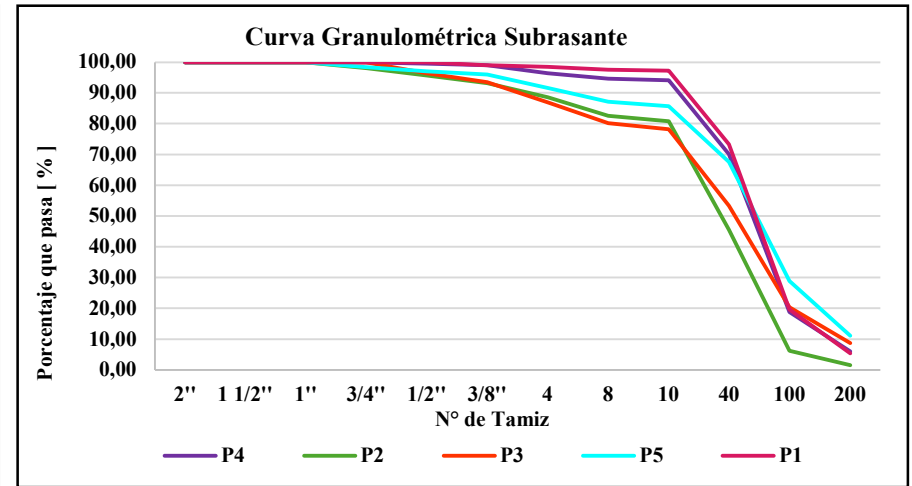


Figura 24. Curvas granulométricas de la Subrasante en pavimentos rígidos [21]

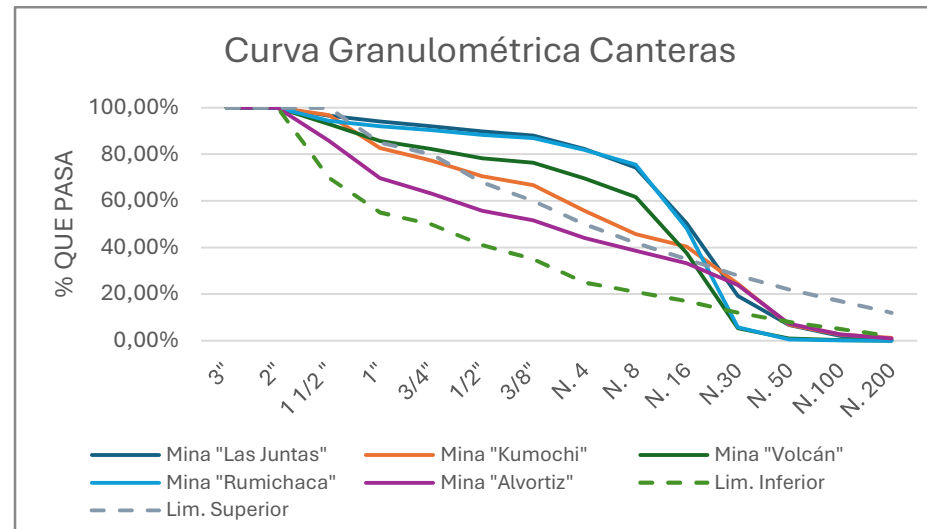


Figura 25. Curvas granulométricas de las canteras estudiadas

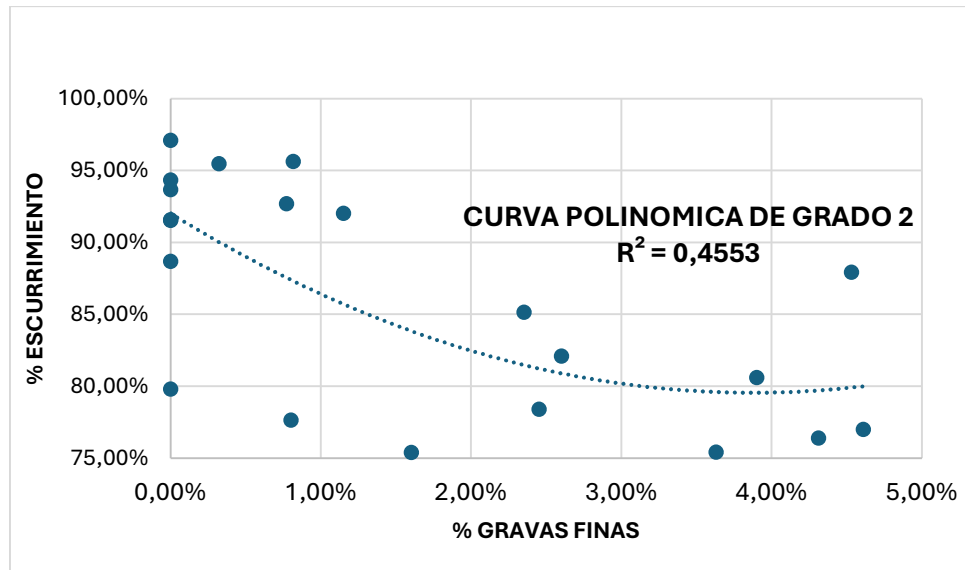


Figura 26. Escurrimiento vs Gravas finas subrasante[22]

En la Figura 26, perteneciente a la investigación realizada por Tello [22] se evidencia que cuando aumenta la presencia de gravas finas, disminuye la escurrentía. Este factor comparado con las curvas granulométricas de las canteras estudiadas permite determinar que las canteras tienen el material necesario para lograr una buena infiltración en los pavimentos que se utilicen.

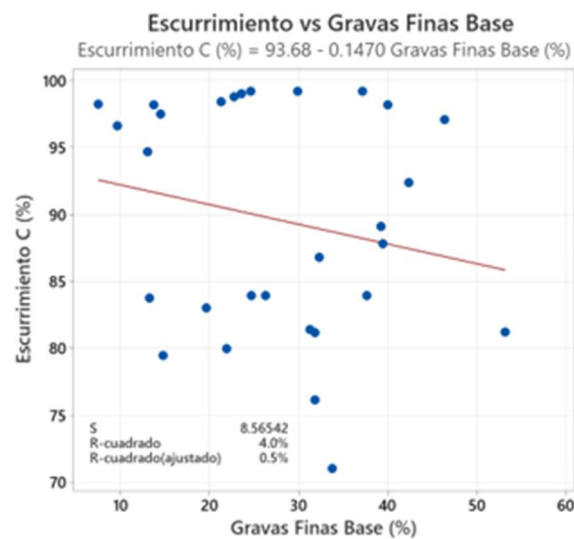


Figura 27. Escurrimiento vs Gravas finas base [23]

En concordancia, la investigación de Quinchuela [23] reporta un comportamiento similar, estableciendo que una mayor proporción de vacíos (derivada de un incremento en el tamaño de las partículas, o menor cantidad de finos) favorece directamente una tasa de infiltración más elevada, mejorando la permeabilidad.

4.3.2 Comparativa de densidades

4.3.2.1 Pavimentos Articulados

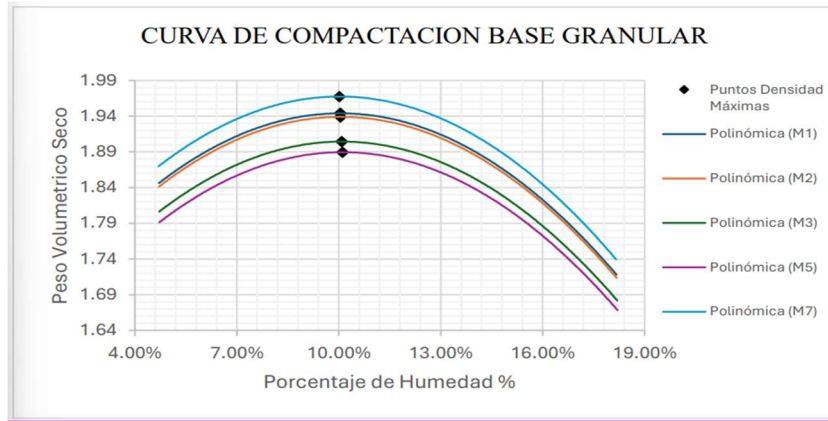


Figura 28. *Peso volumétrico seco de la base granular en p. articulados [19]*

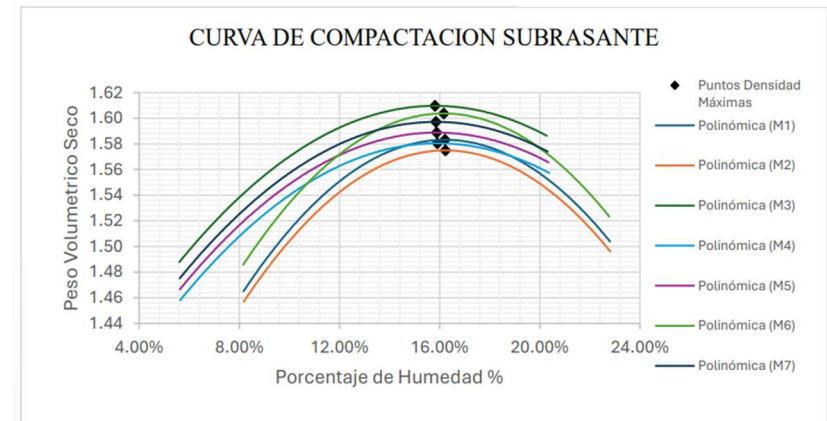


Figura 29. *Peso volumétrico seco de la subrasante en p. articulados [19]*

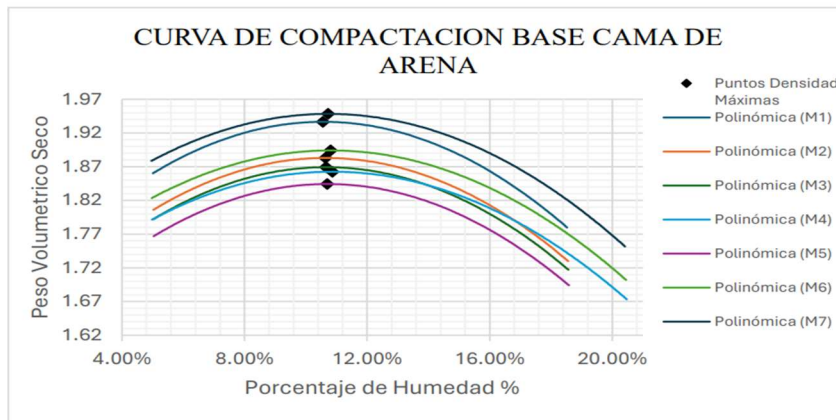


Figura 30. *Peso volumétrico seco de la base cama de arena en pavimentos articulados [19]*

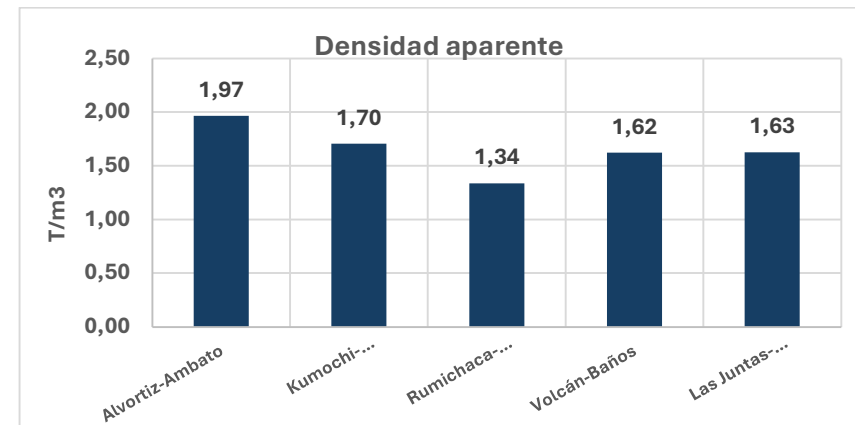


Figura 31. *Densidades aparentes de las canteras estudiadas*

La comparación entre las curvas de compactación Proctor y los gráficos de densidad aparente se justifica porque ambos parámetros permiten evaluar el comportamiento volumétrico y la capacidad de compactación de los materiales pétreos empleados en pavimentos. Las curvas de compactación establecen una relación entre el contenido de humedad y la densidad seca máxima alcanzable bajo una energía de compactación determinada, mientras que la densidad aparente refleja el estado natural y la disposición de las partículas del agregado. Al comparar estos resultados es posible determinar si los materiales provenientes de las canteras poseen características adecuadas para alcanzar las densidades requeridas en las capas estructurales del pavimento, después de aplicarse una energía de compactación.

En los pavimentos articulados se presentan curvas de compactación correspondientes a la base granular (Figura 28), subrasante (Figura 29) y base cama de arena (Figura 30), obtenidas de la investigación de Manobanda y Poaquiza [19]. Estas graficas muestran en el eje vertical el peso volumétrico seco expresado en T/m^3 y en el eje horizontal el contenido de humedad utilizado durante el proceso de compactación. Las curvas permiten identificar el rango máximo de densidad seca máxima característico de cada capa granular del pavimento.

Por otra parte, la Figura 31 presenta los valores de densidad aparente obtenidos de los materiales extraídos de las canteras de la provincia de Tungurahua. Al comparar ambos resultados, se observa que las densidades aparentes de la mayoría de las canteras se encuentran dentro de los rangos de densidad máxima determinados en las curvas de compactación o próximas a sus límites inferiores. Esto sugiere que dichos materiales, al ser sometidos a una energía de compactación adecuada, podrían alcanzar condiciones de desempeño similares a las requeridas en los pavimentos articulados.

En los pavimentos flexibles se presentan curvas de compactación correspondientes a la base (Figura 32), la subrasante (Figura 33) y la sub-base (Figura 34). Al comparar estos resultados con las densidades aparentes obtenidas de las canteras de la provincia de Tungurahua, mostradas en la Figura 35, se observa que los materiales pétreos locales alcanzan valores de densidad superiores a los registrados en las capas de los pavimentos flexibles analizados. Por lo tanto, se puede deducir que los materiales provenientes de las canteras de Tungurahua cumplen satisfactoriamente con los requerimientos establecidos por el Ministerio de Transporte y Obras Publicas en la sección 403 y 404 [13], los cuales determinan que la densidad mínima de las capas granulares no será menor que el 100% de la densidad máxima establecida mediante los ensayos de Densidad Maxima y Humedad Optima.

4.3.2.2 Pavimentos Flexibles

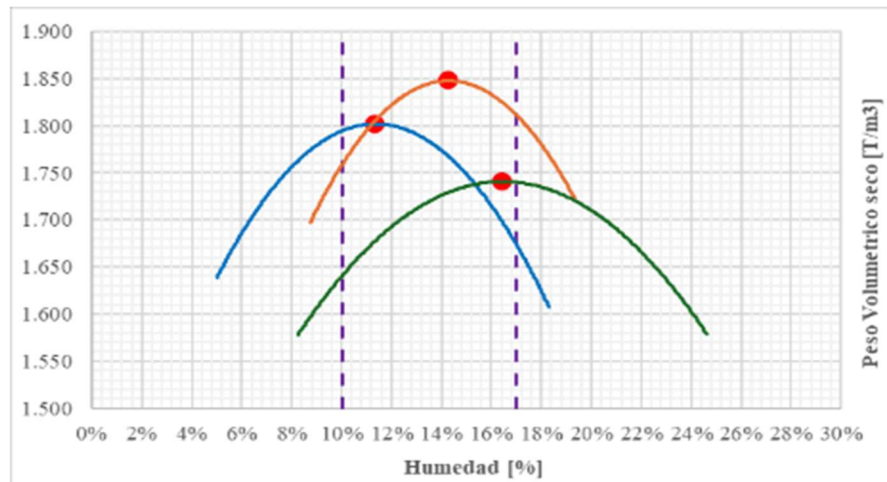


Figura 32. *Peso volumétrico seco de la base en pavimentos flexibles [20]*

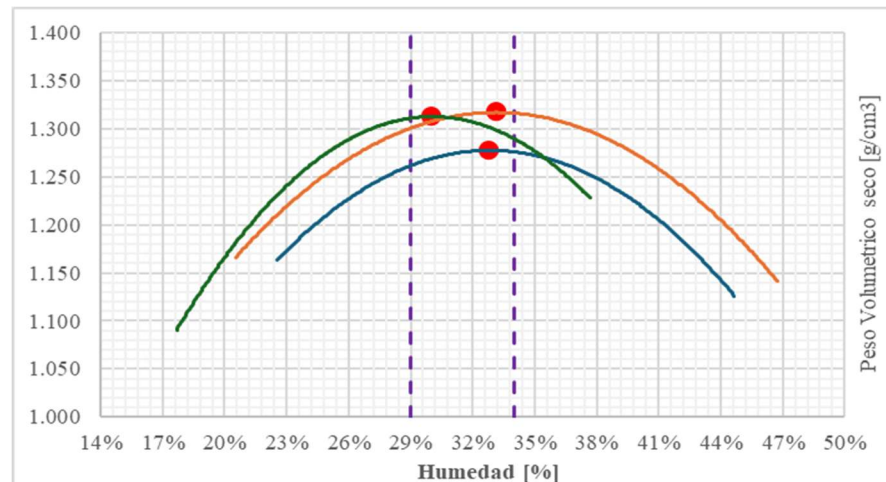


Figura 33. *Peso volumétrico seco de la subrasante en pavimentos flexibles [20]*

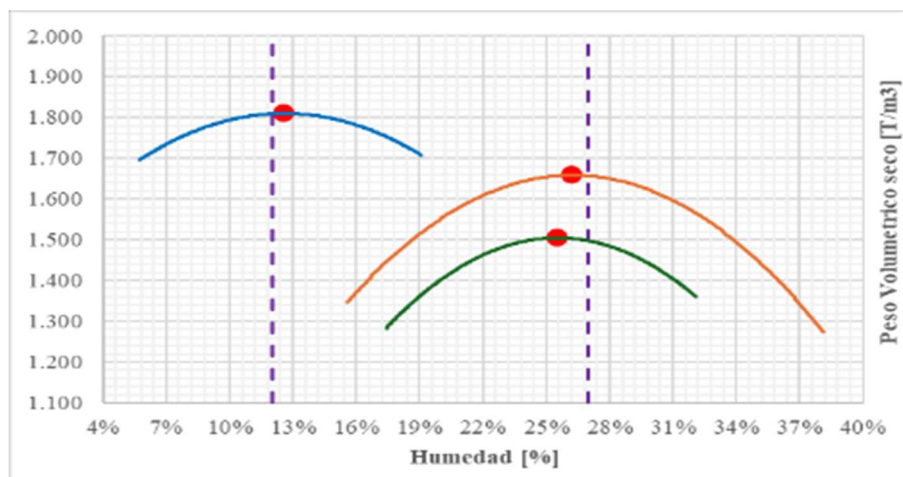


Figura 34. *Peso volumétrico seco de la sub-base en pavimentos flexibles [20]*

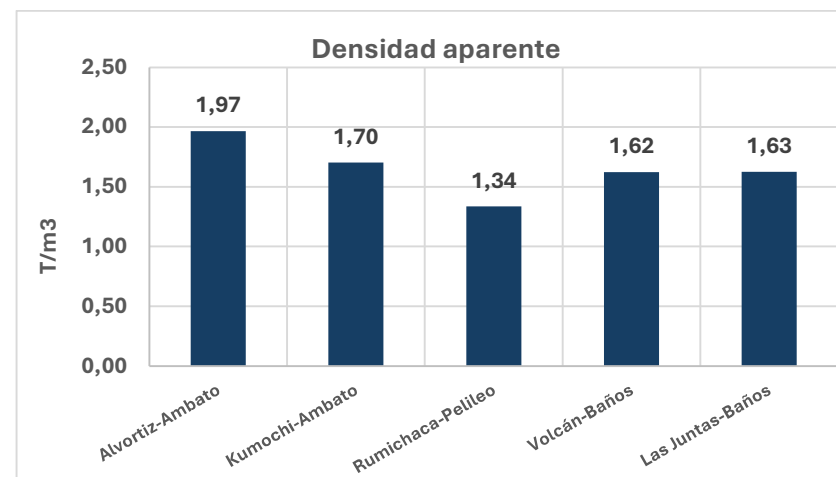


Figura 35. *Densidades aparentes de las canteras estudiadas*

4.3.2.3 Pavimentos Rígidos

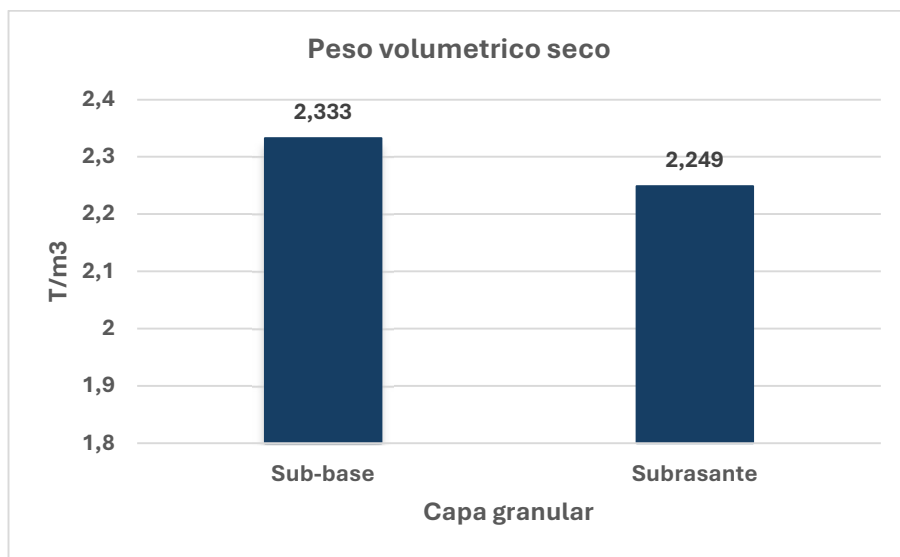


Figura 36. *Peso volumétrico seco de capas granulares en pavimentos rígidos [21]*

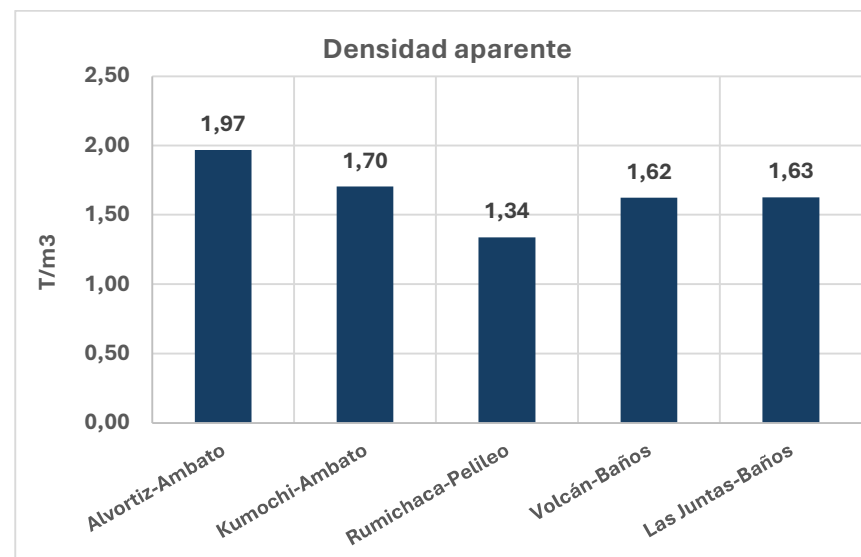


Figura 37. *Densidades aparentes de las canteras estudiadas*

En los pavimentos rígidos los valores de densidad seca de la Figura 36 son mucho más altos en comparación con los otros tipos de pavimentos, comparado con el material de las canteras de Tungurahua las únicas minas estudiadas que podrían cumplir con esta densidad requerida serían Alvortiz y Kumochi, esto se lograría aplicando una adecuada energía de compactación.

4.3.3 Comparativa de la Capacidad de Absorción

4.3.3.1 Pavimentos Articulados

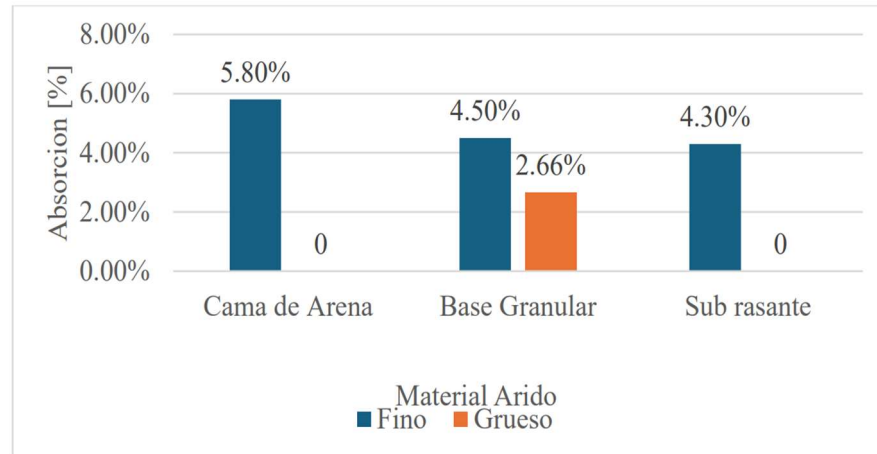


Figura 38. Capacidad de absorción de capas granulares en pavimentos articulados [19]

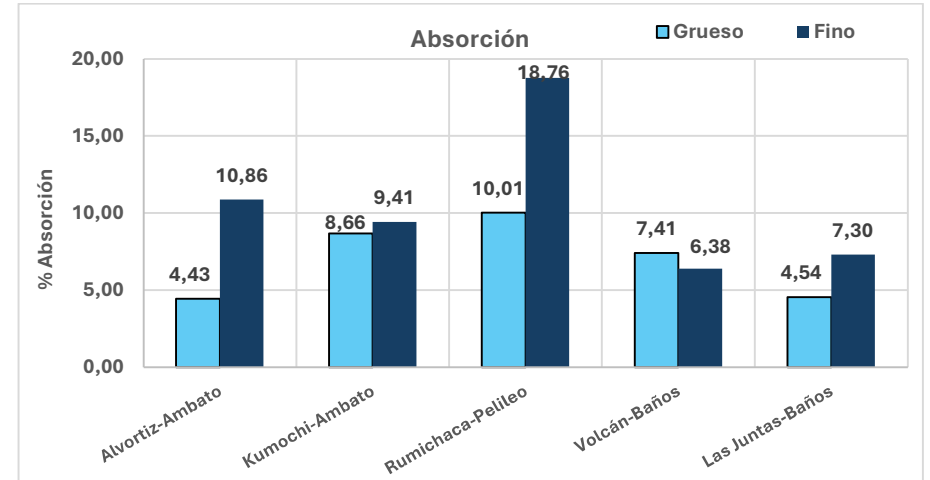


Figura 39. Capacidad de absorción del material pétreo de las canteras estudiadas

La absorción constituye un parámetro fundamental para evaluar la porosidad de los agregados pétreos. En pavimentos permeables, valores elevados de absorción pueden afectar la durabilidad del material frente a ciclos continuos de humedad [15] y, además, influir en las dosificaciones de las mezclas utilizadas. Al comparar la capacidad de absorción de las capas granulares de los pavimentos articulados (Figura 38) con la absorción de los materiales pétreos provenientes de las canteras estudiadas (Figura 39), se evidencia que los agregados de las canteras de Tungurahua presentan valores significativamente superiores. En la mayoría de los casos, la absorción es aproximadamente el doble de la registrada en los materiales finos de las capas del pavimento articulado, mientras que en la cantera Rumichaca estos valores llegan incluso a triplicarse.

4.3.3.2 Pavimentos Flexibles

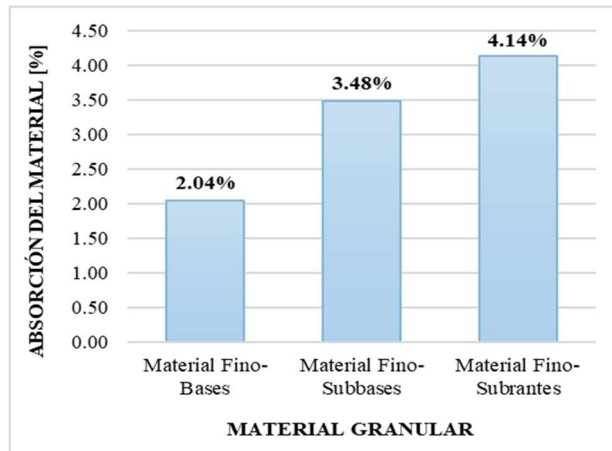


Figura 40. Capacidad de absorción de las capas finas de p. flexibles [20]

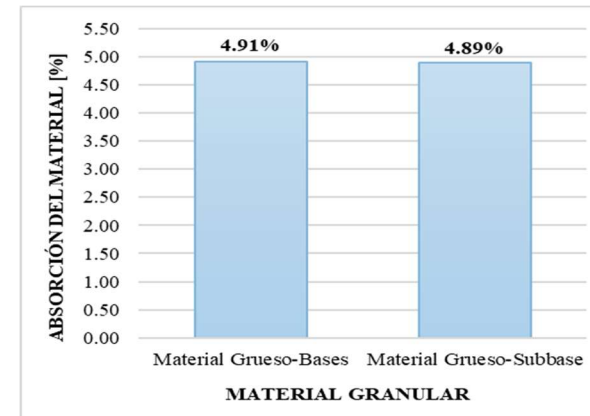


Figura 41. Capacidad de absorción de las capas gruesas de p. flexibles [20]

4.3.3.3 Pavimentos Rígidos

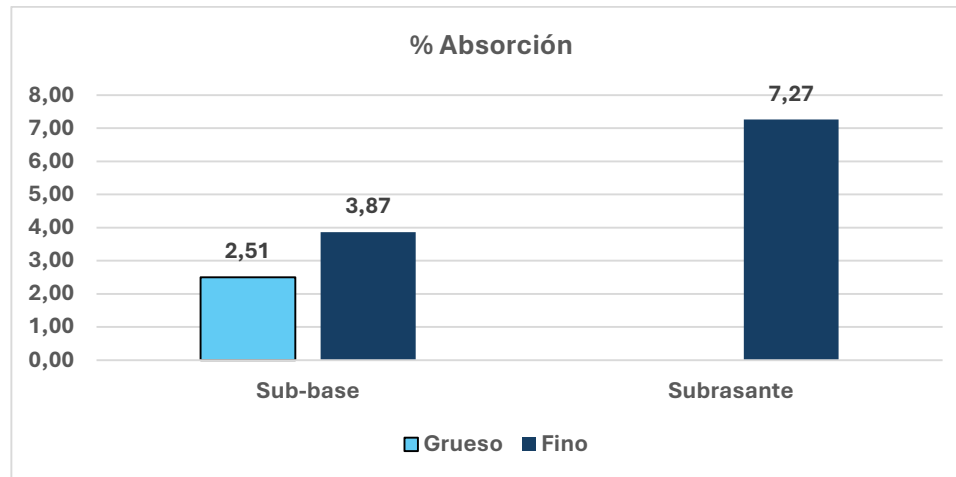


Figura 42. Capacidad de absorción de las capas granulares de pavimentos rígidos [21]

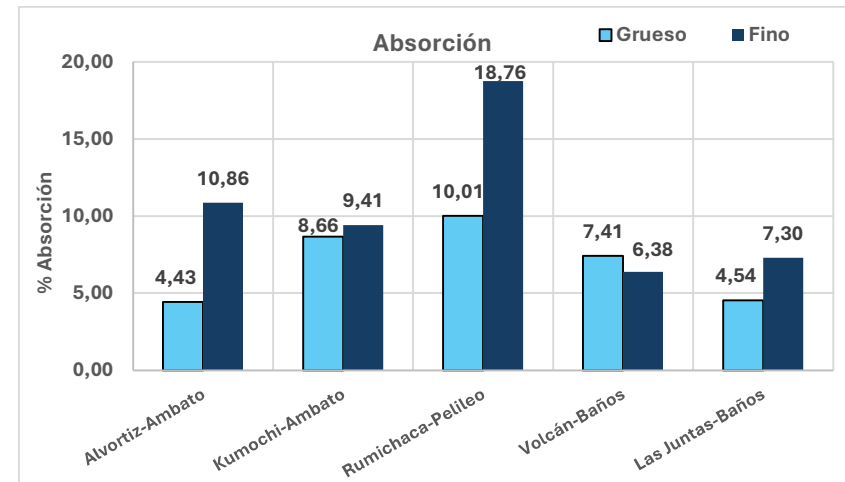


Figura 43. Capacidad de absorción de las canteras estudiadas

Las Figuras 40 y 41 presentan la capacidad de absorción de las capas finas y gruesas de los pavimentos flexibles, mientras que la Figura 43 muestra los valores de absorción de los materiales pétreos provenientes de las canteras estudiadas. Al comparar estos resultados, se observa que los agregados de las canteras presentan capacidades de absorción considerablemente superiores a las registradas en las capas de los pavimentos flexibles. En las capas finas del pavimento, los valores oscilan entre 2,04 % y 4,14 %, mientras que en las canteras los materiales finos alcanzan valores de hasta 18,76 % en Rumichaca. De igual manera, en los materiales gruesos de pavimentos flexibles los porcentajes se mantienen cercanos al 5 %, mientras que varias canteras superan ampliamente estos valores. Esto evidencia que los agregados locales poseen una mayor porosidad y capacidad de retención de agua, característica que podría afectar el desempeño hidráulico y la durabilidad del pavimento si no se aplican tratamientos o controles adecuados [11].

En el caso de los pavimentos rígidos, la Figura 42 muestra que los materiales finos presentan mayores porcentajes de absorción que los gruesos, alcanzando 7,27 % en la subrasante. Sin embargo, al compararlos con los materiales de las canteras estudiadas (Figura 43), nuevamente se observa que los agregados locales presentan valores superiores, especialmente en el material fino. La cantera Rumichaca destaca por registrar la absorción más alta tanto en material fino como grueso, superando ampliamente los valores obtenidos en las capas granulares de los pavimentos rígidos. En contraste, las canteras Alvortiz–Ambato y Las Juntas–Baños muestran valores más cercanos a los observados en los pavimentos analizados. En términos generales, esta comparación indica que los materiales pétreos de las canteras de Tungurahua poseen una mayor capacidad de absorción respecto a los materiales utilizados en pavimentos flexibles y rígidos, lo que sugiere la necesidad de un control técnico más riguroso en su selección y aplicación.

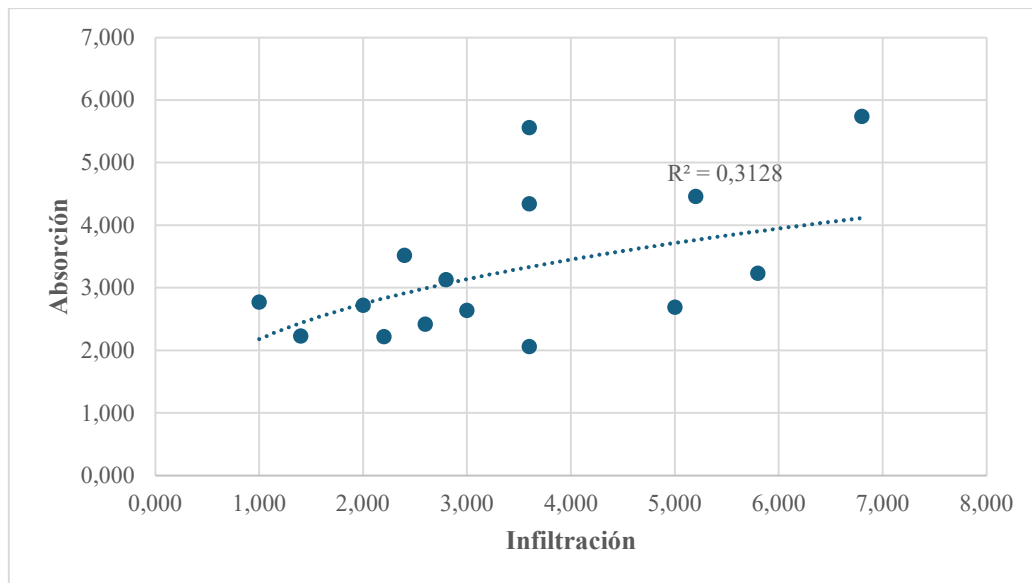


Figura 44. *Relación entre la Absorción y la infiltración en pavimentos rígidos [24]*

Como se aprecia en la Figura 44, obtenida de la investigación de [24] sobre la correlación de las características físicas, mecánicas e hidráulicas en pavimentos rígidos, en el eje vertical se representan los porcentajes de absorción de los materiales, mientras que en el eje horizontal se muestran los valores de infiltración.

A partir de esta relación se evidencia que los materiales con mayores porcentajes de absorción presentan también una mayor capacidad de infiltración, condición favorable para el comportamiento permeable del pavimento [15].

No obstante, como se analizó en apartados anteriores, una elevada capacidad de absorción mantiene una relación inversa con la densidad del árido, lo que puede comprometer sus propiedades mecánicas y su resistencia estructural. Por esta razón, la selección del material óptimo debe fundamentarse en un equilibrio técnico entre la capacidad de infiltración, la absorción y la resistencia mecánica del agregado [11].

4.3.4 Comparativa de la Resistencia al Desgaste

4.3.4.1 Pavimentos Articulados

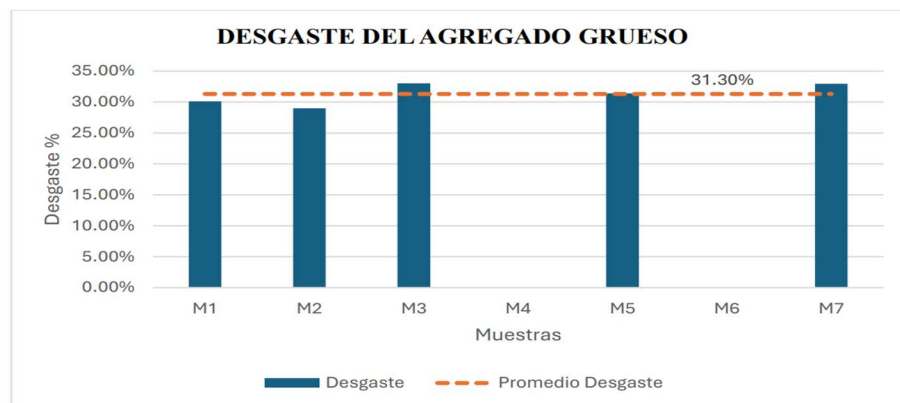


Figura 45. Pérdida de masa del agregado grueso en pavimentos articulados [19]

4.3.4.2 Pavimentos Flexibles

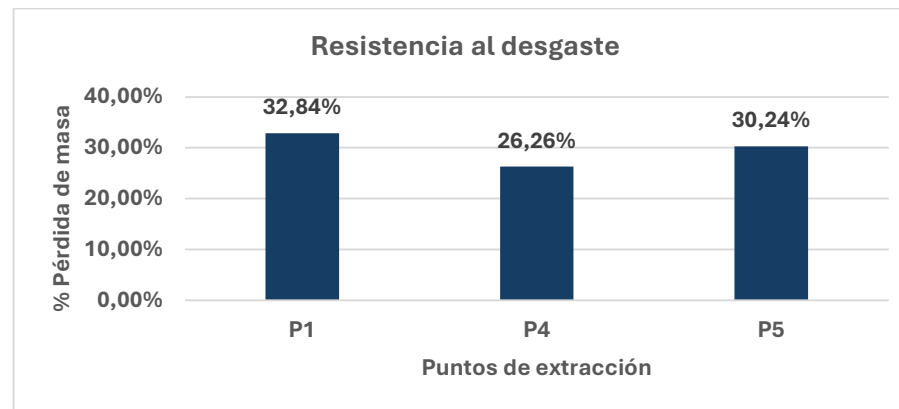


Figura 46. Pérdida de masa del agregado grueso en pavimentos flexibles [20]

4.3.4.3 Pavimentos Rígidos

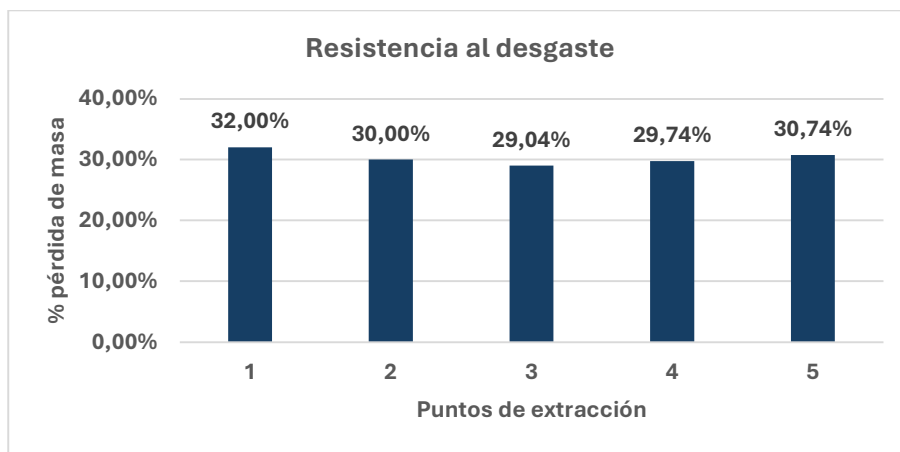


Figura 47. Pérdida de masa del agregado grueso en pavimentos rígidos [21]

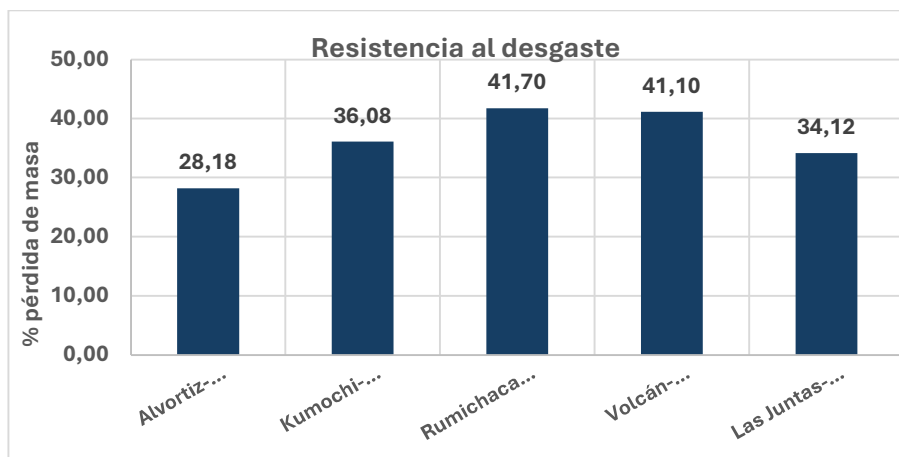


Figura 48. Pérdida de masa del agregado grueso de las canteras estudiadas

Al comparar la pérdida de masa del agregado grueso de las canteras estudiadas (Figura 48) con las investigaciones previas, se observa que la cantera Alvortiz (28.18%) posee una resistencia al desgaste superior incluso a los promedios registrados para pavimentos articulados (Figura 45), flexibles (Figura 46) y rígidos (Figura 47).

Existe una diferencia notable entre el material de los pavimentos previamente analizados y los hallazgos en las canteras de Rumichaca (41.70%) y Volcán (41.10%). Estos valores superan el límite establecido por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas del 40% [13], que se requiere para el material pétreo, indicando que son materiales significativamente más blandos y propensos a la trituration.

Mientras que las investigaciones previas muestran una calidad de agregado muy uniforme, los resultados de las canteras de Tungurahua (Figura 48) presentan una alta dispersión, sugiriendo que la ubicación geográfica dentro de la provincia altera drásticamente la dureza del agregado

4.4 Elección de la cantera con que posee el material pétreo más idóneo para el diseño de pavimentos permeables.

Como parte final de esta investigación, se plantea la selección de la cantera que presente el material pétreo con mayor potencial para su aplicación en pavimentos permeables. Para ello, se realizará una evaluación comparativa de los materiales obtenidos de las diferentes fuentes de explotación estudiadas, considerando sus propiedades físicas y mecánicas determinadas mediante los ensayos de laboratorio.

La selección se fundamentará en el cumplimiento de los requisitos establecidos por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas para materiales destinados a capas base, sub-base y subrasante en estructuras de pavimento [13]. Estos criterios técnicos permitirán identificar el material que ofrezca mejores condiciones de desempeño, estabilidad y capacidad estructural, así como las características adecuadas para favorecer el drenaje y funcionamiento de los pavimentos permeables, esto según las propiedades estudiadas en las investigaciones previas del proyecto “Uso de materiales andinos para el diseño sostenible de pavimentos permeables”.

De esta manera, el análisis de los resultados permitirá determinar la cantera más adecuada para el uso de materiales pétreos en este tipo de infraestructura vial, contribuyendo al aprovechamiento eficiente de los recursos disponibles y al desarrollo de soluciones constructivas más sostenibles.

4.4.1 Requisitos técnicos de los agregados para pavimentos

4.4.1.1 Bases

Los agregados para Base Clase 1 se obtendrán por trituration de grava o roca, que no presenten partículas alargadas o planas en exceso. Estarán exentos de material vegetal, grumos de arcilla u otro material objetable. Para Base Clase 2, 3 y 4 los materiales se obtendrán por trituration o cribado de grava natural [13]. En todo caso, el límite líquido de la fracción que pase el tamiz N° 40 deberá ser menor de 25 y el índice de plasticidad menor de 6. El porcentaje de abrasión de los agregados será menor del 40% [13]. Los agregados

empleados en capas de Base Clase 1 deberán graduarse uniformemente de grueso a fino y cumpliendo las exigencias de granulometría que se indican en las Tablas 404-1.1, 404-1.2, 404-1.3 y 404-1.4 indicadas en [13]

Con base en los requisitos establecidos para agregados destinados a capas base, se determina que las minas Alvortiz, Kumochi y las Juntas 1 cumplen con las especificaciones correspondientes. No obstante, la mina Alvortiz presenta las mejores condiciones, debido a que registra una mayor resistencia al desgaste, evidenciada por una pérdida de masa de apenas 28.18%. Además, su mayor contenido de partículas gruesas le permite presentar una curva granulométrica más uniforme.

4.4.1.2 Sub-bases

Para las sub-bases se deben cumplir requisitos similares a los establecidos para las bases. Sin embargo, en el caso de las sub-bases de clase 1 y 2, se exige que al menos el 30 % de los agregados preparados provengan de material triturado. Asimismo, el porcentaje máximo de desgaste permitido es del 50 % a diferencia de las bases, donde el límite es de 40% [13].

De acuerdo con los requisitos establecidos para materiales destinados a sub-bases, se determina que todas las canteras analizadas cumplen con las especificaciones técnicas requeridas. No obstante, la cantera Alvortiz destaca sobre las demás al presentar mejores características mecánicas y granulométricas, evidenciando una mayor resistencia al desgaste y una distribución de partículas más adecuada.

4.4.1.3 Subrasante

Cuando se requiera un mejoramiento de la subrasante el suelo seleccionado deberá ser granular, rocoso o combinaciones de ambos, libre de material orgánico y escombros, tendrá una granulometría tal que todas las partículas pasaran por un tamiz de cuatro pulgadas con abertura cuadrada y no más de 20% pasara el tamiz N° 200 [13].

La parte del material que pase el tamiz N° 40 deberá tener un índice de plasticidad no mayor a nueve y limite liquido hasta 35% [13].

En ese contexto, todas las canteras evaluadas cumplen con los requisitos establecidos, por lo que los materiales pétreos provenientes de las canteras de Tungurahua presentan potencial para su utilización tanto en capas de Sub-base como de Subrasante.

4.4.2 Selección de la cantera más adecuada

A partir del análisis comparativo de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales pétreos provenientes de las diferentes canteras estudiadas, y considerando los requisitos establecidos por el Ministerio de Obras Públicas para capas de base, sub-base y subrasante, se determina que la cantera Alvortiz presenta el mayor potencial para su aplicación en pavimentos permeables.

Si bien las canteras evaluadas cumplen con las especificaciones técnicas requeridas para materiales granulares, la cantera Alvortiz destaca por presentar una mayor resistencia al desgaste, con tan solo 28.18% de pérdida de masa. Adicionalmente el material de la

cantera Alvortiz presenta una distribución granulométrica más uniforme y un mayor contenido de partículas gruesas, características que favorecen la generación de espacios vacíos interconectados que permiten el adecuado drenaje e infiltración del agua.

Por esta razón, se considera que esta cantera constituye la alternativa más idónea para el suministro de material pétreo destinado a la construcción de pavimentos permeables en la provincia de Tungurahua.

4.5 Discusión

Los resultados obtenidos del análisis comparativo de las propiedades de los materiales pétreos provenientes de las canteras ALVORTIZ, KUMOCHI, RUMICHACA, VOLCAN y LAS JUNTAS 1 permitieron establecer relaciones significativas entre las características mineralógicas de cada fuente y su posible desempeño en pavimentos permeables. Los ensayos realizados evidenciaron que parámetros como la granulometría, absorción, densidad aparente, contenido de vacíos, peso específico y resistencia al desgaste influyen directamente en la capacidad estructural y de infiltración de los agregados empleados en capas granulares.

El comportamiento de los materiales mostro una fuerte relación con el origen geológico de cada cantera. Las canteras ALVORTIZ y RUMICHACA pertenecen a la Formación Latacunga, caracterizada por lahares, brechas y materiales volcánicos, a pesar de pertenecer al mismo origen geológico, ambas canteras son las más diferentes entre sí, esto puede deberse a que la cantera RUMICHACA presentaba en su composición un tipo de material similar a la piedra pómez, mientras que KUMOCHI y LAS JUNTAS 1 poseen origen coluvio-aluvial respectivamente, Por otro lado, VOLCAN proviene directamente de las lavas andesíticas del Tungurahua. Estas diferencias geológicas explican las variaciones observadas en densidad, absorción y resistencia mecánica de los agregados [12].

En el análisis granulométrico se identificó que ALVORTIZ presenta el mayor contenido de gravas con 55,98% constituyéndose como el material más grueso del estudio, mientras que RUMICHACA y LAS JUNTAS 1 poseen predominancia de arenas superiores al 80%, y VOLCAN Y KUMOCHI presentan valores promedio. Estas diferencias granulométricas resultan relevantes para pavimentos permeables, ya que en las investigaciones de [22], [23] y [24] determinaron que un menor contenido de finos y una mayor presencia de vacíos interconectados favorecen la infiltración de agua y reducen la escorrentía superficial.

Al comparar las curvas granulométricas con investigaciones previas desarrolladas en pavimentos articulados [19], flexibles [20] y rígidos [21], se observó que los materiales de las canteras de Tungurahua presentan gradaciones compatibles con aplicaciones permeables. Sin embargo, algunas canteras presentan distribuciones más abiertas y uniformes, caracterizadas por una deficiencia intencional de la fracción fina. Esta conformación reduce el efecto de trabazón y el llenado de vacíos intersticiales, lo que inherentemente disminuye la densidad máxima y los niveles de compactación convencional requeridos para las bases de pavimentos tradicionales [25], aunque representa una ventaja desde el punto de vista hidráulico.

La absorción constituyó uno de los parámetros más críticos del estudio. Los resultados muestran que las canteras locales presentan niveles de absorción considerablemente superiores a los observados en investigaciones previas de pavimentos convencionales. RUMICHACA registro el comportamiento más desfavorable con una absorción de 18,76% en finos y 10,01% en gruesos, indicando una estructura muy porosa y susceptible a retener agua. Existe una relación inversamente proporcional entre la porosidad de un agregado (reflejada en su alta capacidad de absorción) y su densidad relativa, a mayor volumen de vacíos internos, menor es la masa sólida por unidad de volumen, confirmando así la existencia de una estructura mineral menos compacta [15].

En contraste, ALVORTIZ presentó valores de absorción más controlados, particularmente en la fracción gruesa con 4,43%, lo cual, de acuerdo con los criterios de durabilidad de agregados pétreos, evidencia una matriz mineral más densa, estable y menos susceptible a fenómenos de deterioro por humedad o meteorización [26]. VOLCAN y LAS JUNTAS 1 mostraron valores intermedios, aunque las diferencias observadas entre ambas canteras evidencian la influencia del origen geológico sobre la capacidad de absorción.

Los resultados de densidad aparente y contenido de vacíos demostraron una relación inversamente proporcional. ALVORTIZ alcanzó la mayor densidad aparente con 1966 kg/m³ y el menor contenido de vacíos con 11,78% evidenciando un mejor empaquetamiento de partículas y una estructura más estable. Por el contrario, RUMICHACA presentó la menor densidad aparente con 1337 kg/m³ y el mayor porcentaje de vacíos con 26,91% lo cual confirma una baja capacidad de compactación y una elevada porosidad interna.

En pavimentos permeables, el contenido de vacíos constituye un parámetro funcional para permitir la infiltración del agua [3]. No obstante, un exceso de vacíos puede comprometer la estabilidad estructural y la resistencia mecánica del material [2]. Por ello, el diseño de mezclas permeables requiere alcanzar un equilibrio entre permeabilidad y capacidad portante.

Respecto a la resistencia al desgaste, los resultados permitieron establecer diferencias importantes entre las canteras estudiadas. ALVORTIZ presentó la menor pérdida de masa con 28,18% superando incluso los valores observados en investigaciones previas de pavimentos articulados [19] y rígidos [21]. Este comportamiento evidencia una elevada dureza y resistencia frente a abrasión e impacto, características esenciales para capas estructurales sometidas a tráfico vehicular.

Por otro lado, VOLCAN y RUMICHACA superaron el límite del 40% recomendado para materiales destinados a capas de rodadura, registrando pérdidas de 41,10% y 41,70% respectivamente. Estos resultados indican materiales más frágiles y propensos a degradación acelerada bajo sollicitaciones mecánicas.

La comparación con investigaciones previas de pavimentos articulados [19], flexibles [20] y rígidos [21] permitió verificar que varias de las propiedades evaluadas mantienen tendencias coherentes con los comportamientos hidráulicos y estructurales observados en dichos estudios. Particularmente, la relación entre menor contenido de finos, incremento de

vacíos y mayor infiltración coincide con los modelos hidráulicos previamente analizados para pavimentos permeables de la región andina [22], [23], [24].

De manera general los resultados demuestran que los materiales pétreos de Tungurahua poseen características variables influenciadas por su origen geológico. Aunque todas las minas presentan potencial de uso en capas granulares, la cantera ALVORTIZ destaca consistentemente en los ensayos realizados, presentando mejores condiciones granulométricas, mayor densidad, menos absorción y mayor resistencia al desgaste. Estas propiedades le permiten ofrecer mejor equilibrio entre capacidad estructural y funcionalidad hidráulica para aplicaciones en pavimentos permeables.

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 Conclusiones

La caracterización de los agregados provenientes de las canteras ALVORTIZ, KUMOCHI, RUMICHACA, VOLCAN y LAS JUNTAS 1 permitió identificar diferencias importantes en sus propiedades físicas y mecánicas, evidenciando la influencia del origen geológico sobre el comportamiento de los materiales. Los ensayos granulométricos mostraron variaciones en la distribución de partículas, mientras que los análisis de absorción, densidad aparente, contenido de vacíos y peso específico permitieron establecer relaciones entre porosidad, compactación y resistencia estructural. Así mismo, los resultados de resistencia al desgaste demostraron que existen diferencias significativas en la durabilidad de los agregados. ALVORTIZ presentó el mejor comportamiento mecánico y condiciones más favorables de densidad y compactación, mientras que RUMICHACA registró mayores niveles de absorción, vacíos y desgaste, evidenciando una menor calidad estructural del material.

La comparación con investigaciones previas de pavimentos articulados, flexibles y rígidos permitió determinar que los materiales pétreos de las canteras estudiadas presentan características granulométricas y mecánicas compatibles con aplicaciones en pavimentos permeables. Las gradaciones más abiertas y el menor contenido de finos favorecen la generación de vacíos interconectados, contribuyendo a mejorar la infiltración y reducir la escorrentía superficial. Sin embargo, también se identificó que algunas canteras presentan elevados niveles de absorción y contenido de vacíos, lo que podría afectar la resistencia mecánica del pavimento si no se realiza un adecuado diseño de mezcla. De esta manera, los resultados confirmaron que el desempeño hidráulico y estructural de un pavimento permeable depende directamente de las propiedades físicas y mecánicas del agregado utilizado.

A partir del análisis de los ensayos realizados y de la comparación con los requisitos establecidos por el Ministerio de Obras Públicas para materiales de base, sub-base y subrasante, se determinó que las canteras ALVORTIZ, KUMOCHI y LAS JUNTAS 1 cumplen adecuadamente con las especificaciones técnicas requeridas para capas granulares. Finalmente, se concluye que la cantera ALVORTIZ presenta el material pétreo con más potencial para el diseño de pavimentos permeables en la provincia de Tungurahua, debido a que combina una adecuada distribución granulométrica, baja absorción, alta densidad aparente, menor contenido de vacíos y la mejor resistencia al desgaste, garantizando un equilibrio favorable entre capacidad estructural y funcionamiento hidráulico.

5.2 Recomendaciones

Realizar estudios complementarios de permeabilidad e infiltración utilizando mezclas elaboradas con los agregados de las canteras estudiadas, con el fin de validar experimentalmente su desempeño hidráulico en condiciones reales de servicio.

Implementar diseños de mezcla que permitan equilibrar adecuadamente la resistencia mecánica y contenido de vacíos, especialmente en materiales con alta porosidad, para evitar pérdidas de capacidad estructural en los pavimentos permeables.

Considerar el uso prioritario del material pétreo proveniente de la cantera ALVORTIZ para aplicaciones en pavimentos permeables dentro de la provincia de Tungurahua, debido a que presentó el comportamiento más favorable en los ensayos físicos y mecánicos realizados.

Complementar los estudios con ensayos químicos y mineralógicos que permitan identificar posibles alteraciones o reacciones que puedan afectar el desempeño de los agregados en condiciones ambientales propias de la región andina.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Cárdenas, Á. Albiter, y J. Jaimes, “Pavimentos permeables. Una aproximación convergente en la construcción de vialidades urbanas y en la preservación del recurso agua”, *Ciencia Ergo*, vol. 24, núm. 2, pp. 173–180, dic. 2016.
- [2] Á. Alvarado *et al.*, “Pavimento permeable con escoria”, feb. 2024. Consultado: el 19 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://revistas.santototunja.edu.co/index.php/lingenieux/article/view/2929>
- [3] Y. De La Cruz, “Pavimientos Permeables como Alternativa de Drenaje en las principales Calles de La ciudad de Ayacucho, Perú”, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, 2017. Consultado: el 19 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unsch.edu.pe/items/0f110d26-3fda-46b1-bc7c-6c335d4f4687>
- [4] M. Estacio y R. Rodriguez, “PROPUESTA DE PAVIMENTO PERMEABLE COMO ALTERNATIVA DE SOLUCION A LOS PROBLEMAS DE INUNDACIÓN EN EL CENTRO HISTÓRICO DE TRUJILLO, 2023”, Universidad Privada del Norte, Trujillo, 2024. Consultado: el 19 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.upn.edu.pe/item/98ae2c38-6219-4bbd-9dae-154f50372ff1>
- [5] J. T. Kevern, V. R. Schaefer, y K. Wang, “Evaluation of Pervious Concrete Workability Using Gyratory Compaction”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 21, núm. 12, pp. 764–770, dic. 2009, doi: 10.1061/(asce)0899-1561(2009)21:12(764).
- [6] Q. Lyu, P. Dai, y A. Chen, “Correlations among physical properties of pervious concrete with different aggregate sizes and mix proportions”, Changzhou, mar. 2024. doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2024.2331193>.
- [7] ASOBANCA, “GUÍA DE MINAS Y CANTERAS DE MATERIAL PÉTREO”, dic. 2022, Consultado: el 19 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://asobanca.org.ec/wp-content/uploads/2022/12/12.-Guia-Minas-y-Canteras-de-material-petreo.pdf>
- [8] L. P. Thives, E. Ghisi, G. Longo, G. Hammes, y T. Belotto, “Performance of Permeable Pavement to Filter Stormwater Runoff for Non-Potable Uses in Buildings”, *European Journal of Sustainable Development*, vol. 12, núm. 3, p. 80, oct. 2023, doi: 10.14207/ejsd.2023.v12n3p80.
- [9] L. Galarza, “ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA CAPACIDAD FILTRANTE DE DRENAJE DE LOS AGREGADOS PÉTREOS PROVENIENTES DE LA MINA MORA, UBICADA EN LA PROVINCIA DE TUNGURAHUA CANTÓN AMBATO”, ago. 2024, Consultado: el 18 de

enero de 2026. [En línea]. Disponible en:
<https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/42113>

- [10] L. Veintimilla, “Determinación de la concentración y exhalación de radón-222 en agregados pétreos de las canteras Kumochi, Mora y Puerta del sol, ubicadas en el cantón Ambato provincia de Tungurahua y su influencia en la construcción.”, ago. 2021, Consultado: el 18 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en:
<https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/8e1b0244-22c8-42ea-be12-137525c4cc10/content>
- [11] American Concrete Institute, “Hormigón permeable Reportado por el Comité ACI 522”, 2006.
- [12] B. Ferguson, *POROUS PAVEMENTS*. CRC Press (Boca Raton), 2005.
- [13] Ministerio de Obras Públicas, “ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCION DE CAMINOS Y PUENTES”, 2002.
- [14] R. Weil y N. Brady, *The nature and properties of soils*. Pearson, 2017.
- [15] A. Neville, *TECNOLOGÍA DEL CONCRETO*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto : Arquine Ediciones, 2013.
- [16] Agencia de Regulación y Control Minero, “GEOPORTAL DE CATASTRO MINERO”. Consultado: el 16 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en:
<https://www.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=27bfda03ce4342b3834a27010da857e5>
- [17] Instituto Geográfico Militar, “Visor: GeoInformación a nivel nacional”, GEOPORTAL IGM. Consultado: el 16 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en:
<https://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/visualizador/>
- [18] ASTM International, “Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine”, West Conshohocken, PA, feb. 2020. doi: 10.1520/C0131_C0131M-20.
- [19] A. Manobanda y J. Poaquiza, “CARACTERISTICAS FISICAS, MECANICAS E HIDRAULICAS DEL PAVIMENTO ARTICULADO MEDIANTE EQUIPOS ELECTRICOS Y MANUALES EN LA ZONA DE HUACHI GRANDE”, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, 2025.
- [20] D. Caspi y E. Solorzano, “CARACTERISTICAS FISICAS, MECANICAS E HIDRAULICAS EVALUADAS EN EL PAVIMENTO FLEXIBLE DEL CORREDOR VIAL EL ARENAL-GUARANDA”, Riobamba, 2025.

- [21] E. Arevalo y E. Maila, “Características físico–mecánicas e hidráulicas del pavimento rígido valoradas con equipos eléctricos en la Av. Edelberto Bonilla Oleas en Riobamba”, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, 2024.
- [22] D. Tello, “CORRELACIONES ENTRE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, MECÁNICAS E HIDRÁULICAS EN PAVIMENTOS ARTICULADOS ECUATORIANOS”, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, 2025.
- [23] L. Quinchuela, “Correlaciones entre las principales características físicas, mecánicas e hidráulicas de pavimentos flexibles de la zona 3 del Ecuador”, Riobamba, 2025.
- [24] S. Alvarado, “CORRELACIONES ENTRE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, MECÁNICAS E HIDRÁULICAS DE PAVIMENTOS RÍGIDOS DE LA ZONA 3 EVALUADOS UTILIZANDO EXTRACCIÓN DE NÚCLEOS”, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, 2024.
- [25] Y. Huang, *Pavement Analysis and Desing*, 2a ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2004.
- [26] S. Kosmatka, B. Kerkhoff, y W. Panarese, *Diseño y control de mezclas de concreto*, 14a ed. Skokie, IL: Portland Cement Association, 2004.

ANEXOS



Anexo 1. *Cantera Volcán.*



Anexo 2. *Cantera Las Juntas 1*



Anexo 3. *Cantera Alvortiz*



Anexo 4. *Cantera Rumichaca*



Anexo 5. *Cantera Kumochi*



Anexo 6. *Ensayo Peso específico y Absorción*



Anexo 7. *Ensayo Granulometría*



Anexo 8. *Ensayo de Textura y Forma Superficial*



Anexo 9. *Ensayo Resistencia al Desgaste*



Anexo 10. *Ensayo Densidad Aparente y Contenido de Vacíos*



Anexo 11. *Ensayo Peso Específico y Absorción*



Anexo 12. *Ensayo Peso Específico y Absorción*

CIUDAD		Ambato	Ambato	Pelileo	Baños	Baños
NOMBRE DE LA CANTERA		Alvortiz-Ambato	Kumochi-Ambato	Rumichaca-Pelileo	Volcán-Baños	Las Juntas-Baños
Granulometría	% Gravas	55,98	44,26	18,18	30,34	17,68
	% Arenas	43,07	54,52	81,79	69,63	81,90
	% Finos	0,95	1,22	0,03	0,03	0,42
Peso específico	Grueso	2,32	2,06	1,85	1,91	1,89
	Fino	2,14	2,15	1,81	2,25	2,24
Absorción	Grueso	4,43	8,66	10,01	7,41	4,54
	Fino	10,86	9,41	18,76	6,38	7,30
Densidad aparente e índice de huecos en los áridos	Densidad aparente (kg/m ³)	1966,00	1704,00	1337,00	1622,00	1625,00
	% Contenido de vacíos	11,78	18,87	26,91	21,93	21,28
Forma y textura superficial	% Partículas planas y alargadas	0,00	0,00	0,64	1,61	0,93
	% Vacíos no compactados	31,23	31,02	42,96	38,19	39,52
Resistencia al desgaste (Los Ángeles)	Gradación	A	A	D	D	D
	% Pérdida de masa	28,18	36,08	41,70	41,10	34,12

Anexo 13. Resumen de Resultados de Ensayos de Laboratorio