

Portada Externa de Tesis

Cristofer Miranda Sánchez

2026 Evaluación técnica, económica y ambiental de los residuos
de construcción para su uso como base en pavimentos



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Evaluación técnica, económica y ambiental de los residuos de construcción para su uso como base en pavimentos

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el
grado de Maestro en Ingeniería de Vías
Terrestres y Movilidad

Presenta

Cristofer Miranda Sánchez

Santiago de Querétaro, Qro. a 29 de junio del 2026

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

**“Evaluación técnica, económica y ambiental de los residuos de construcción para su uso
como base en pavimentos”**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

Maestro en Ingeniería de vías terrestres y movilidad

Presenta:

Ing. Cristofer Miranda Sánchez

Dirigido por:

Dr. Omar Chávez Alegría

SINODALES

Dr. Omar Chávez Alegría

Presidente

Firma

Dra. Teresa López Lara

Secretario

Firma

Dr. José Alberto Rodríguez Morales

Vocal

Firma

Dra. Claudia Gutiérrez Antonio

Suplente

Firma

MI. Gerardo Medellín Aguilar

Suplente

Firma

Nombre y Firma

Director de la Facultad

Nombre y Firma

Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario

Querétaro, Qro.

Fecha

México

RESUMEN

La gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) representa un desafío ambiental significativo a nivel global, al constituir una proporción importante de los residuos sólidos y generar impactos asociados a su disposición inadecuada y a la sobreexplotación de recursos naturales. En este contexto, el presente estudio analiza la viabilidad técnica, económica y ambiental del uso de materiales reciclados provenientes de RCD como base en pavimentos, conforme a los criterios establecidos en la norma N-CMT-4-02-002/22.

La investigación se centra en la evaluación de propiedades mecánicas, físicas y ambientales del material reciclado, mediante ensayos de laboratorio como análisis granulométrico, Proctor modificado, CBR, equivalente de arena, límites de plasticidad y permeabilidad. Asimismo, se incorpora un análisis ambiental basado en el enfoque de ciclo de vida y la medición de partículas PM_{2.5} durante el proceso de producción.

Los resultados obtenidos indican que los materiales reciclados pueden cumplir con los requisitos normativos para su uso en bases hidráulicas, presentando comportamientos mecánicos comparables a los materiales convencionales. Desde el punto de vista económico, se observa que los costos de producción y aplicación son similares a los de materiales vírgenes, mientras que, en el ámbito ambiental, se identifican ventajas asociadas a la reducción en la extracción de recursos naturales y la valorización de residuos.

Se concluye que el uso de RCD en bases de pavimentos constituye una alternativa viable y sostenible, con potencial de implementación en proyectos de infraestructura vial, contribuyendo al desarrollo de prácticas alineadas con la economía circular.

Palabras clave: Residuos de construcción y demolición (RCD), base hidráulica, pavimentos, materiales reciclados, sostenibilidad.

SUMMARY

The management of construction and demolition waste (CDW) represents a significant global environmental challenge, as it constitutes a large proportion of solid waste and contributes to environmental impacts related to improper disposal and overexploitation of natural resources. In this context, this study evaluates the technical, economic, and environmental feasibility of using recycled CDW materials as base layers in pavements, in accordance with the N-CMT-4-02-002/22 standard.

The research focuses on assessing the mechanical, physical, and environmental properties of recycled materials through laboratory tests, including granulometric analysis, modified Proctor, California Bearing Ratio (CBR), sand equivalent, Atterberg limits, and permeability. Additionally, an environmental analysis based on Life Cycle Assessment (LCA) and PM2.5 particle measurement is incorporated.

The results indicate that recycled materials can meet regulatory requirements for use in hydraulic bases, exhibiting mechanical behavior comparable to conventional materials. From an economic perspective, production and implementation costs are found to be similar to those of natural materials, while environmental benefits are identified in terms of reduced natural resource extraction and waste valorization.

It is concluded that the use of CDW in pavement base layers represents a viable and sustainable alternative, with strong potential for implementation in road infrastructure projects, contributing to the development of circular economy practices in the construction sector.

Key words: Construction and Demolition Waste (CDW), hydraulic base, pavements, recycled materials, sustainability

**A mis padres, por su apoyo
incondicional, esfuerzo y confianza a lo
largo de mi formación académica.**

Las A la Universidad Autónoma de Querétaro y a la Facultad de Ingeniería, por brindarme la oportunidad de continuar con mi formación profesional y académica.

Al Dr. Omar Chávez Alegría, por su asesoría, orientación y apoyo durante el desarrollo de esta investigación.

A los sinodales, por su tiempo, observaciones y aportaciones que contribuyeron a mejorar este trabajo.

A la empresa REURBA, por las facilidades otorgadas para la obtención de materiales y el desarrollo experimental de esta investigación.

A todas las personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a la realización de este proyecto.

INDICE

	Página
Resumen	i
Summary	ii
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Indice	v
Indice de cuadros	vi
Indice de figuras	vii
I. INTRODUCCION	10
II. Planteamiento del problema	11
III. Justificación	12
IV. Objetivo	12
V. Hipótesis	13
VI. ALCANCE Y LIMITACIONES	14
VII. REVISION DE LITERATURA	14
VIII. METODOLOGIA	23
IX. RESULTADOS	32
X. DISCUSION	104
XI. CONCLUSIONES	111
XII. Productos derivados	113
XIII. Citas bibliográficas	114
XIV. LITERATURA CITADA	117
XV. APENDICE	118

INDICE DE CUADROS

	Página
Tabla 1. Comparación de los diferentes parámetros técnicos a evaluar.....	17
Tabla 2. Capas de un pavimento	19
Tabla 3. Requisitos de granulometría para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico.....	35
Tabla 4. requisitos de granulometría para bases de pavimentos con carpetas de mezcla asfáltica.....	36
Tabla 5. Comparación de la pérdida por abrasión (Los Ángeles) de los materiales evaluados antes y después de la compactación.....	74
Tabla 6. Comparativa de propiedades de los materiales antes y después de la compactación e interpretación técnica.....	86
Tabla 7. Resultados del muestreo de material particulado.....	94
Tabla 8. Comparación entre banco natural y de RCD.....	94
Tabla 9. Comparación con estudios de trituradoras.....	95
Tabla 10. Matriz de interacción entre las diferentes propiedades a evaluar.....	110

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1. Capas de un pavimento flexible	20
Figura 2. Capas de un pavimento rígido	20
Figura 3. Metodología de caracterización.....	26
Figura 4. Interfaz principal del programa.....	29
Figura 5. Diagrama de metodología a emplear en el proyecto..	31
Figura 6. Proceso de obtención del material reciclado.....	33
Figura 7. Proceso del análisis granulométrico.....	34
Figura 8. Requisitos de granulometría para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico.....	35
Figura 9. Requisitos de granulometría para bases de pavimentos con carpetas de mezcla asfáltica.....	36
Figura 10. Elaboración de prueba de límites de atterberg.....	43
Figura 11. Elaboración de ensayo Proctor.....	49
Figura 12. Equipo para prueba de alargamiento y lajeo.....	51
Figura 13. Comparación del coeficiente de permeabilidad del material “La Cañada” antes de la compactación.....	63
Figura 14. Resultados del coeficiente de permeabilidad del material “La Cañada” después de la compactación.....	64
Figura 15. Resultados del coeficiente de permeabilidad del material “La Luz” antes de la compactación.....	65
Figura 16. Resultados del coeficiente de permeabilidad del material “La Luz” después de la compactación.....	66
Figura 17. Resultados del coeficiente de permeabilidad del material REURBA antes de la compactación.....	67
Figura 18. Resultados del coeficiente de permeabilidad del material REURBA después de la compactación.....	88
Figura 19. Curva típica carga-penetración ensayo cbr "Banco La Luz".....	79
Figura 20. Resultados del análisis de impacto en cuanto a su caracterización comparando los cuatro procesos (material natural vs RCD y sus alternativas).....	89
Figura 21. Resultados del análisis de impacto en cuanto a la evaluación de daño comparando los cuatro procesos (material natural vs RCD y sus alternativas).....	90
Figura 22. Resultados del inventario de sustancias producidas en el proceso de cada una de las cuatro opciones.....	91
Figura 23. Equipo para la medición de partículas.....	93
Figura 24. Mapa de aptitud territorial para el procesamiento de RCD en Querétaro generado mediante el algoritmo de optimización espacial.....	103
Figura 25. Resumen y Análisis de los parámetros, candidatos y puntos de interés considerados.....	104

I. INTRODUCCIÓN

La creciente generación de residuos de construcción y demolición (RCD) constituye un desafío ambiental relevante en el sector de la construcción, al representar una proporción significativa de los residuos sólidos y generar impactos asociados a su disposición inadecuada. Estos materiales, frecuentemente subutilizados, ocupan grandes volúmenes en sitios de disposición final y contribuyen a la sobreexplotación de recursos naturales utilizados como agregados en la industria de la construcción (Jiménez et al., 2013; Medina, 2017).

De manera paralela, la infraestructura vial enfrenta la necesidad de incorporar soluciones más sostenibles en el diseño y construcción de pavimentos, particularmente en las capas estructurales como las bases hidráulicas, cuyo desempeño depende en gran medida de las propiedades mecánicas de los materiales empleados (Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT], 2022). En este contexto, la reutilización de RCD como material para bases de pavimentos se presenta como una alternativa viable que permite integrar estrategias de gestión de residuos con criterios de sostenibilidad en la construcción (Poon & Chan, 2006).

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental del uso de materiales reciclados provenientes de RCD como material estructural en bases de pavimentos. Desde el enfoque técnico, se analizan propiedades fundamentales como la granulometría, límites de plasticidad, capacidad de soporte (CBR), resistencia al desgaste y contenido óptimo de humedad, comparándolas con las de materiales convencionales (Rodríguez et al., 2020; López et al., 2018).

En el ámbito económico, se realiza una evaluación comparativa de los costos asociados al procesamiento y utilización de materiales reciclados frente a materiales vírgenes. Asimismo, desde el punto de vista ambiental, se analizan los beneficios derivados de la

reducción en la disposición de residuos, la disminución en la extracción de materiales naturales y la mitigación de impactos asociados al ciclo de vida de los materiales.

A través de ensayos de laboratorio, análisis comparativos y evaluación de indicadores ambientales, este estudio busca validar el uso de RCD en bases hidráulicas, así como aportar elementos técnicos que favorezcan su implementación en proyectos de infraestructura vial, en concordancia con los principios de sostenibilidad y economía circular establecidos en la Agenda 2030 (Organización de las Naciones Unidas, 2015; European Commission, 2020).

II. Planteamiento del problema

En México, la industria de la construcción genera grandes volúmenes de residuos de construcción y demolición (RCD), los cuales en muchos casos son dispuestos de manera inadecuada en tiraderos clandestinos, cauces de ríos, áreas naturales o terrenos baldíos. Esta situación genera impactos ambientales significativos, como la contaminación del suelo, la alteración del paisaje, la obstrucción de sistemas de drenaje pluvial y la emisión de partículas suspendidas. A la par, la construcción de pavimentos sigue dependiendo en gran medida de la extracción de materiales pétreos provenientes de bancos naturales para la conformación de capas estructurales, como las bases hidráulicas. Esta práctica tradicional implica severas afectaciones ambientales asociadas a la degradación del entorno, pérdida de cobertura vegetal, elevado consumo de energía y la constante generación de emisiones de carbono durante los procesos de extracción, trituración y transporte.

A nivel mundial, la escasez de agregados naturales y la creciente presión regulatoria por adoptar modelos de economía circular han priorizado la transición hacia pavimentos sostenibles. Las investigaciones internacionales más recientes destacan que los áridos reciclados provenientes de demolición (específicamente de concreto y mampostería) pueden sustituir exitosamente a los agregados vírgenes en las capas de base y subbase, satisfaciendo las especificaciones mecánicas exigidas, tales como la resistencia al esfuerzo cortante y los valores de soporte California (CBR). Además de incorporar tecnologías avanzadas y buscar la adaptación a los cambios climáticos

(Chen et al., 2024), el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) a nivel global ha demostrado que la construcción de bases con RCD puede llegar a reducir las emisiones de CO₂ entre un 60 % y 72 %, al tiempo que disminuye el consumo de agregados naturales hasta en un 90 %. Esto subraya que la valorización de escombros es una estrategia directa para mitigar el calentamiento global y fortalecer la infraestructura civil resiliente.

Ante este escenario, surge la imperante necesidad de evaluar y estandarizar alternativas locales que permitan la reutilización de residuos de construcción procesados como materiales para capas estructurales en pavimentos, reduciendo la extracción de recursos naturales y la saturación de los sitios de disposición final. La presente tesis evalúa el comportamiento mecánico, hidráulico y ambiental de materiales reciclados provenientes de residuos de construcción procesados por la empresa REURBA, comparándolos directamente con materiales de bancos naturales locales (AGC y La Luz). Este estudio contribuye al conocimiento científico y técnico al validar, mediante ensayos de laboratorio, métricas ambientales (monitoreo de PM_{2.5} y ACV) y análisis de precios unitarios, que los RCD cumplen integralmente con los parámetros técnicos y normativos vigentes (como la N-CMT-4-02-002/22). De esta forma, se establece la factibilidad técnica, económica y ambiental de los materiales reciclados para su implementación en proyectos de infraestructura vial en la región.

III.JUSTIFICACION

La reutilización de residuos de construcción y demolición como material en capas estructurales de pavimentos representa una alternativa con potencial técnico, ambiental y económico, orientada a reducir la extracción de agregados naturales y a mejorar la gestión integral de residuos en el sector de la construcción.

Desde el punto de vista técnico, el uso de materiales reciclados en bases hidráulicas es viable siempre que estos cumplan con los requisitos establecidos en la normativa vigente, tales como granulometría, resistencia, plasticidad, índice de forma y permeabilidad, garantizando un desempeño adecuado dentro de la estructura del pavimento.

En el ámbito ambiental, la valorización de los RCD contribuye a la disminución de impactos asociados a la disposición final de residuos, reduce la presión sobre bancos de materiales naturales y favorece la disminución de emisiones relacionadas con la extracción, procesamiento y transporte de agregados vírgenes.

Adicionalmente, este estudio aporta información técnica aplicada a nivel regional, lo cual resulta relevante para la toma de decisiones en proyectos de infraestructura vial, al promover el uso de materiales alternativos sustentados en evidencia experimental.

En este sentido, la investigación se alinea con los principios de sostenibilidad y economía circular, al fomentar el aprovechamiento de residuos como recursos dentro del ciclo productivo de la construcción.

IV. OBJETIVO

Objetivo general

Evaluar el uso de residuos de construcción como material para bases hidráulicas en pavimentos, mediante la determinación de sus propiedades mecánicas, durabilidad y su viabilidad técnica, ambiental y económica.

Objetivos particulares

1. Caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales reciclados y naturales mediante ensayos de laboratorio, conforme a la norma N-CMT-4-02-002/22.
2. Verificar el cumplimiento de los materiales reciclados con los requisitos normativos establecidos para su uso en bases hidráulicas.
3. Analizar el impacto ambiental asociado al uso de materiales reciclados, considerando tanto la generación de partículas $PM_{2.5}$ como la huella de carbono mediante análisis de ciclo de vida.

V. HIPÓTESIS

El uso de residuos de construcción y demolición como material para bases hidráulicas en pavimentos presenta propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas comparables a

las de los materiales convencionales, cumpliendo con los requisitos establecidos en la normativa vigente. Asimismo, su utilización representa una alternativa ambientalmente favorable, al contribuir a la reducción en la disposición de residuos y en la extracción de materiales naturales, sin generar incrementos significativos en los costos de construcción.

VI. ALCANCE Y LIMITACIONES

El presente estudio se limita a la evaluación de las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas de materiales reciclados y naturales mediante ensayos de laboratorio, así como al análisis comparativo de la generación de partículas PM2.5 durante su procesamiento.

El análisis se enfoca en la caracterización y verificación del cumplimiento normativo de los materiales para su posible uso como base hidráulica en pavimentos, sin considerar su comportamiento a largo plazo bajo condiciones reales de servicio, tales como cargas repetidas, variaciones climáticas y procesos de degradación.

Asimismo, el análisis económico y ambiental se plantea en un nivel comparativo, por lo que los resultados obtenidos corresponden a una evaluación de factibilidad inicial y no a un estudio detallado de ciclo de vida completo.

VII. REVISION DE LITERATURA

La reutilización de residuos de construcción y demolición (RCD) en la infraestructura vial ha sido ampliamente estudiada como una alternativa sostenible para la reducción del impacto ambiental asociado a la disposición de residuos y a la extracción de materiales pétreos. Diversas investigaciones han demostrado que los agregados reciclados pueden presentar propiedades mecánicas adecuadas para su uso en capas estructurales de pavimentos, particularmente en bases hidráulicas (Pon & Chan, 2006; Medina, 2017).

7.1 Economía circular y gestión de RCD

El concepto de economía circular en la construcción promueve la reincorporación de

materiales al ciclo productivo mediante estrategias de reutilización, reciclaje y valorización, reduciendo la generación de residuos y el consumo de recursos naturales (Geissdoerfer et al., 2017).

En México, los residuos de construcción y demolición son clasificados como residuos de manejo especial conforme a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), lo que implica la necesidad de implementar estrategias adecuadas para su manejo y aprovechamiento. Normativas como la NOM-161-SEMARNAT-2011 fomentan la valorización de estos residuos, mientras que la NOM-083-SEMARNAT-2003 regula su disposición final bajo criterios ambientales específicos.

Asimismo, la NOM-161-SEMARNAT-2011 regula la clasificación y manejo de residuos para promover su reutilización, reciclaje y valorización, lo cual es relevante para proyectos de reutilización de escombros en pavimentos (Gobierno de México, 2023). En México existen más de 100 sitios de disposición final para residuos sólidos municipales y especiales, que deben cumplir con normativas de selección de sitios y diseño de instalaciones; sin embargo, solo se cuenta con un único centro integral de manejo de residuos que cumple con los criterios establecidos por la NOM-083-SEMARNAT-2003, ubicado en el municipio de El Marqués, en el estado de Querétaro. Este centro también se rige por la Norma Técnica Ambiental Estatal para el Manejo de Residuos de Construcción y Demolición (NACRCD), que aborda aspectos relacionados con la gestión y manejo adecuado de los residuos generados durante actividades de construcción y demolición.

7.2 Propiedades mecánicas de agregados reciclados

El comportamiento de los materiales reciclados en pavimentos depende de sus propiedades físicas y mecánicas, tales como granulometría, plasticidad, resistencia al desgaste y capacidad de soporte.

Estudios recientes han demostrado que los agregados reciclados de concreto pueden alcanzar valores adecuados de resistencia y capacidad de carga, medidos mediante ensayos como el California Bearing Ratio (CBR), permitiendo su uso en capas de base y subbase bajo ciertas condiciones (Behera et al., 2020).

No obstante, el desempeño de estos materiales depende de factores como la calidad del material de origen, el proceso de trituración y la presencia de impurezas, por lo que su caracterización es fundamental antes de su aplicación en obra.

7.3 Normativas aplicable

En México, la norma N-CMT-4-02-002/22 establece los requisitos técnicos que deben cumplir los materiales empleados en bases hidráulicas para pavimentos, incluyendo criterios de granulometría, límites de plasticidad, equivalente de arena, desgaste de los agregados y capacidad de soporte.

El cumplimiento de esta normativa es fundamental para garantizar el adecuado desempeño estructural del pavimento, por lo que cualquier material alternativo, como los agregados reciclados, debe ser evaluado bajo estos mismos criterios para determinar su viabilidad de uso.

7.3 Parámetros de evaluación de materiales

La caracterización de materiales para bases hidráulicas se realiza mediante ensayos de laboratorio que permiten determinar su comportamiento mecánico e hidráulico. Entre los principales parámetros evaluados se encuentran:

- Granulometría
- Límites de Atterberg
- Equivalente de arena
- Desgaste de los Ángeles
- Compactación (Proctor modificado)
- California Bearing Ratio (CBR)
- Permeabilidad

Estos parámetros permiten establecer si el material cumple con los requisitos normativos y si es apto para su uso en capas estructurales de pavimentos.

Tabla 1. Comparación de los diferentes parámetros técnicos a evaluar

Parámetro	Descripción	Valores típicos
California bearing ratio (CBR)	Mide la resistencia al corte de suelos o materiales de base compactados. Determina la capacidad de soporte del suelo en porcentaje.	Grava: 80%-100% Arcilla: 5%-20%
Grado de compactación con AASHTO modificada	Evaluación de la densidad máxima alcanzada por un suelo o material base compactado, usando el ensayo proctor modificado (AASHTO T180).	95%-100% de la densidad máxima
Desgaste de los ángeles	Mide la resistencia de los agregados gruesos al desgaste mediante la máquina de los ángeles, simula el tráfico rodado.	<40% es aceptable para capas de rodadura. Materiales reciclados: 30%-35%
Límites de plasticidad	Determina el contenido de humedad a partir del cual un suelo pasa de ser plástico a friable. Crucial para evaluar la estabilidad del material.	Suelos con límite plástico alto (>30%) son inestables. Escombros reciclados tienen límites más bajos.

Autoría propia con información tomada de El-Badawy y Gabr (2021) y con base en los parámetros establecidos en la norma N-CMT-4-02-002/22 de la SCT.

7.5 Impacto ambiental y económico

El uso de materiales reciclados en pavimentos contribuye a la reducción de impactos ambientales asociados a la disposición de residuos y a la extracción de materiales vírgenes. Entre los principales beneficios se encuentran:

- Disminución en la generación de residuos sólidos
- Reducción en la explotación de bancos naturales
- Menor consumo de recursos y energía

Adicionalmente, el análisis de partículas suspendidas, como PM2.5, permite evaluar el impacto en la calidad del aire durante los procesos de producción y manejo de materiales.

7.6 Diseño de pavimentos en la actualidad

El diseño de pavimentos ha experimentado avances importantes en los últimos años, tanto a nivel global como en México. A nivel mundial, se han priorizado los pavimentos sostenibles, buscando reducir los costos de vida útil y el impacto ambiental. Las investigaciones recientes destacan el uso de materiales reciclados como el asfalto reciclado y el empleo de tecnologías avanzadas como la nanotecnología para mejorar la durabilidad y el rendimiento de los pavimentos. Además, se ha investigado cómo los cambios climáticos afectarán el desempeño a largo plazo de las infraestructuras viales, enfatizando la necesidad de diseños que se adapten a condiciones meteorológicas extremas (Chen et al., 2024; Frontiers in Materials, 2023).

En cuanto a México, el país ha estado adoptando tendencias similares, con un enfoque en la reutilización de materiales para la construcción de carreteras y la incorporación de nuevas tecnologías en el diseño de pavimentos. La investigación en materiales reciclados, como los residuos de construcción y demolición, está ganando relevancia como una solución ambientalmente responsable y económica, cumpliendo con las normativas locales y con los estándares internacionales. Se han observado mejoras en los procesos de compactación y uso de geo sintéticos para reforzar las bases del pavimento y prolongar su vida útil, lo que demuestra un avance hacia pavimentos más sostenibles y resistentes (Prakash & Rathod, 2024).

En México, según la normativa vigente como la N_CMT-4-02-002/22, se han adoptado procesos de diseño que aseguran tanto el cumplimiento de los requisitos de durabilidad como el respeto a las restricciones ambientales, con un enfoque particular en el uso de materiales que minimicen la huella de carbono (Chen et al., 2024).

7.7 Capas de un pavimento

Un pavimento es una estructura diseñada para soportar y distribuir de manera eficiente las cargas generadas por el tráfico vehicular hacia el suelo subyacente. Está compuesto por una serie de capas con propiedades y funciones específicas, cuya principal tarea es reducir el impacto directo sobre la subrasante, mejorando la durabilidad del pavimento y la calidad de la conducción. Cada una de las capas contribuye al comportamiento estructural del pavimento, proporcionando resistencia, drenaje y estabilidad. A continuación, en la Tabla 1 se especifican cada una de las capas de un pavimento y de manera más visual de la distribución de las capas se tiene la Figura 1 para un pavimento flexible y la Figura 2 para un pavimento rígido.

Tabla 2. Capas de un pavimento

Nombre de la capa	Descripción
Subrasante	Es la capa de suelo natural que soporta las demás capas del pavimento. Su resistencia y capacidad de soporte son cruciales para el desempeño del pavimento.
Subbase	Es una capa de material granular, como grava o piedra triturada, que se coloca sobre la subrasante. Proporciona soporte adicional y ayuda a distribuir las cargas.
Base	Esta capa está compuesta por materiales más finos y compactos que la subbase, como gravas trituradas o material estabilizado. Su función es distribuir las cargas de manera uniforme y proporcionar una superficie estable para la capa de rodadura.
Capa de rodadura (superficie de pavimento)	Es la capa superior del pavimento, la que está en contacto directo con el tráfico.

	Puede ser de asfalto, concreto o adoquines, y está diseñada para resistir la abrasión y proporcionar una superficie de rodadura adecuada.
--	---

Autoría propia con información tomada de Pineda, G. R. (2020).

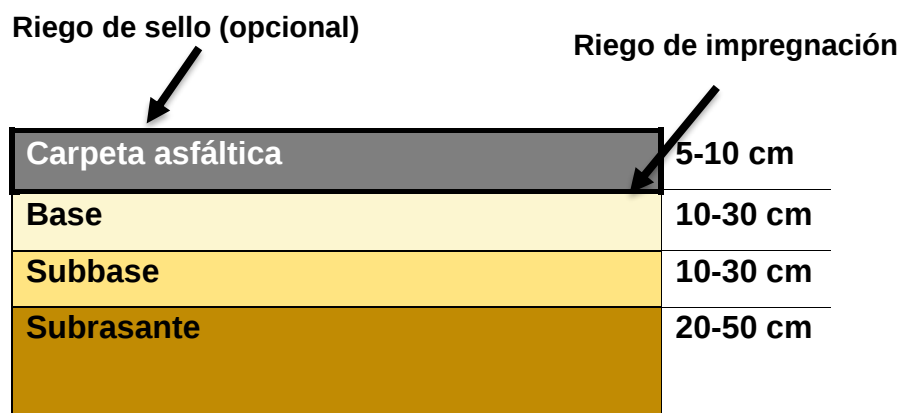


Figura 1. Capas de un pavimento flexible. Autoría propia.

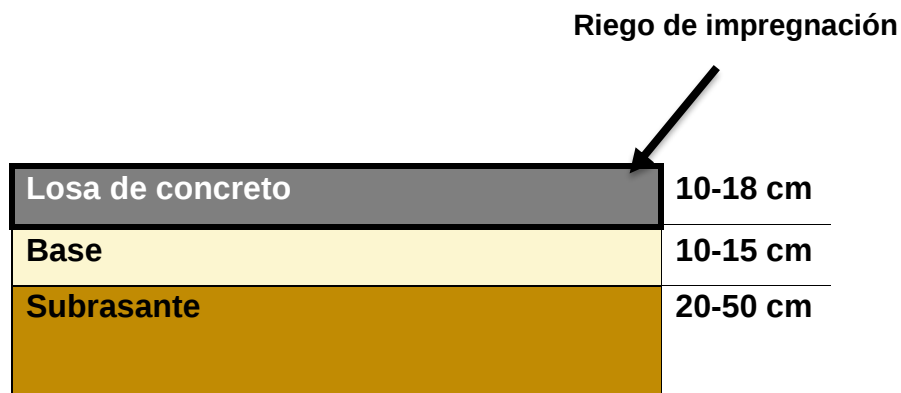


Figura 2. Capa de un pavimento rígido. Autoría propia.

7.8 Proceso de reciclaje de RCD

7.9 Norma ambiental

La norma técnica ambiental estatal para el estado de Querétaro (NTAE),

específicamente la Norma Técnica Ambiental Estatal para el Manejo de Residuos de Construcción y Demolición (NACRCD), aborda aspectos relacionados con la gestión y manejo adecuado de los residuos generados durante actividades de construcción y demolición.

Las normativas técnicas ambientales estatales para la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) se centran en minimizar el impacto ambiental promoviendo la separación, reutilización y reciclaje de los materiales. Estas normativas exigen la creación de planes de manejo de residuos, la clasificación en obra, y la reutilización de materiales para nuevas construcciones. Además, se establecen porcentajes mínimos de uso de materiales reciclados, con el objetivo de reducir hasta en un 30% los desechos enviados a vertederos y los costos de materiales en un 50% (Humam et al., 2020; EPA, 2020). Las sanciones y regulaciones incentivan un manejo más eficiente de los RCD en los proyectos de construcción.

7.10 Economía circular aplicada a los RCD

El concepto de economía circular en la industria de la construcción propone mantener los materiales el mayor tiempo posible dentro del ciclo productivo mediante estrategias de reutilización, reciclaje y valorización (Geissdoerfer et al., 2017).

En este contexto, los RCD representan una fuente potencial de agregados reciclados que pueden emplearse en capas estructurales de pavimentos, disminuyendo el consumo de materiales vírgenes y reduciendo la generación de residuos sólidos (European Environment Agency, 2020).

La integración de RCD en procesos constructivos se ha convertido en una estrategia clave para mitigar los impactos ambientales derivados de la sobreexplotación de bancos naturales de material pétreo (Delgado & Ramírez, 2018).

7.10 Proceso de reciclaje del material en la planta REURBA

El proceso de reciclaje de residuos de construcción en plantas especializadas sigue una secuencia general de recepción, separación, trituración y clasificación granulométrica, con el objetivo de obtener agregados reciclados con propiedades adecuadas para su reutilización en obra civil (Agrela et al., 2011).

En el caso de la planta REURBA, el proceso observado durante la investigación se puede describir mediante las siguientes etapas:

1. Recepción de residuos:

Se reciben residuos provenientes de diversas obras, los cuales contienen materiales heterogéneos.

2. Separación y limpieza preliminar:

Se eliminan manual y mecánicamente materiales no pétreos como metales, plásticos y madera.

3. Selección del material pétreo:

Se prioriza concreto endurecido y fragmentos pétreos, descartando materiales contaminantes.

4. Trituración:

Se somete el material a trituración primaria y secundaria para reducir el tamaño máximo de partícula.

5. Cribado y clasificación:

Mediante cribas vibratorias se obtienen fracciones granulométricas específicas para distintos usos.

Procesos similares han sido documentados en estudios sobre plantas de reciclaje de agregados de RCD (Silva et al., 2014; Agrela et al., 2011).

7.10 Análisis económico del uso de materiales reciclados

Diversos estudios indican que el costo del agregado reciclado puede ser similar al de los materiales vírgenes cuando se consideran los gastos de transporte, trituración y procesamiento (Poon & Chan, 2006; Gómez & López, 2019).

De acuerdo con la información proporcionada por el responsable técnico de la planta REURBA (comunicación personal, 2025), el costo del material reciclado es comparable al del material natural debido a:

- Costos de transporte similares.
- Uso de equipos de trituración equivalentes.
- Consumo energético y costos operativos semejantes.

Sin embargo, se reconoce que el principal beneficio del material reciclado radica en su impacto ambiental positivo más que en la reducción directa de costos (Medina et al., 2021).

VIII. METODOLOGIA

Para evaluar la viabilidad del uso de residuos de construcción y demolición (RCD) como material para bases hidráulicas en pavimentos, se desarrolló una metodología estructurada en tres ejes fundamentales de evaluación:

Evaluación técnica: Orientada a la caracterización física y mecánica de los materiales mediante ensayos de laboratorio (granulometría, límites de Atterberg, Proctor modificado, CBR, equivalente de arena, forma de partícula y permeabilidad) para verificar el cumplimiento normativo.

Evaluación ambiental: Enfocada en cuantificar el impacto del procesamiento de los materiales mediante el monitoreo de emisiones de partículas finas (PM_{2.5}) en campo y la determinación de la huella de carbono a través de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de la cuna a la tumba.

Evaluación económica: Destinada a comparar los costos directos de producción, procesamiento y transporte de los materiales reciclados frente a los agregados naturales mediante Análisis de Precios Unitarios (APU).

8.1 Revisión bibliográfica

Se realizó una revisión de literatura técnica y científica relacionada con el uso de

residuos de construcción en infraestructura vial, considerando aspectos mecánicos, ambientales y normativos. Asimismo, se analizaron normas nacionales e internacionales aplicables al diseño y evaluación de materiales para pavimentos, con el fin de establecer los criterios de referencia para la investigación.

8.2 Recolección de muestras

Las muestras de material reciclado se obtuvieron de la planta de reciclaje REURBA, mientras que los materiales naturales provinieron de bancos de la región (AGC y La Luz).

El muestreo se realizó mediante el método del cono, formando un montículo de material del cual se extrajo una muestra representativa mediante un canal central desde la parte superior hasta la base. El material recolectado fue almacenado en costales para su posterior análisis en laboratorio.

8.3 Preparación y caracterización de materiales

Las muestras fueron preparadas conforme a procedimientos normalizados para garantizar la consistencia de los ensayos.

- Se realizaron las siguientes determinaciones:
- Granulometría mediante tamizado (ASTM C136)
- Propiedades índices (límites de Atterberg)
- Peso específico de los agregados (ASTM C127 y C128)

8.4 Ensayes de laboratorio

Análisis granulométrico

Se realizó el análisis granulométrico mediante tamizado en seco, con el fin de determinar la distribución de tamaños de partículas y verificar el cumplimiento con las especificaciones para material de base hidráulica (SICT, 2022).

Este ensaye permitió obtener la curva granulométrica característica de cada material.

Ensaye Proctor modificado

Se realizó el ensayo Proctor modificado para determinar la **densidad seca máxima** y la **humedad óptima** de cada material, siguiendo procedimientos estándar de compactación de suelos y materiales granulares (ASTM D1557).

Ensayo CBR (California Bearing Ratio)

Se llevó a cabo el ensayo CBR para evaluar la capacidad de soporte de cada material, utilizando moldes compactados a su humedad óptima y densidad seca máxima.

El CBR se determinó conforme a procedimientos normalizados, controlando la velocidad de penetración y las condiciones de compactación (ASTM D1883).

Equivalente de arena

Se realizó el ensayo de equivalente de arena con el fin de evaluar la limpieza del material en términos de contenido de finos arcillosos.

Este parámetro es importante para determinar la calidad del material en capas estructurales (ASTM D2419).

Ensayo de lajeo y alargamiento

El ensayo de índice de forma (lajeo y alargamiento) se realizó para evaluar la geometría de las partículas del material, ya que una forma inadecuada puede afectar la compactación y la estabilidad mecánica de la base (SICT, 2022).

Los resultados se compararon con los parámetros establecidos en la normatividad para bases hidráulicas.

Ensayo de permeabilidad

Se realizaron ensayos de permeabilidad para evaluar la capacidad del material de permitir el flujo de agua, parámetro relevante en capas estructurales de pavimentos para garantizar el adecuado drenaje interno.

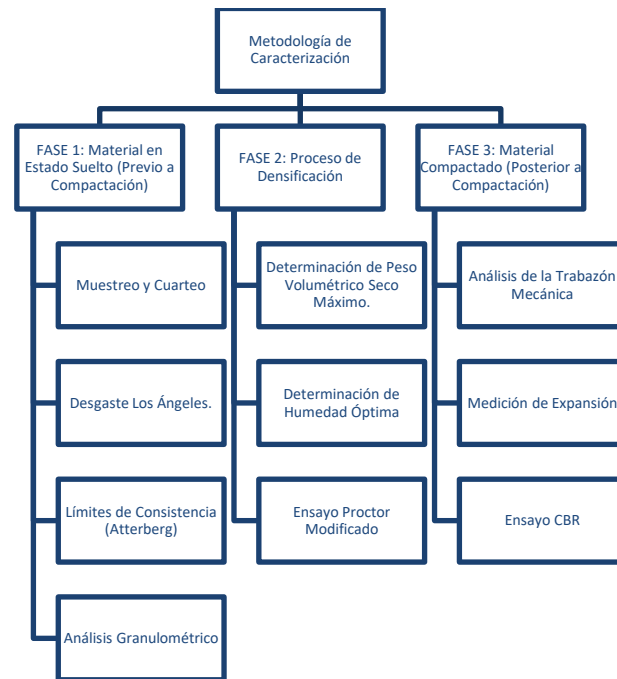


Figura 3. Metodología de caracterización. Autoría propia.

8.5 Análisis económico

El análisis económico se realizó de forma comparativa entre materiales reciclados y materiales provenientes de bancos naturales, considerando:

- Costos de transporte
- Costos de procesamiento (trituración)
- Costos operativos

De acuerdo con información obtenida de la planta REURBA (comunicación personal, 2025), los costos del material reciclado son comparables a los del material natural, por lo que el análisis se enfocó en evaluar la viabilidad económica en términos relativos.

8.6 Evaluación ambiental

Análisis de partículas PM2.5

La concentración de partículas PM2.5 se evaluó mediante un medidor portátil de partículas suspendidas, durante el proceso de trituración del material reciclado en la planta REURBA.

Las mediciones se realizaron en puntos estratégicos dentro de la planta, en horarios de operación, y los valores obtenidos fueron comparados con los límites establecidos en la normatividad ambiental vigente para calidad del aire (Secretaría de Salud, 2014).

Dado que no se cuenta con un monitoreo continuo, los resultados se consideran como una evaluación preliminar del impacto ambiental asociado al proceso de reciclaje.

Determinación de la concentración de material particulado

La concentración de material particulado fue determinada mediante el método gravimétrico utilizando filtros previamente pesados antes y después del muestreo. La concentración se calculó mediante la ecuación:

$$C = \Delta m / V$$

donde:

- **C** = concentración de material particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- **Δm** = diferencia de masa del filtro antes y después del muestreo (μg)
- **V** = volumen total de aire muestreado (m^3)

Volumen de aire muestreado

El equipo operó con un **caudal constante de $2.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$** durante una jornada de **8 horas**.

Conversión del caudal: $2.0 \text{ L}/\text{min} = 0.002 \text{ m}^3/\text{min}$

Tiempo de muestreo: 8 h=480 min

Volumen total muestreado: $V=0.002 \times 480$

Ajuste al promedio de 24 horas

Las normas de calidad del aire establecen límites para **promedios de 24 horas**, por lo que las concentraciones obtenidas durante las jornadas de **8 horas** se ajustaron para su comparación normativa.

El ajuste se realizó mediante:

$$C_{24h} = C_{8h} \times (8/24)$$

$$C_{24h} = C_{8h} \times (0.33)$$

Este procedimiento permite estimar el equivalente diario bajo el supuesto de que la concentración medida representa el periodo activo del día.

Análisis de ciclo de vida (ACV)

Se realizó un análisis de ciclo de vida conforme a las normas ISO 14040 e ISO 14044, utilizando el software SimaPro.

Se evaluaron dos escenarios:

- Producción de base hidráulica con material natural
- Producción de base hidráulica con RCD

Se definió una unidad funcional común y se analizaron las entradas (materia prima, energía, transporte) y salidas (emisiones), evaluando el impacto ambiental mediante el indicador de potencial de calentamiento global (GWP100). y la evaluación de daño asociada a la huella de carbono.

8.7 Desarrollo de un Modelo de Optimización Espacial para Sitios de Procesamiento de RCD

De manera complementaria a la caracterización física y mecánica de los materiales,

se desarrolló un Modelo de Optimización Espacial fundamentado en un Análisis Multicriterio (AMC). El objetivo de este modelo es identificar las zonas con mayor aptitud territorial para el establecimiento de plantas de procesamiento de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en el municipio de Querétaro, correlacionando la viabilidad técnica del material con la factibilidad logística y ambiental de su producción.

Para la ejecución del AMC, se programó una herramienta computacional interactiva estructurada en el lenguaje Python. La estructuración del código, la definición de la lógica geoespacial y la depuración de errores del algoritmo se realizaron con el apoyo del modelo de inteligencia artificial Gemini, operando bajo la estricta supervisión, validación técnica y diseño de parámetros por parte del autor.

El algoritmo evalúa el territorio mediante una matriz de resolución de 200 celdas, calculando distancias geoespaciales a través de la fórmula de Haversine. La interfaz del programa permite la ingesta de parámetros dinámicos

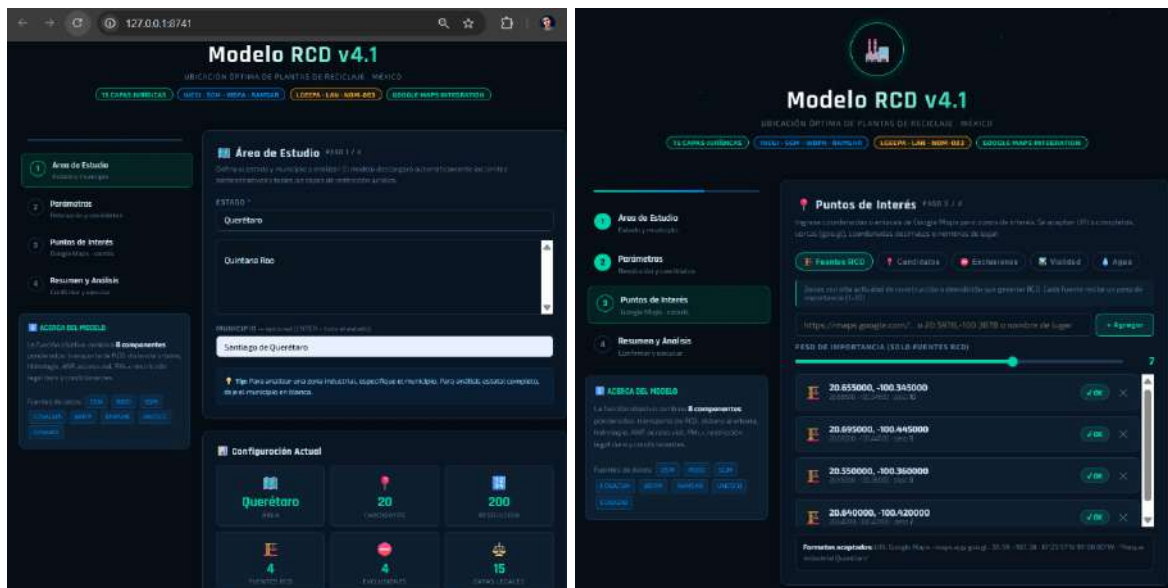


Fig.4 Interfaz principal del programa.

Facilitando la ponderación de las siguientes variables:

- **Fuentes de Generación (Demanda):** Zonas con alta actividad constructiva (Zibatá, Juriquilla, Centro Sur, Paseo Querétaro), priorizando la reducción de la huella de carbono por transporte.

- **Infraestructura Preexistente (Co-ubicación):** Evaluación de 9 bancos extractivos y plantas actuales (incluyendo el sitio REURBA) para aprovechar el uso de suelo industrial vigente.
- **Restricciones Ambientales y Urbanas:** Aplicación de radios de exclusión (buffers) normativos para proteger Áreas Naturales Protegidas (ej. Parque Nacional El Cimatario con buffer de 1.5 km), zonas de patrimonio histórico, infraestructura hospitalaria y cuerpos de agua estratégicos (Presa Santa Catarina, Presa El Batán y Río Querétaro), en estricto apego a la NOM-083-SEMARNAT-2003 y el ordenamiento territorial local.
- **Conectividad Vial:** Ponderación positiva por proximidad a ejes logísticos de carga pesada, asegurando la viabilidad del transporte del material procesado hacia los frentes de obra.

8.8 Análisis y comparación de datos

El análisis de resultados se realizó mediante:

- Estadística descriptiva (promedios y rangos).
- Comparación directa entre bancos.
- Análisis gráfico de comportamiento (curvas granulométricas, curva Proctor, relaciones CBR-humedad).

Este enfoque permitió evaluar la viabilidad técnica del material reciclado frente a los materiales naturales dentro de un marco normativo y comparativo.

8.9 Conclusiones y recomendaciones

En la fase de conclusiones y recomendaciones, se elabora una síntesis de resultados que resume los hallazgos más relevantes del estudio, proporcionando una visión clara y concisa de los descubrimientos obtenidos. Estos hallazgos se interpretan en el contexto de la viabilidad técnica y económica del uso de escombros de construcción,

evaluando su potencial para ser una alternativa viable en proyectos viales. A partir de esta interpretación, se desarrollan directrices que incluyen la formulación de recomendaciones prácticas para la implementación de escombros en proyectos de infraestructura. Estas recomendaciones se complementan con la elaboración de guías y procedimientos basados en los resultados obtenidos, lo que facilitará su adopción en el ámbito profesional. Finalmente, se contempla la divulgación de resultados a través de presentaciones en conferencias, seminarios y publicaciones académicas, asegurando que la información llegue a una audiencia amplia y relevante, promoviendo así el uso sostenible de los residuos de construcción en la industria vial.

En la Figura 4. Se muestra los pasos de la metodología a emplear en el proyecto.

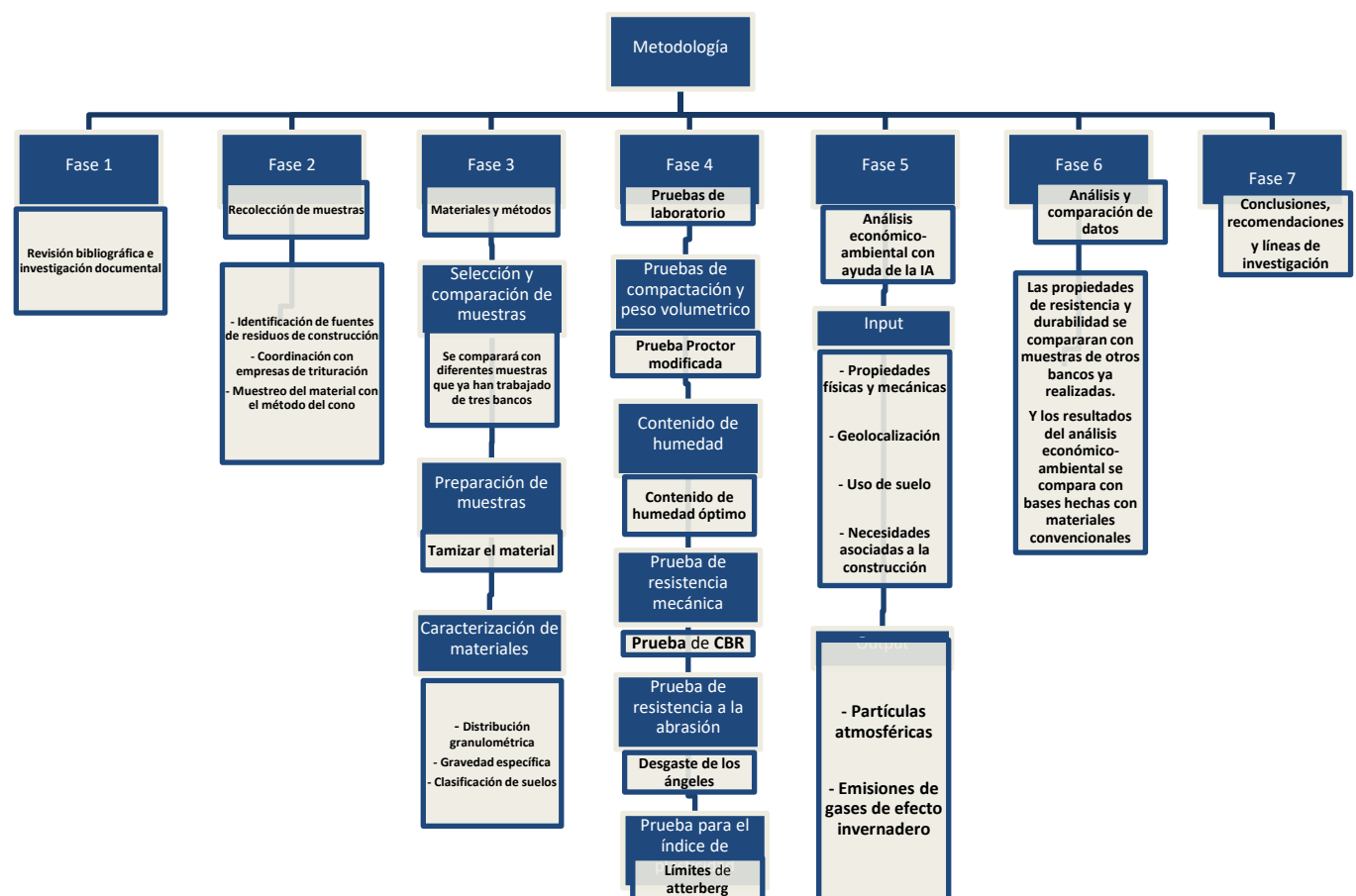


Figura 5. Diagrama de metodología a emplear en el proyecto. Elaboración propia.

IX. RESULTADOS

9.1 Introducción a los ensayos realizados

Con el objetivo de evaluar la viabilidad del uso de residuos de construcción y demolición (RCD) como material para bases hidráulicas, se realizaron diversos ensayos de laboratorio conforme a la normativa vigente.

Los ensayos efectuados incluyen:

- Análisis granulométrico
- Límites de Atterberg
- Equivalente de arena
- Compactación (Proctor modificado)
- California Bearing Ratio (CBR)
- Índice de forma (lajeo y alargamiento)
- Permeabilidad
- Evaluación ambiental ($PM_{2.5}$ y ACV)

Cada uno de estos ensayos permite caracterizar el comportamiento físico, mecánico y ambiental de los materiales analizados, comparando el material reciclado con materiales provenientes de bancos naturales.

9.2 Proceso de obtención y preparación del material

El material reciclado utilizado en esta investigación fue obtenido a partir de residuos de construcción y demolición procesados en planta. El proceso incluyó las etapas de trituración, cribado y clasificación granulométrica, con el fin de obtener un material homogéneo apto para su evaluación en laboratorio.

Posteriormente, se realizó el muestreo del material mediante técnicas representativas, asegurando que las muestras utilizadas en los ensayos reflejaran las características reales del material procesado.

En la Figura X se muestra el proceso general de obtención y preparación del material reciclado.



Fig. 6 Proceso de obtención del material reciclado

Análisis granulométrico

9.3 Procedimiento del análisis granulométrico

El análisis granulométrico se realizó con el objetivo de determinar la distribución de tamaños de partícula de los materiales evaluados, conforme a los procedimientos establecidos en la normativa aplicable.

El procedimiento consistió en la reducción de la muestra mediante cuarteo, seguido del tamizado en seco utilizando una serie de mallas normalizadas. Este ensayo permite identificar la proporción de partículas gruesas y finas, así como evaluar la gradación del material.

Una adecuada distribución granulométrica es fundamental para garantizar el buen comportamiento mecánico del material en capas de pavimento, ya que influye directamente en la compactación, estabilidad y capacidad de soporte.

En la Figura X se muestra el procedimiento general del ensayo granulométrico.



Fig. 7. Proceso del análisis granulométrico

9.4 Resultados del análisis granulométrico

El análisis granulométrico permitió determinar la distribución de tamaños de partícula de los materiales evaluados, así como su comportamiento respecto a los límites establecidos para materiales de base hidráulica.

En las Figuras X, Y y Z se presentan las curvas granulométricas correspondientes a los materiales provenientes de los bancos REURBA, AGC (La Cañada) y La Luz, tanto en condición natural como después del proceso de compactación. Asimismo, se incluye la zona granulométrica recomendada por la normativa para bases hidráulicas, lo que permite evaluar el cumplimiento de cada material.

Curvas granulométricas antes de la compactación

Banco REURBA

Tabla 3. Requisitos de granulometría para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico

Malla	abertura	menos de 10 millones de Ejes		Material REURBA
		L inferior	L superior	
3"	76.2	100	100	100
2"	50.8	100	100	100
1 1/2"	36.1	100	100	93.95
1"	25.4	70	100	87.95
3/4"	19.1	60	100	83.35
3/8"	9.52	40	100	52.96
N°4	4.75	30	80	26.17
N°10	2	21	60	11.01
N°20	0.84	13	44	6.08
N°40	0.42	8	31	3.9
N°60	0.25	5	23	1.82
N°100	0.149	3	17	1.06
N°200	0.074	0	10	0

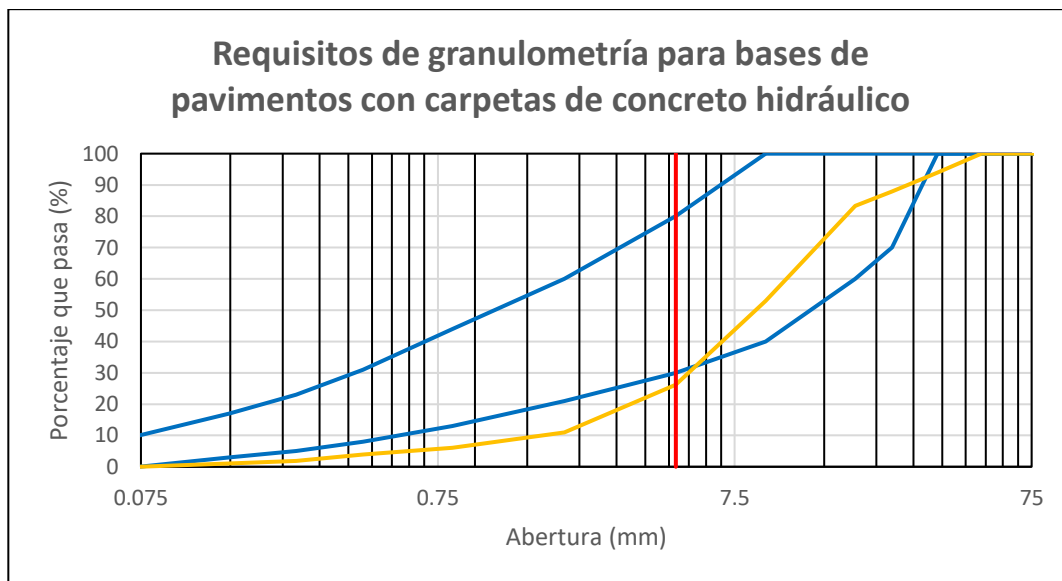


Figura 8. Requisitos de granulometría para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico. Elaboración propia.

Al contener menos del 20% de finos considero correcta la curva debido a que esto beneficia a que tenga menor plasticidad por su poca cantidad de finos

Además, tiene una buena distribución de tamaño por tener de todos los tamaños

Tabla 4. Requisitos de granulometría para bases de pavimentos con carpetas de mezcla asfáltica

Malla	menos de 10 millones de Ejes			más de 10 millones de Ejes		Material REURBA
	abertura	L inferior	L superior	L inferior	L superior	
3"	76.2	100	100	100	100	100.00
2"	50.8	85	100	85	100	100.00
1 1/2"	36.1	75	100	75	100	89.71
1"	25.4	62	100	62	90	82.96
3/4"	19.1	54	100	54	83	76.89
3/8"	9.52	40	100	40	65	49.83
N°4	4.75	30	80	30	50	27.97
N°10	2	21	60	21	36	16.69
N°20	0.84	13	44	13	25	11.05
N°40	0.42	8	31	8	17	8.23
N°60	0.25	5	23	5	12	4.94
N°100	0.149	3	17	3	9	4.01
N°200	0.074	0	10	0	5	2.47

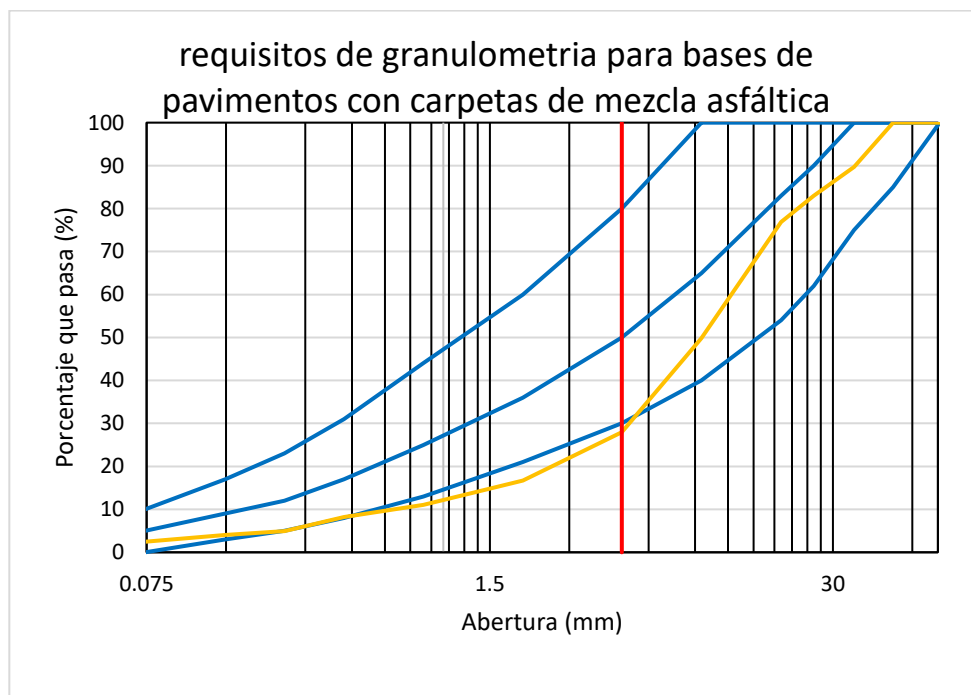
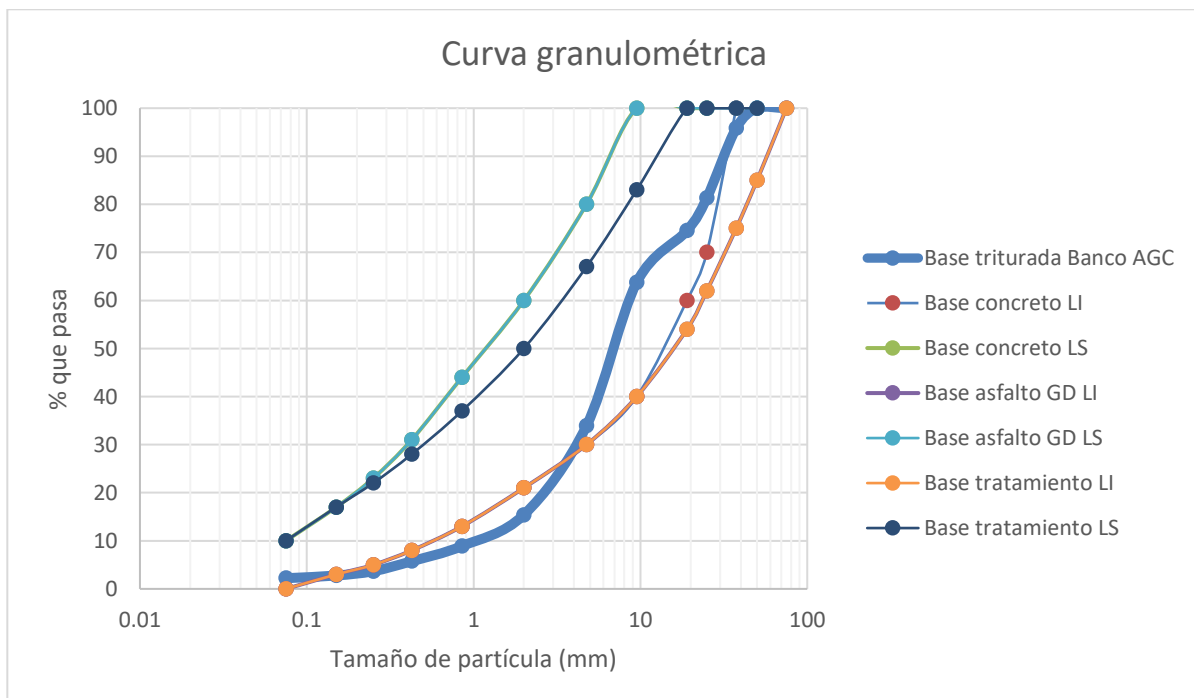


Figura 9. Requisitos de granulometría para bases de pavimentos con carpetas de mezcla asfáltica. Elaboración propia.

Cumple con una buena distribución de tamaños y cumple para la zona de más de 10 millones de ejes equivalentes

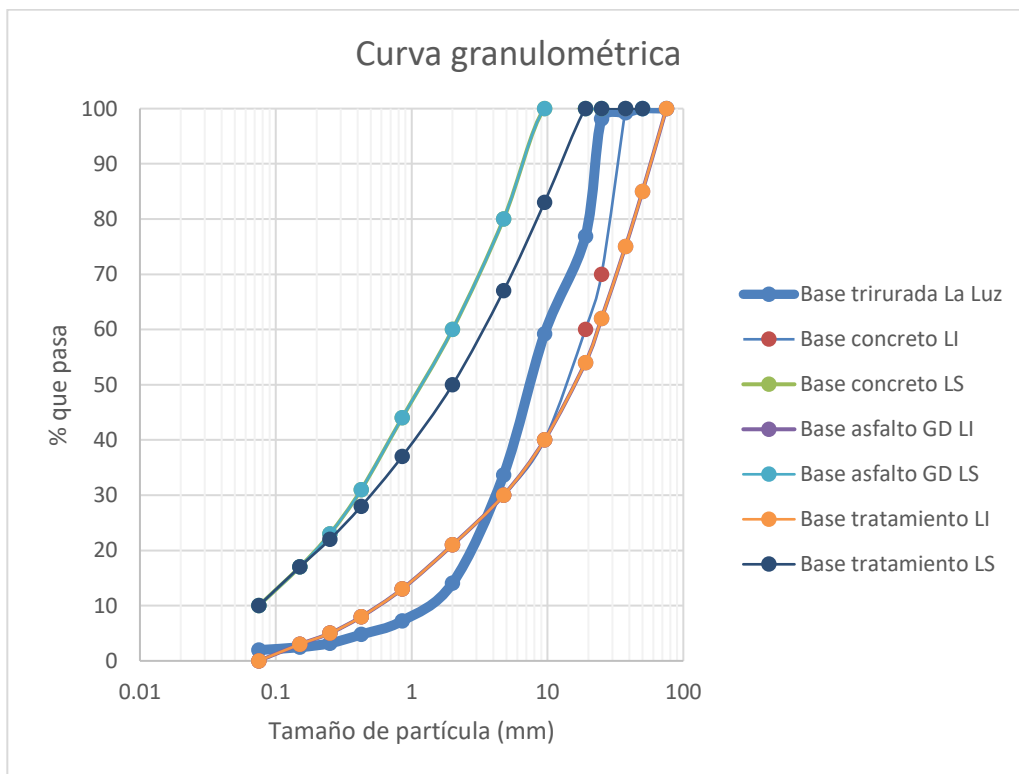
Banco AGC

Malla		Peso retenido (gr)	%retenido	% que pasa	Norma base para carpeta de concreto hidráulico
75	mm	0	0	100	100
50	mm	0	0	100	100
37.5	mm	318.4	4.157	95.843	100
25	mm	1112.2	14.520	81.324	70
19	mm	520.8	6.799	74.525	60
9.5	mm	825.9	10.782	63.743	40
4.75	mm	2284.8	29.828	33.915	30
2	mm	1418	18.512	15.403	21
0.85	mm	498.4	6.507	8.897	13
0.425	mm	240.9	3.145	5.752	8
0.25	mm	159	2.076	3.676	5
0.15	mm	68.9	0.899	2.777	3
0.075	mm	42.3	0.552	2.225	0
Pasa 200		94.5	1.234	0.991	
	Suma	7584.1	99.009		



Banco La Luz

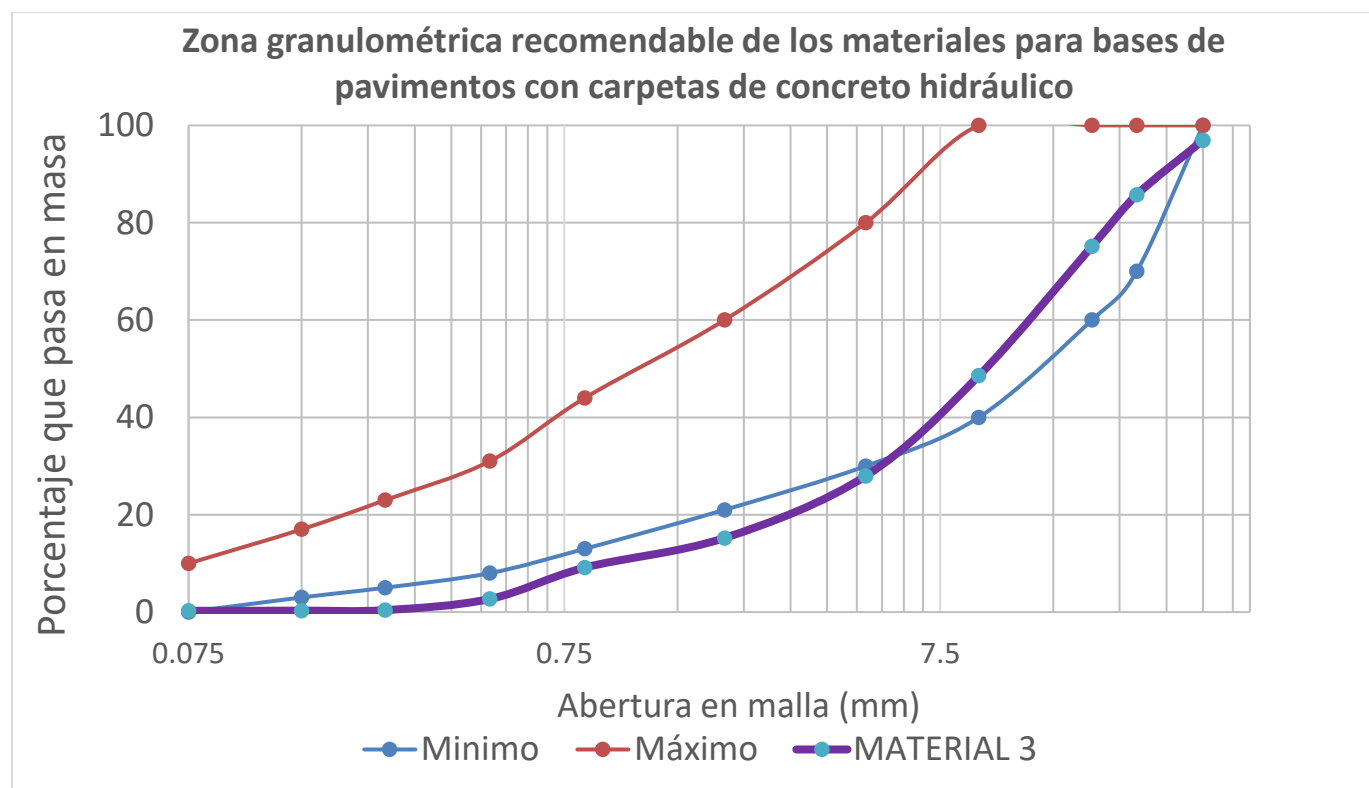
Malla		Peso retenido (gr)	%retenido	% que pasa	Norma base para carpeta de concreto hidráulico
75	mm	0	0	100	100
50	mm	0	0	100	100
37.5	mm	68.2	0.76457399	99.235426	100
25	mm	98.7	1.107	98.129	70
19	mm	1898.2	21.280	76.849	60
9.5	mm	1575.1	17.658	59.191	40
4.75	mm	2276.5	25.521	33.669	30
2	mm	1747.7	19.593	14.076	21
0.85	mm	610.9	6.849	7.228	13
0.425	mm	218.5	2.450	4.778	8
0.25	mm	141.2	1.583	3.195	5
0.15	mm	64.5	0.723	2.472	3
0.075	mm	45.7	0.512	1.960	0
Pasa 200		63	0.706	1.253	
	Suma	8808.2	98.747		



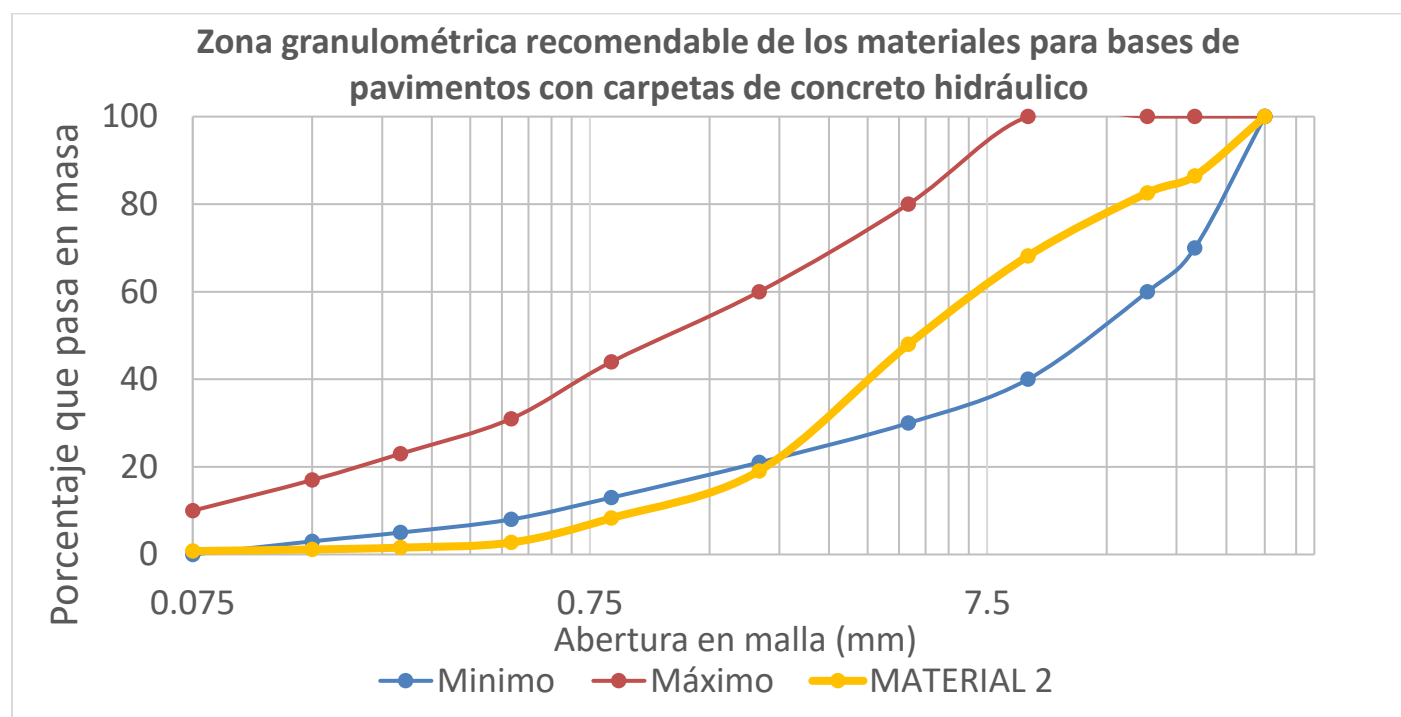
Curvas granulometricas despues de la compactación

Banco Reurba

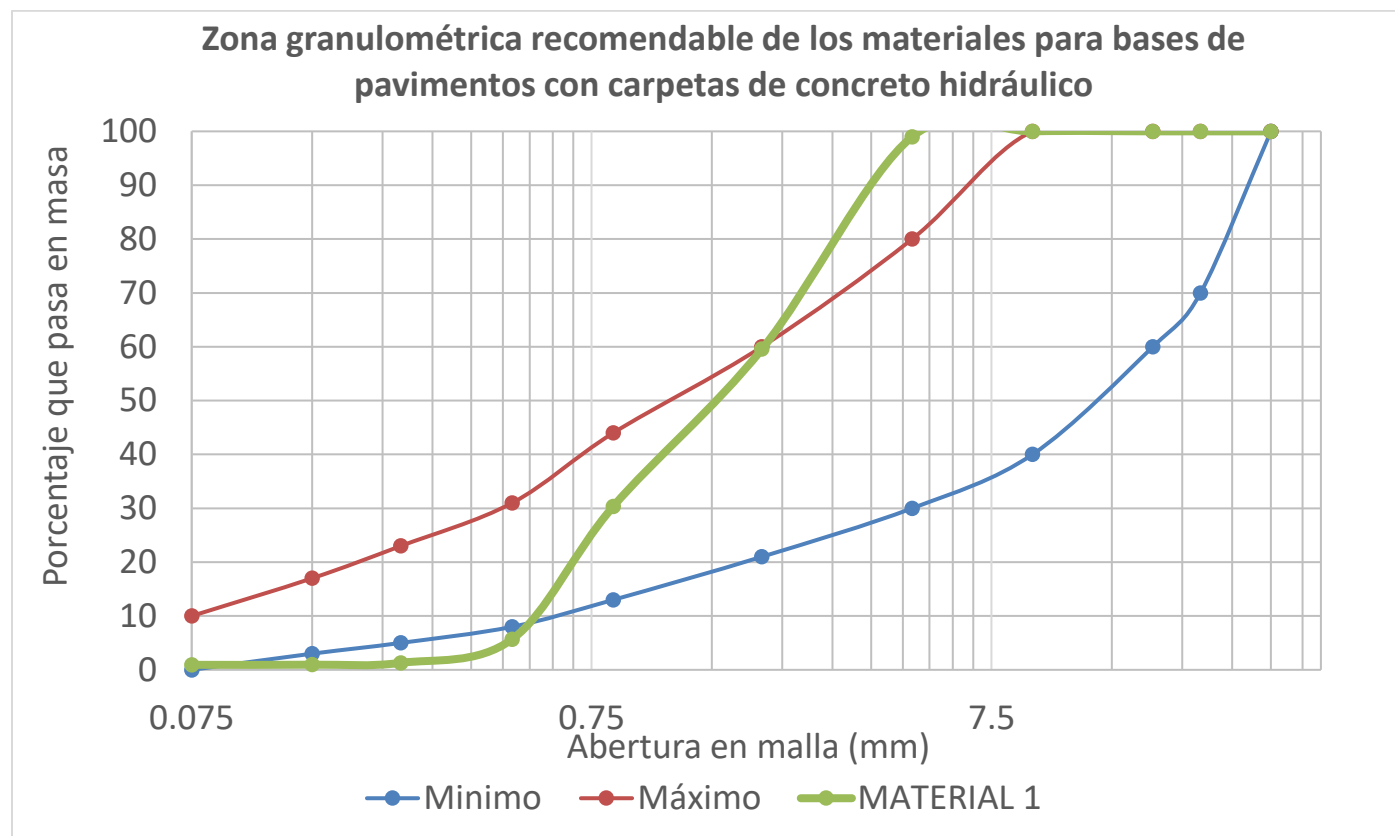
REURBA			
Malla		Porcentaje	
Abertura mm	Designación	Retenido	Pasa
75	3 in	0	100
50	2 in	0	100
37.5	1 1/2 in	3.07	96.93
25	1 in	11.1975	85.7325
19	3/4 in	10.565	75.1675
9.5	3/8 in	26.61375	48.55375
4.75	N° 4	20.59625	27.9575
2	N° 10	12.7425	15.215
0.85	N° 20	6.08375	9.13125
0.425	N° 40	6.44375	2.6875
0.25	N° 60	2.29375	0.39375
0.15	N° 100	0.10625	0.2875
0.075	N° 200	0.03375	0.25375



AGC			
Malla		Porcentaje	
Abertura mm	Designación	Retenido	Pasa
37.5	1 1/2 in	0	100
25	1 in	13.57375	86.42625
19	3/4 in	3.83875	82.5875
9.5	3/8 in	14.43625	68.15125
4.75	N° 4	20.1914461	47.9598039
2	N° 10	28.8741774	19.0856265
0.85	N° 20	10.7851537	8.30047276
0.475	N° 40	5.57005409	2.73041867
0.25	N° 60	1.16042793	1.56999074
0.15	N° 100	0.42321489	1.14677584
0.075	N° 200	0.36860652	0.77816932



TRITURADA LA LUZ			
Malla		Porcentaje	
Abertura mm	Designación	Retenido	Pasa
37.5	1 1/2 in	0	100
25	1 in	0	100
19	3/4 in	1	100
9.5	3/8 in	39.45375	100
4.75	N° 4	29.19125	99
2	N° 10	24.65125	59.54625
0.85	N° 20	4.40375	30.355
0.475	N° 40	0.345	5.70375
0.25	N° 60	0.0225	1.3
0.15	N° 100	0.005	0.955
0.075	N° 200	0	0.9325



Interpretación de resultados

De manera general, se observa que el material reciclado proveniente de REURBA presenta una distribución granulométrica bien graduada, con una adecuada proporción de partículas gruesas, medias y finas. Esta característica favorece el empaquetamiento del material y contribuye a una mejor respuesta durante el proceso de compactación.

Por su parte, el material del banco AGC (La Cañada) muestra una ligera deficiencia en fracciones intermedias, lo que puede generar una estructura granular menos estable y mayor dependencia de la energía de compactación.

El material del banco La Luz presenta una tendencia hacia una granulometría más gruesa, con menor contenido de finos, lo que favorece el drenaje, pero puede disminuir la cohesión entre partículas.

Al comparar las curvas granulométricas con la zona especificada por la normativa, se observa que los materiales evaluados se encuentran, en general, dentro de los límites permisibles, lo que indica su viabilidad para su uso en capas de base hidráulica.

Efecto de la compactación

Se observa que, después del proceso de compactación, los materiales presentan ligeros cambios en su distribución granulométrica, particularmente en el incremento del contenido de finos, lo cual puede atribuirse a la fragmentación de partículas durante el proceso de compactación.

Este comportamiento es más evidente en el material reciclado, debido a la naturaleza del concreto triturado, el cual presenta mayor susceptibilidad a la generación de finos.

La comparación entre las curvas granulométricas antes y después de la compactación permite identificar el comportamiento del material ante esfuerzos mecánicos. En el caso del material reciclado, se observa una mayor variación en la fracción fina, lo que indica un proceso de degradación de partículas, fenómeno común en agregados reciclados.

9.5 Determinación de los límites de Atterberg

Con el objetivo de evaluar la plasticidad de los materiales provenientes de los distintos bancos (REURBA, AGC y La Luz), se determinó el límite líquido mediante el método de la copa de Casagrande.

Las pruebas se realizaron tanto en condición inicial como después del proceso de compactación, con el fin de analizar la variación en el comportamiento del material.

En la Figura X se muestra el procedimiento general seguido durante el ensayo.



Fig. 10. Elaboración de prueba de límites de atterberg

Los valores de límite líquido obtenidos para los materiales analizados se presentan en las Tablas siguientes, así como en las gráficas correspondientes.

En términos generales, los resultados muestran que:

- Todos los materiales presentan valores de límite líquido inferiores al 25 %
- El material de REURBA presenta los valores más bajos
- AGC y La Luz presentan valores ligeramente mayores, pero dentro del rango aceptable

En cuanto al efecto de la compactación:

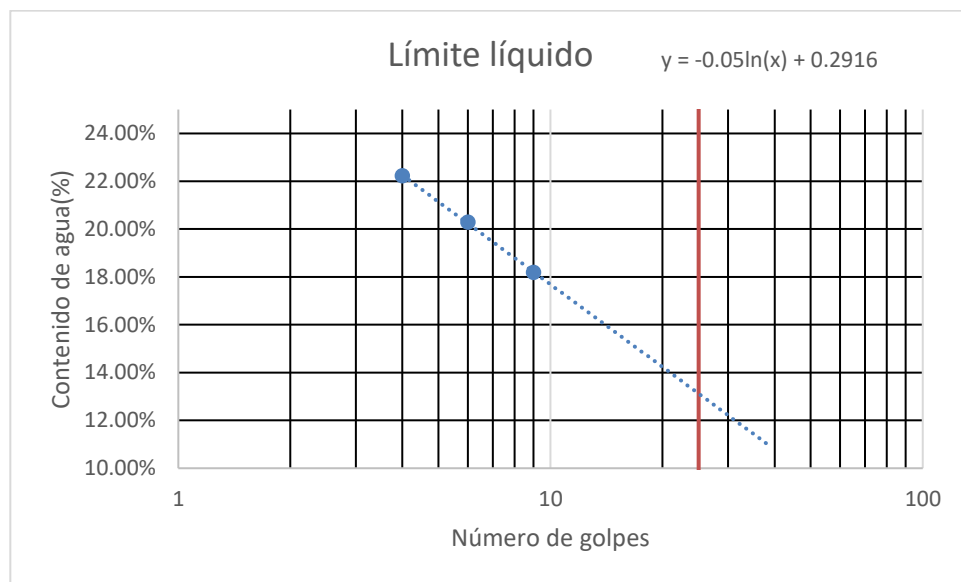
- Se observa una ligera variación en los valores de límite líquido
- Esta variación se asocia a la modificación de la estructura del material y generación de finos

- Sin embargo, no representa un cambio significativo en su comportamiento plástico

REURBA Antes

Límite Líquido (LL)

Flanera No.	Wf (gr)	Wf+Wm (gr)	Wf+Ws (gr)	Wm (gr)	Ws (gr)	w (%)	Golpes No.
12	20	29.1	27.7	1.4	7.7	18.18%	9
42	19.8	28.1	26.7	1.4	6.9	20.29%	6
66	19.7	28.5	26.9	1.6	7.2	22.22%	4



LL=	13%
-----	-----

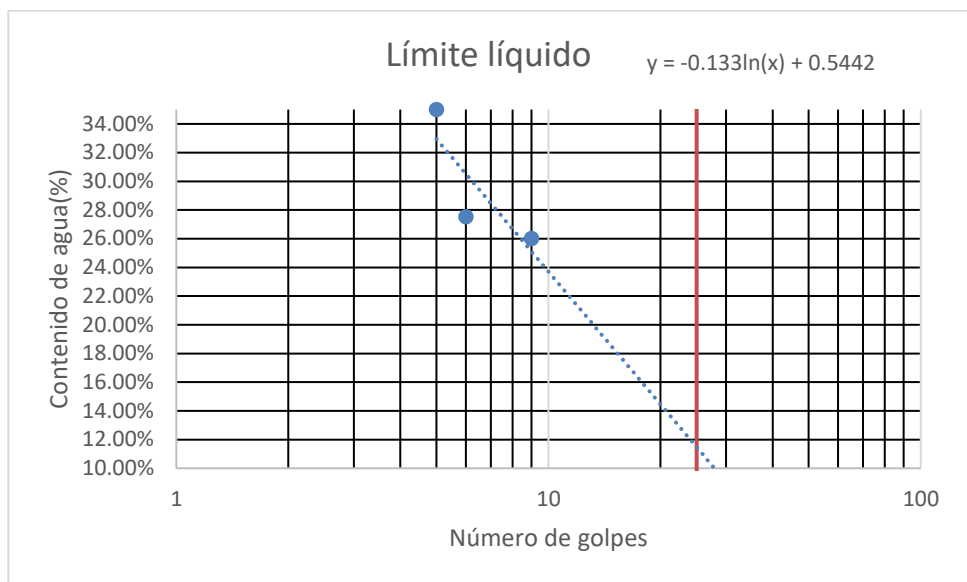
Al ser un material arenoso tiene poca plasticidad

La norma indica que debe ser menor a 25% el LL

REURBA Después

Límite Líquido (LL)

Flanera No.	Wf (gr)	Wf+Wm (gr)	Wf+Ws (gr)	Wm (gr)	Ws (gr)	w (%)	Golpes No.
1	19.9	29.1	27.2	1.9	7.3	26.03%	9
2	19.7	28.5	26.6	1.9	6.9	27.54%	6
3	20	28.1	26	2.1	6	35.00%	5

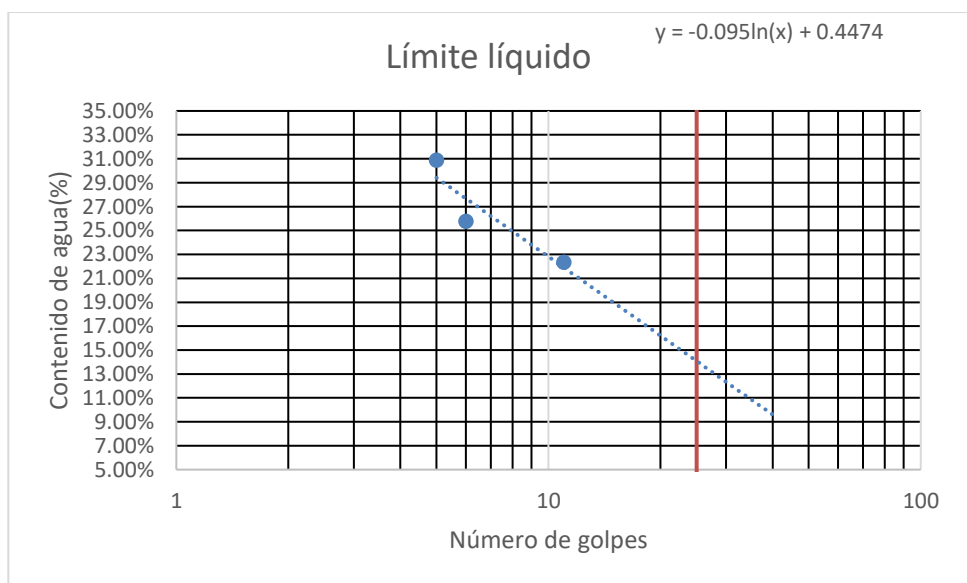


LL=	12%
-----	-----

AGC Antes

Límite Líquido (LL)

Flanera No.	Wf (gr)	Wf+Wm (gr)	Wf+Ws (gr)	Wm (gr)	Ws (gr)	w (%)	Golpes No.
1	21.1	30.3	28.62	1.68	7.52	22.34%	11
2	21	29.3	27.6	1.7	6.6	25.76%	6
3	20.8	29.7	27.6	2.1	6.8	30.88%	5

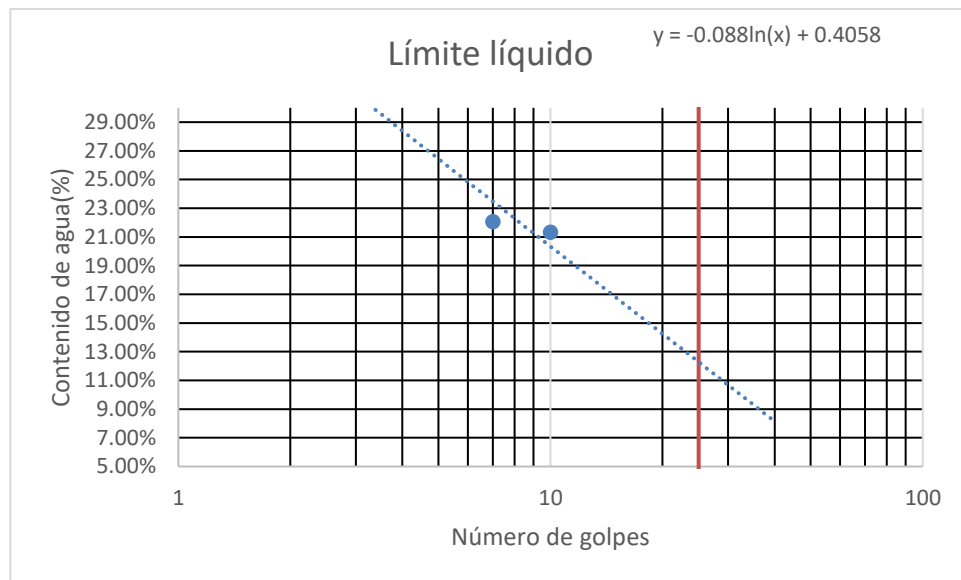


LL=	14%
-----	-----

AGC Después

Límite Líquido (LL)

Flanera No.	Wf (gr)	Wf+Wm (gr)	Wf+Ws (gr)	Wm (gr)	Ws (gr)	w (%)	Golpes No.
1	21.2	30.3	28.7	1.6	7.5	21.33%	10
2	21	29.3	27.8	1.5	6.8	22.06%	7
3	20.9	29.7	27.6	2.1	6.7	31.34%	3

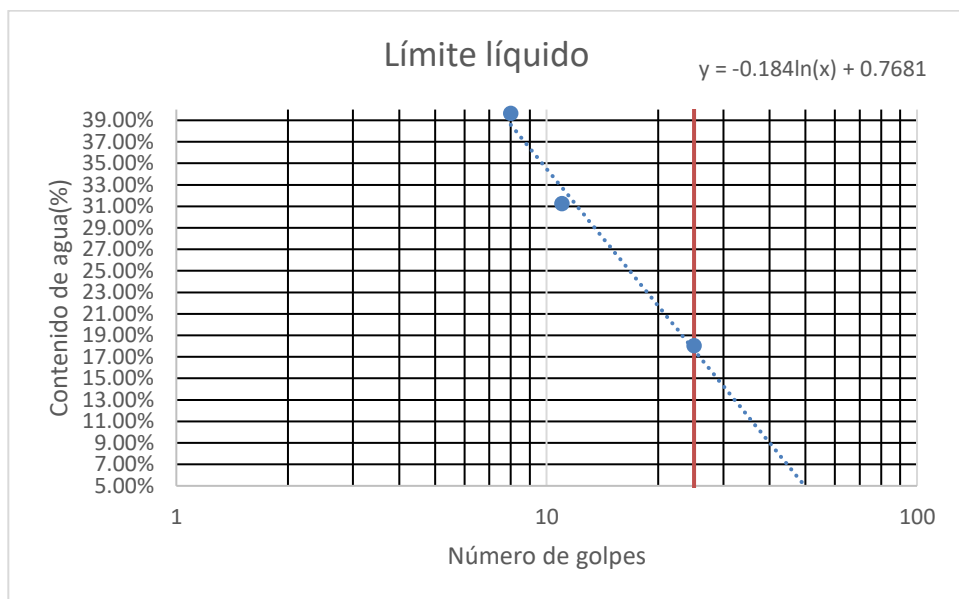


LL=	12%
-----	-----

La Luz Antes

Límite Líquido (LL)

Flanera No.	Wf (gr)	Wf+Wm (gr)	Wf+Ws (gr)	Wm (gr)	Ws (gr)	w (%)	Golpes No.
1	18.3	26.8	25.5	8.5	7.2	18.06%	25
2	19.8	24	23	4.2	3.2	31.25%	11
3	19.7	27.8	25.5	8.1	5.8	39.66%	8

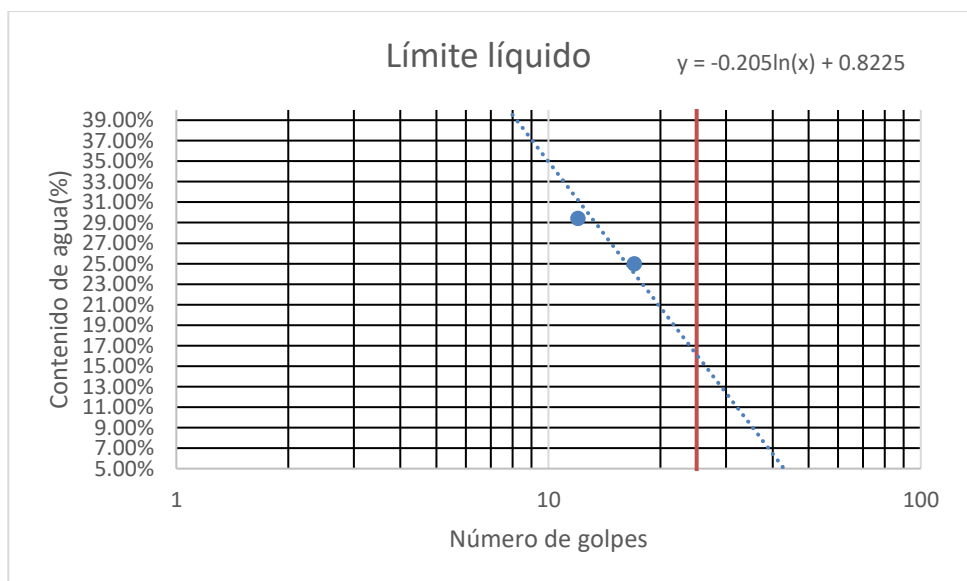


LL=	18%
-----	-----

La Luz Después

Límite Líquido (LL)

Flanera No.	Wf (gr)	Wf+Wm (gr)	Wf+Ws (gr)	Wm (gr)	Ws (gr)	w (%)	Golpes No.
1	19.7	29.2	27.3	1.9	7.6	25.00%	17
2	19.9	28.7	26.7	2	6.8	29.41%	12
3	20.1	28.1	25.8	2.3	5.7	40.35%	8



LL=	16%
-----	-----

Desde el punto de vista geotécnico, los valores obtenidos indican que los materiales presentan baja plasticidad, característica deseable en capas de base hidráulica, ya que reduce la susceptibilidad a deformaciones volumétricas por cambios de humedad.

El material reciclado (REURBA) muestra un comportamiento más estable, lo cual puede atribuirse a su mejor gradación y menor contenido de finos activos.

De acuerdo con la normativa aplicable, el límite líquido debe ser menor a 25 %, condición que es satisfecha por todos los materiales evaluados, tanto antes como después de la compactación.

En conjunto, los resultados confirman que los materiales analizados son aptos desde el punto de vista de plasticidad para su uso en capas de base hidráulica.

9.6 Ensayo Proctor modificado del material reciclado (REURBA)

Con el objetivo de determinar las condiciones óptimas de compactación del material reciclado, se realizó el ensayo Proctor modificado conforme a la norma ASTM D1557.

Este ensayo permite establecer la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca del material, identificando la densidad seca máxima (γ_d máx.) y la humedad óptima (w óptima), parámetros fundamentales para el control de calidad en obra.

La prueba se aplicó únicamente al material proveniente de la planta REURBA, debido a que este representa el material de interés principal en la investigación.

La selección del material reciclado como único caso de estudio para el ensayo de compactación se fundamenta en el enfoque del proyecto, el cual busca evaluar la viabilidad del uso de residuos de construcción como alternativa a los materiales convencionales.

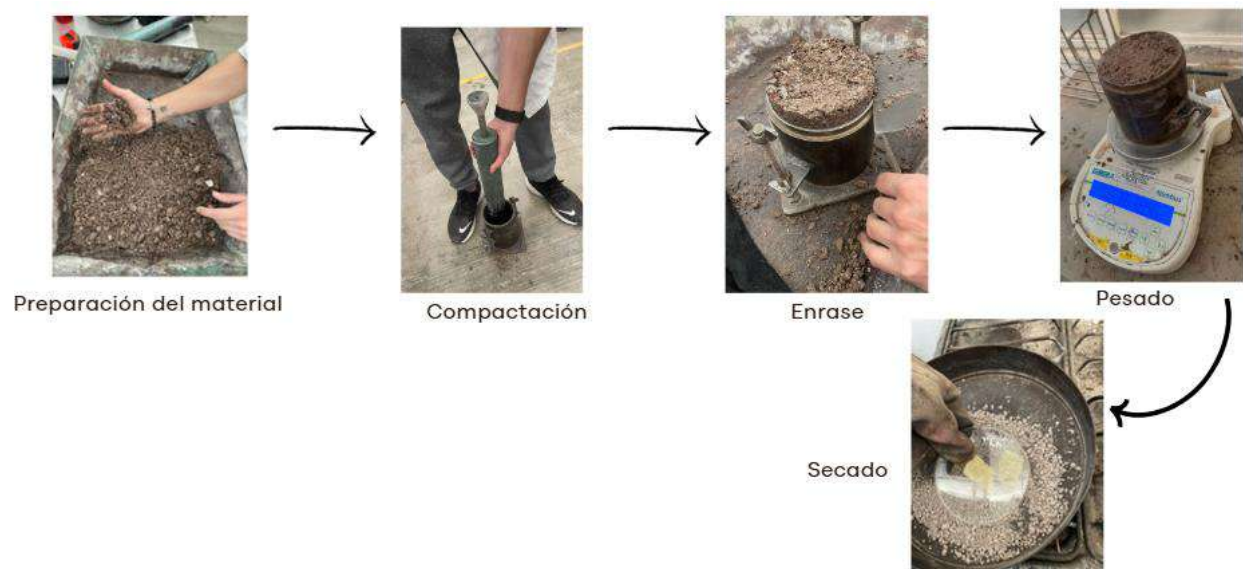


Fig. 11. Elaboración de ensayo Proctor

Resultados del ensayo Proctor

La curva de compactación obtenida para el material REURBA se presenta en la Figura X, donde se observa la variación de la densidad seca en función del contenido de humedad.

El material presentó una densidad seca máxima aproximada de:

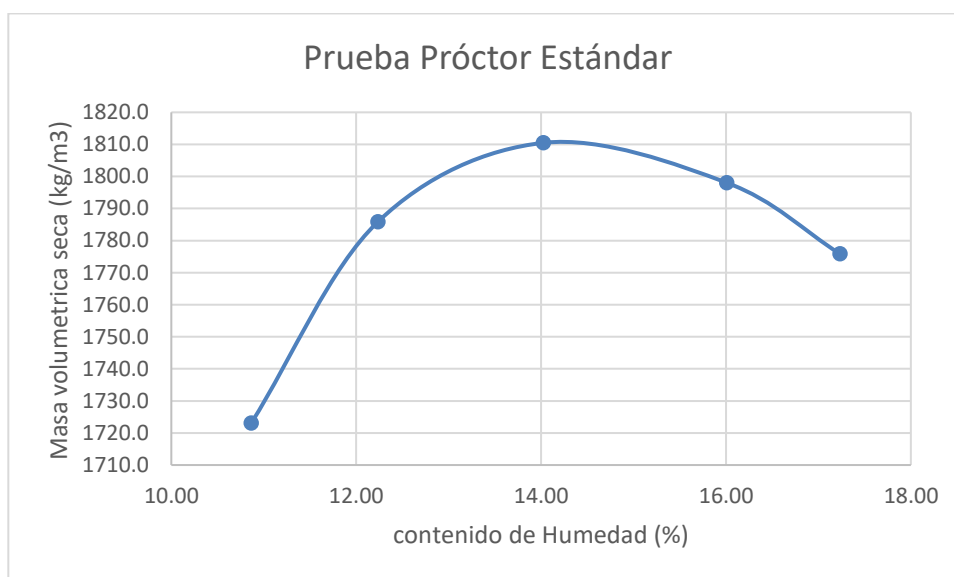
$\gamma_d \text{ máx.} \approx 1800 \text{ kg/m}^3$

con una humedad óptima cercana al:

$w \text{ óptima} \approx 14 \%$

DESCRIPCION		UNIDAD	1	2	3	4	5
Masa de suelo húmedo	Wh	gr	100	100	100	100	100
Masa de suelo seco	Ws	gr	90.2	89.1	87.7	86.2	85.3
Porcentaje de humedad	H	%	10.86	12.23	14.03	16.01	17.23
			24	26	28	30	32
Masa de molde + suelo húmedo	Wi	gr	3723.4	3808.3	3862.6	3882	3878.4

Masa de molde	Wt	gr	1998	1998	1998	1998	1998
Masa del suelo húmedo	Wm	gr	1725.4	1810.3	1864.6	1884	1880.4
Volumen del molde	V1	cm3	903.21	903.21	903.21	903.21	903.21
Masa volumétrica húmeda	ym	kg/m3	1910.3	2004.3	2064.4	2085.9	2081.9
Masa volumétrica seca	yd	kg/m3	1723.1	1785.8	1810.5	1798.0	1775.9



Humedad óptima= 14%

Masa volumétrica seca (kg/m³) = 1800

El siguiente paso sería determinar la resistencia (CBR) para cada densidad obtenida con la prueba Proctor

El comportamiento observado corresponde al de un material granular, donde la densidad seca aumenta progresivamente con el contenido de humedad hasta alcanzar un valor máximo, a partir del cual disminuye debido a la saturación de los vacíos.

La forma de la curva indica una adecuada respuesta a la compactación, lo que sugiere que el material reciclado puede alcanzar condiciones de densidad satisfactorias en campo.

Al comparar estos resultados con los obtenidos en el ensayo CBR, se observa que la humedad óptima de compactación no coincide con la humedad que maximiza la capacidad portante del material, lo que evidencia la necesidad de considerar ambos parámetros en el diseño y control de calidad de las capas de pavimento.

En términos generales, el material reciclado evaluado presenta condiciones adecuadas de compactación, lo que respalda su viabilidad para su uso en capas de base hidráulica.

9.7 Ensayo de lajeo y alargamiento

Con el objetivo de evaluar la geometría de las partículas de los materiales analizados, se realizó el ensayo de índice de forma (lajeo y alargamiento), conforme a los criterios establecidos en la normatividad vigente.

Este ensayo permite determinar la proporción de partículas con formas desfavorables (planas o alargadas), las cuales pueden afectar negativamente la compactación, la estabilidad mecánica y la transmisión de esfuerzos dentro de la estructura del pavimento.

Las pruebas se realizaron para los materiales provenientes de los bancos REURBA, AGC (La Cañada) y La Luz, tanto en condición inicial como después del proceso de compactación.



Fig 12. Equipo para prueba de alargamiento y lajeo

Resultados del ensayo de lajeo y alargamiento

Los valores obtenidos para los tres materiales evaluados se presentan en las Tablas siguientes.

En términos generales:

- El material de **REURBA** presentó valores de **10.93 % de alargamiento** y **38.79 % de lajeo**, con un valor combinado de **49.72 %**.
- Los materiales de **AGC (La Cañada)** y **La Luz** presentan valores dentro de rangos similares, con variaciones asociadas a su origen geológico y proceso de trituración.

En cuanto al efecto de la compactación:

- Se observan ligeras variaciones en los valores de lajeo y alargamiento
- Estas variaciones pueden atribuirse a la fractura de partículas durante el proceso de compactación
- No se identifican cambios significativos en la forma global del material

Desde el punto de vista técnico, los resultados indican que el material reciclado (REURBA) presenta una geometría de partículas adecuada para su uso en capas de base hidráulica.

Si bien el valor combinado (49.72 %) se encuentra cercano al límite normativo de referencia, es importante destacar que los parámetros de lajeo y alargamientos evaluados de manera independiente cumplen con los criterios de aceptación (<40 %), lo que indica que no existe un predominio crítico de partículas con formas desfavorables.

Este comportamiento sugiere que el material no presenta riesgos significativos asociados a una deficiente transmisión de esfuerzos, pérdida de interbloqueo o generación de planos de debilidad dentro de la estructura del pavimento.

REURBA Antes

Malla	W alargamiento retuvo	W pasa lajeo	% alargamiento	%lajeo
50	423.2	161.6	7.35	2.81
25	230.3	71.3	4.00	1.24
19	183.6	22.7	3.19	0.39
12.5	486.2	72.1	8.45	1.25
9.5	829.3	204.8	14.41	3.56
4.75	172	209.4	1.38	1.68
			38.79	10.93
			40% máx.	40% máx.
	% lajeo y alargamiento=		49.72	

REURBA Después

Malla	W alargamiento retuvo	W pasa lajeo	% alargamiento	%lajeo
50	335.2	100.4	5.83	1.74
25	182.3	44.2	3.17	0.77
19	145.5	14.2	2.53	0.25
12.5	384.1	44.6	6.68	0.78
9.5	657.9	127.2	11.43	2.21
4.75	136.2	129.7	1.09	1.04
			30.72	6.78
			40% máx.	40% máx.
	% lajeo y alargamiento=		37.51	

AGC Antes

Malla	W alargamiento retuvo	W pasa lajeo	% alargamiento	%lajeo
50	86.3	46	1.51	0.80
25	69.1	23	1.21	0.40
19	60.4	11.5	1.05	0.20
12.5	120.8	34.5	2.11	0.60
9.5	431.6	69	7.53	1.20

4.75	94.9	46.2	0.76	0.37
			14.17	3.58
			40% máx.	40% máx.
	% lajeo y alargamiento=		17.75	

AGC Después

Malla	W alargamiento retuvo	W pasa lajeo	% alargamiento	%lajeo
50	90.1	40.3	1.57	0.70
25	65.4	25	1.14	0.44
19	54.5	15.2	0.95	0.27
12.5	130	30.5	2.27	0.53
9.5	380.2	65	6.64	1.13
4.75	143.1	55.2	1.15	0.44
			13.72	3.52
			40% máx.	40% máx.
	% lajeo y alargamiento=		17.24	

La Luz Antes

Malla	W alargamiento retuvo	W pasa lajeo	% alargamiento	%lajeo
50	100.1	69	1.75	1.20
25	120.6	41.4	2.10	0.72
19	90	20.7	1.57	0.36
12.5	199.4	51.8	3.48	0.90
9.5	699.9	120.8	12.21	2.11
4.75	55.9	41.4	0.45	0.33
			21.57	5.63
			40% máx.	40% máx.
	% lajeo y alargamiento=		27.20	

La Luz Después

Malla	W alargamiento retuvo	W pasa lajeo	% alargamiento	%lajeo
50	95.8	60.5	1.67	1.06
25	109	50.3	1.90	0.88
19	85.2	25.5	1.49	0.45
12.5	179.9	60.6	3.14	1.06
9.5	640.1	100.3	11.17	1.75
4.75	40.8	50.2	0.33	0.40
			19.70	5.59
			40% máx.	40% máx.
	% lajeo y alargamiento=		25.29	

Al comparar los tres materiales, se observa que:

- El material reciclado presenta un comportamiento comparable al de los materiales naturales
- Las diferencias observadas están relacionadas principalmente con el tipo de roca y el proceso de trituración
- Ninguno de los materiales presenta valores que comprometan su desempeño estructural

De acuerdo con los criterios establecidos para materiales de base hidráulica, los valores obtenidos se consideran aceptables, por lo que los materiales analizados cumplen con los requisitos de forma de partícula.

En conjunto, los resultados confirman que tanto el material reciclado como los materiales naturales presentan una geometría adecuada, lo que favorece su uso en capas estructurales de pavimentos sin afectar su desempeño mecánico.

9.8 Ensayo de equivalente de arena

Con el objetivo de evaluar la calidad del material en términos de contenido de finos y presencia de partículas arcillosas, se realizó el ensayo de equivalente de arena conforme a la normativa aplicable.

Este ensayo permite determinar la proporción relativa de partículas finas limpias (arena) respecto a materiales finos indeseables (arcillas y limos), siendo un parámetro clave para evaluar la idoneidad de los materiales en capas estructurales de pavimentos.

Las pruebas se realizaron para los materiales provenientes de los bancos REURBA, AGC (La Cañada) y La Luz, tanto en condición inicial como después del proceso de compactación.

Resultados del ensayo de equivalente de arena

Los valores obtenidos para los materiales evaluados se presentan en las Tablas X–X.

En el caso del material reciclado (REURBA), se obtuvo:

- **64 % antes de la compactación**
- **46 % después de la compactación**

Para los materiales naturales (AGC y La Luz), los valores obtenidos se mantienen dentro de rangos similares, con ligeras variaciones atribuibles a su origen y composición granulométrica.

En general:

- Todos los materiales presentan valores superiores al **40 % mínimo requerido por la norma N-CMT-4-02-002/22**
- Se observa una disminución en los valores después de la compactación
- Esta variación no es significativa en términos de desempeño

REURBA Antes y Después

Los resultados obtenidos para el material REURBA indican que el contenido de finos es adecuado, ya que los valores de equivalente de arena se mantienen por encima del límite normativo.

La disminución observada después del proceso de compactación puede atribuirse al reacomodo de partículas y a la posible liberación de finos durante la manipulación del material. Sin embargo, este cambio no compromete la calidad del material ni su comportamiento en campo.

Equivalente de arena	Norma ASTM 2419
Muestra:	REURBA, ANTES DE COMPACTACIÓN

Ensayo 1	
Lectura de arena	2.9
Lectura de finos	4.5
Equivalente de arena 1	64.44

Ensayo 2	
Lectura de arena	3.2
Lectura de finos	4.9
Equivalente de arena 1	65.31

Ensayo 3	
Lectura de arena	3
Lectura de finos	4.9
Equivalente de arena 1	61.22

P	
Promedio=	64

De acuerdo con N CMT 4 02 002 22	
Mínimo debe ser:	40

Muestra:	REURBA, DESPUÉS DE COMPACTACIÓN
----------	------------------------------------

Ensaye 1	
Lectura de arena	2.6
Lectura de finos	5.6
Equivalente de arena 1	46.43

Ensaye 2	
Lectura de arena	2.5
Lectura de finos	5.6
Equivalente de arena 1	44.64

Ensaye 3	
Lectura de arena	2.8
Lectura de finos	6.1
Equivalente de arena 1	45.90

P	
Promedio=	46

De acuerdo con N CMT 4 02 002 22	
Mínimo debe ser:	40

AGC Antes y Después

Equivalente de arena	Norma ASTM 2419
Muestra:	AGC, ANTES DE COMPACTACIÓN

Ensaye 1	
Lectura de arena	3.9
Lectura de finos	5.7
Equivalente de arena 1	68.42

Ensayo 2	
Lectura de arena	4.4
Lectura de finos	5.9
Equivalente de arena 1	74.58

Ensayo 3	
Lectura de arena	4.2
Lectura de finos	5.9
Equivalente de arena 1	71.19

P	
Promedio=	71

De acuerdo con N CMT 4 02 002 22	
Mínimo debe ser:	40

Muestra:	AGC, DESPUÉS DE COMPACTACIÓN
----------	------------------------------

Ensayo 1	
Lectura de arena	2.6
Lectura de finos	5.6
Equivalente de arena 1	46.43

Ensayo 2	
Lectura de arena	2.8
Lectura de finos	5.7
Equivalente de arena 1	49.12

Ensayo 3	
Lectura de arena	3
Lectura de finos	6.1
Equivalente de arena 1	49.18

P	
---	--

Promedio=	48
-----------	----

De acuerdo con N CMT 4 02 002 22	
Mínimo debe ser:	40

La Luz Antes y Después

Equivalente de arena	Norma ASTM 2419
Muestra:	La Luz, ANTES DE COMPACTACIÓN

Ensayo 1	
Lectura de arena	2.5
Lectura de finos	4.4
Equivalente de arena 1	56.82

Ensayo 2	
Lectura de arena	2.6
Lectura de finos	4.6
Equivalente de arena 1	56.52

Ensayo 3	
Lectura de arena	2.6
Lectura de finos	4.7
Equivalente de arena 1	55.32

P	
Promedio=	56

De acuerdo con N CMT 4 02 002 22	
Mínimo debe ser:	40

Muestra:	La Luz, DESPUÉS DE COMPACTACIÓN
----------	------------------------------------

Ensayo 1	
Lectura de arena	2.5
Lectura de finos	5.7
Equivalente de arena 1	43.86

Ensayo 2	
Lectura de arena	2.4
Lectura de finos	5.7
Equivalente de arena 1	42.11

Ensayo 3	
Lectura de arena	2.5
Lectura de finos	5.8
Equivalente de arena 1	43.1

P	
Promedio=	43

De acuerdo con N CMT 4 02 002 22	
Mínimo debe ser:	40

Desde el punto de vista geotécnico, valores elevados de equivalente de arena indican un material con baja presencia de arcillas activas, lo cual es deseable en capas de base hidráulica, ya que mejora la estabilidad volumétrica y reduce la susceptibilidad a cambios de humedad.

El material reciclado presenta un comportamiento comparable al de los materiales naturales, lo que confirma su viabilidad como alternativa en aplicaciones viales.

De acuerdo con la normativa N-CMT-4-02-002/22, el valor mínimo requerido para materiales de base hidráulica es del 40 %, condición que es satisfecha por todos los materiales evaluados, tanto antes como después de la compactación.

En conjunto, los resultados del ensayo de equivalente de arena confirman que los materiales analizados presentan un adecuado nivel de limpieza, lo que favorece su desempeño en capas estructurales de pavimentos.

9.9 Ensayo de permeabilidad

Se realizó el ensayo de permeabilidad con el objetivo de determinar la capacidad de drenaje de los materiales evaluados, tanto en condición antes como después de la compactación. Este parámetro es fundamental para analizar el comportamiento hidráulico en capas estructurales de pavimentos, ya que influye directamente en la evacuación del agua infiltrada y en la durabilidad del sistema.

Para cada banco de material se realizaron múltiples mediciones del coeficiente de permeabilidad (k), considerando distintas cargas hidráulicas (Δh) y tiempos de flujo. A partir de estos datos se calcularon valores individuales y posteriormente un valor promedio representativo para cada condición de ensayo.

Las pruebas se realizaron para los materiales provenientes de los bancos REURBA, AGC (La Cañada) y La Luz.

Banco “La Cañada” (antes de la compactación)

En la Tabla se presentan los resultados del ensayo de permeabilidad del material reciclado proveniente de “La Cañada” en condición suelta, antes de la compactación.

Ensaye	k promedio (cm/s)
K1	2.84×10^{-2}
K2	4.38×10^{-2}
K3	4.79×10^{-2}
Promedio general	4.00×10^{-2}

Obteniendo una gráfica general de los resultados

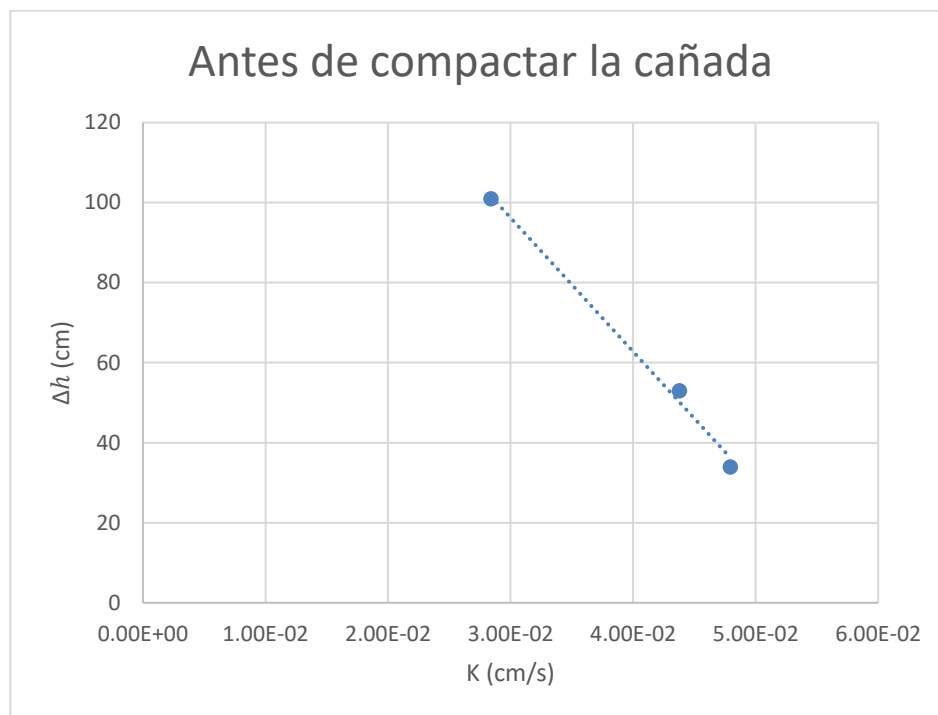


Figura 13. Comparación del coeficiente de permeabilidad del material “La Cañada” antes de la compactación.

Banco “La Cañada” (después de la compactación)

En la Tabla se presentan los resultados del ensayo de permeabilidad del material del banco La Cañada en condición compactada, con el objetivo de analizar la variación del flujo de agua tras el proceso de densificación.

Ensayo	k promedio (cm/s)
K1	1.63×10^{-2}
K2	2.12×10^{-2}
K3	2.75×10^{-2}
Promedio general	2.17×10^{-2}

Obteniendo una gráfica general de los resultados

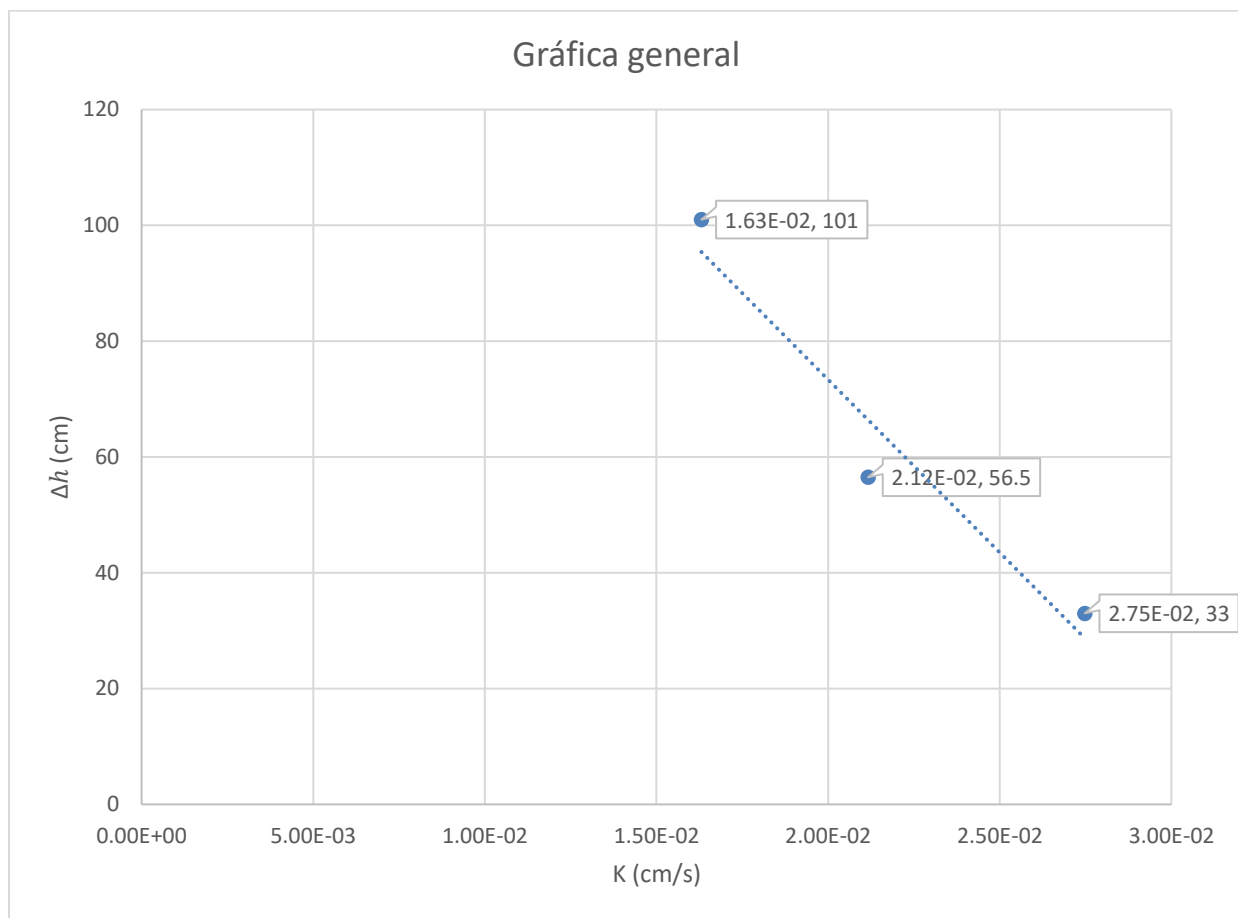


Figura 14. Resultados del coeficiente de permeabilidad del material “La Cañada” después de la compactación.

Banco “La Luz” (antes de la compactación)

En la Tabla se presentan los resultados del ensayo de permeabilidad del material del banco La Luz en condición antes de la compactación

Ensayo	k promedio (cm/s)
K1	3.30×10^{-2}
K2	4.25×10^{-2}
K3	4.88×10^{-2}
Promedio general	4.14×10^{-2}

Obteniendo una gráfica general de los resultados

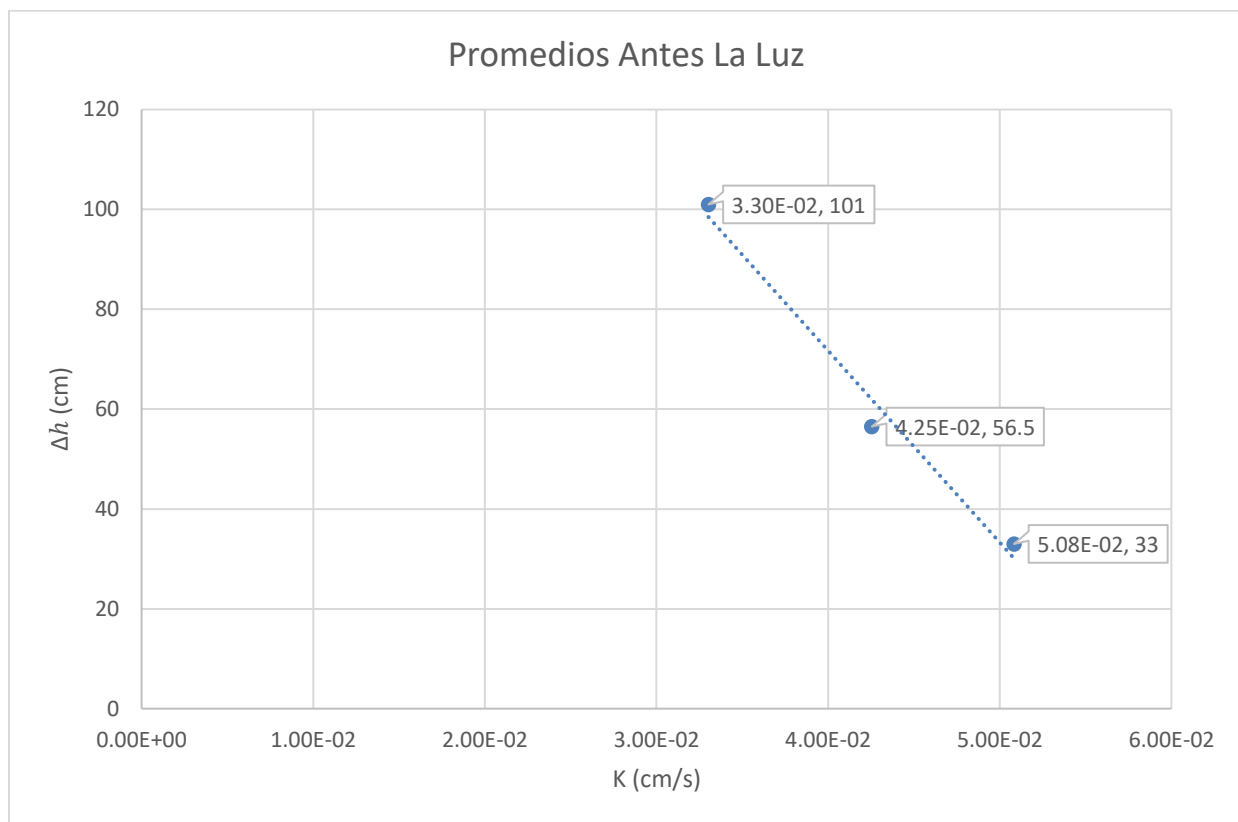


Figura 15. Resultados del coeficiente de permeabilidad del material “La Luz” antes de la compactación

Banco “La Luz” (después de la compactación)

En la Tabla se presentan los resultados del ensayo de permeabilidad del material del banco La Luz en condición compactada.

Ensayo	k promedio (cm/s)
K1	2.28×10^{-2}
K2	3.16×10^{-2}
K3	4.12×10^{-2}
Promedio general	3.19×10^{-2}

Obteniendo una gráfica general de los resultados

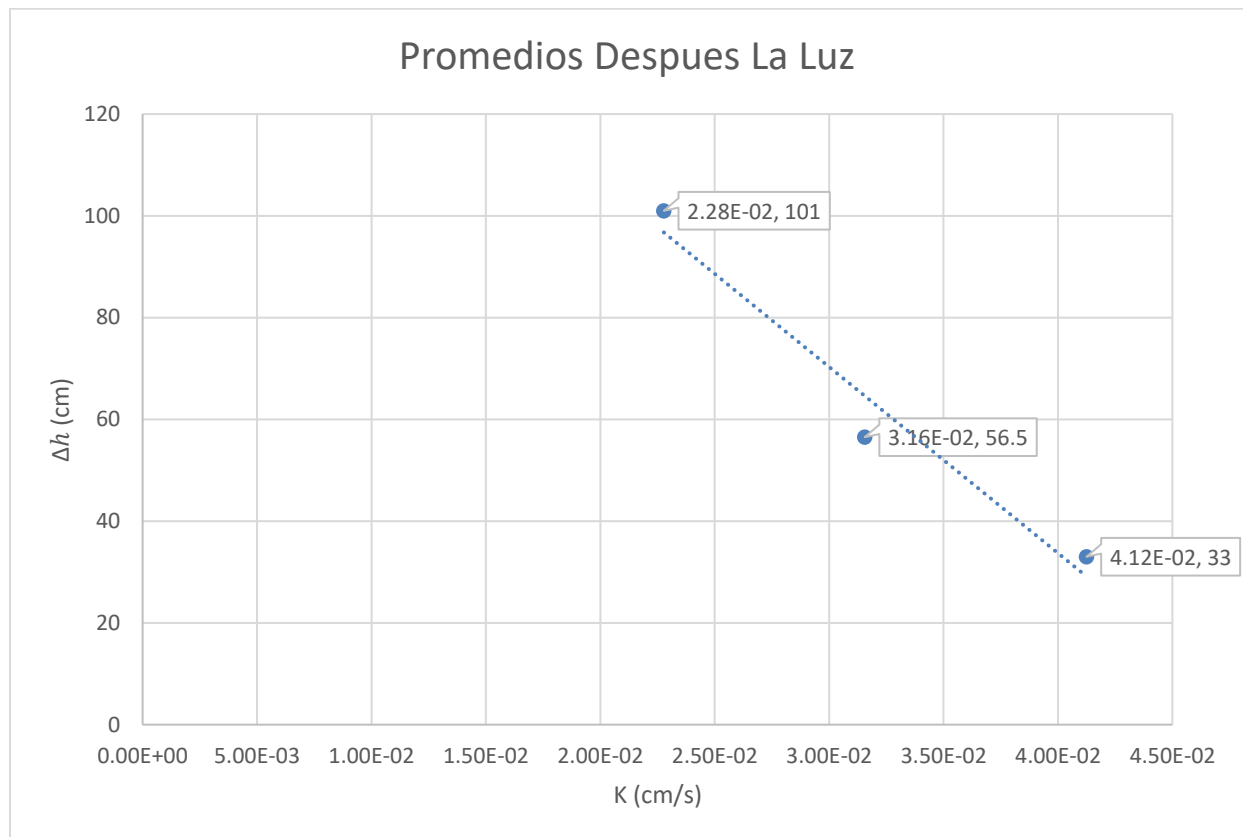


Figura 16. Resultados del coeficiente de permeabilidad del material “La Luz” después de la compactación

Banco “REURBA” (antes de la compactación)

En la Tabla se presentan los resultados del ensayo de permeabilidad del material reciclado proveniente de REURBA en condición suelta, antes de la compactación.

Ensayo	k promedio (cm/s)
K1	1.23×10^{-2}
K2	1.40×10^{-2}
K3	1.44×10^{-2}
Promedio general	1.36×10^{-2}

Obteniendo una gráfica general de los resultados

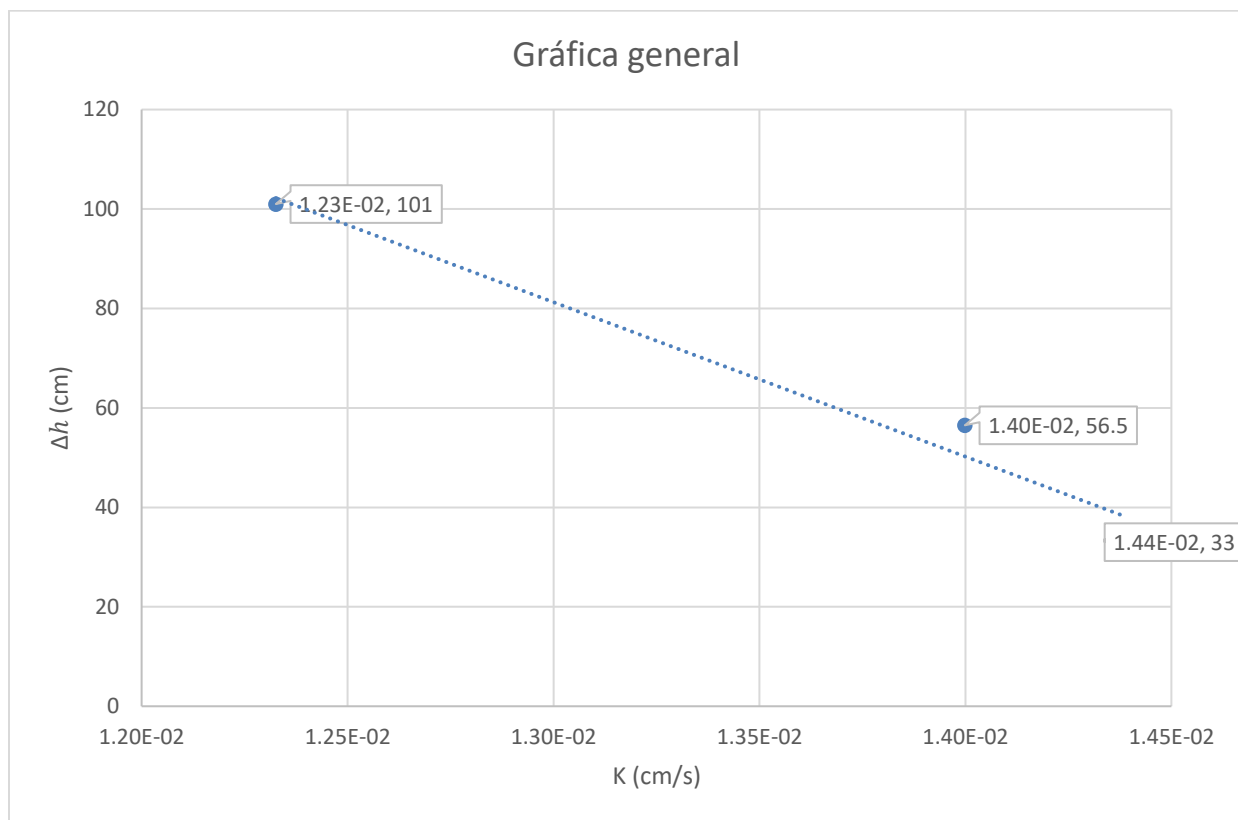


Figura 17. Resultados del coeficiente de permeabilidad del material REURBA antes de la compactación

Banco “REURBA” (después de la compactación)

En la Tabla se presentan los resultados del ensayo de permeabilidad del material reciclado proveniente de REURBA en condición compactada, con el fin de evaluar la influencia de la reducción de vacíos en el comportamiento hidráulico.

Ensayo	k promedio (cm/s)
K1	2.92×10^{-2}
K2	3.21×10^{-2}
K3	3.89×10^{-2}
Promedio general	3.34×10^{-2}

Obteniendo una gráfica general de los resultados

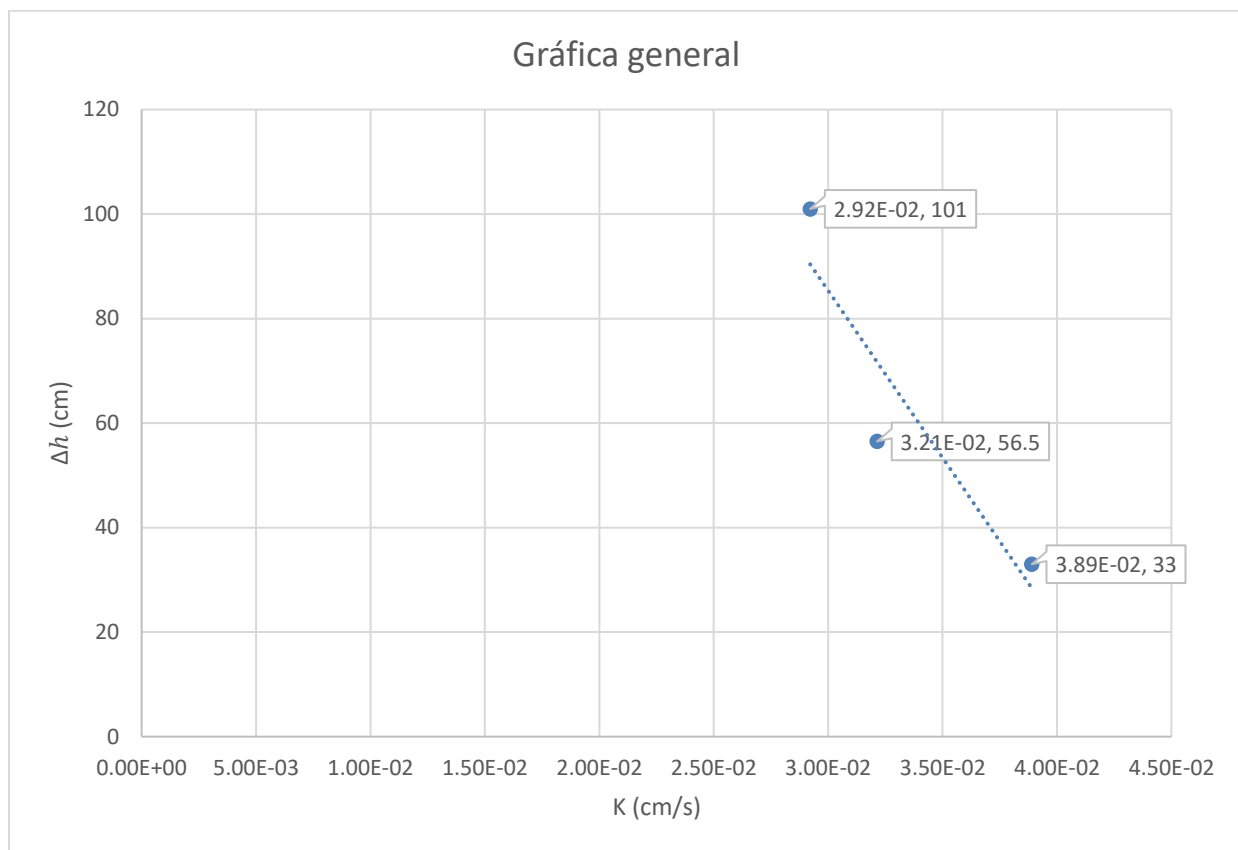
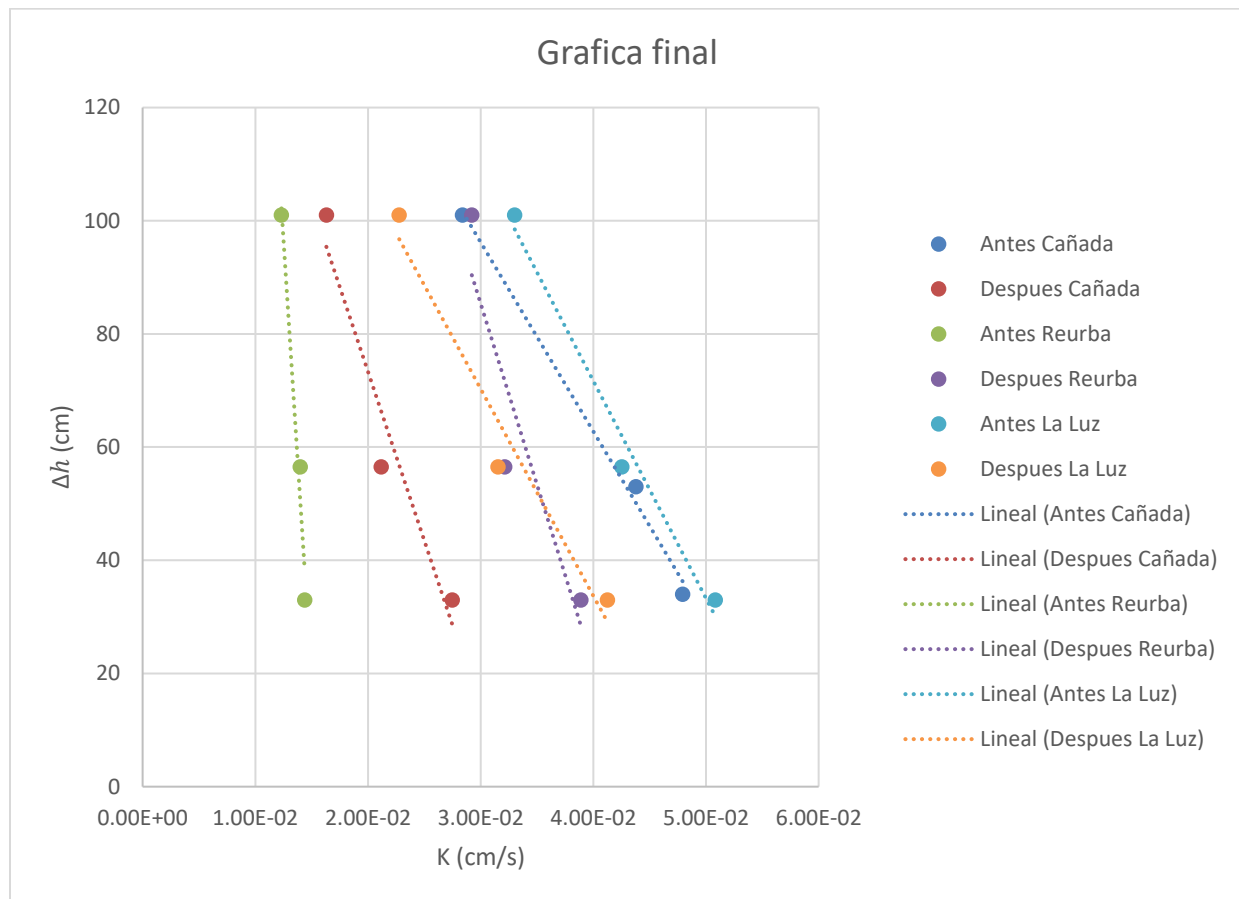


Figura 18. Resultados del coeficiente de permeabilidad del material REURBA después de la compactación

Por último, se muestra una gráfica final de la recopilación las tres pruebas de los tres bancos de material



Análisis del material REURBA

El material reciclado proveniente de REURBA presentó un coeficiente de permeabilidad de 1.36×10^{-2} cm/s antes de la compactación y de 3.34×10^{-2} cm/s después de la compactación, evidenciando un incremento en su capacidad de flujo de agua tras el proceso de densificación.

Este comportamiento puede atribuirse a la reorganización de las partículas durante la compactación, lo que genera una estructura granular más interconectada y con canales de flujo más definidos, favoreciendo el drenaje interno del material. A diferencia de materiales finos o mal graduados, el material reciclado presenta una granulometría que permite mantener e incluso mejorar la conectividad de vacíos.

Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango de materiales granulares altamente permeables (10^{-3} a 10^{-2} cm/s), lo que confirma su idoneidad para su uso en

capas de base hidráulica, donde es fundamental evitar la acumulación de agua dentro de la estructura del pavimento.

9.10 Prueba de resistencia a la abrasión (Máquina de Los Ángeles)

Se realizó el ensayo de resistencia a la abrasión mediante la máquina de Los Ángeles, con el objetivo de evaluar la durabilidad y resistencia al desgaste de los agregados ante condiciones de impacto y fricción similares a las que experimentan en servicio dentro de un pavimento.

El ensayo se llevó a cabo conforme a la normativa aplicable, considerando la clasificación granulométrica tipo A y el número correspondiente de esferas de acero. La pérdida por abrasión se determinó como el porcentaje de material degradado después de un número específico de revoluciones, lo cual permite evaluar la calidad del agregado para su uso en capas estructurales.

Tipo de composición de la muestra de prueba	Rango de tamaños		Masa de la fracción g	Carga abrasiva	
	mm	Designación		Número de esferas	Masa total g
A	37,5 - 25	1½" - 1"	1 250 ± 25	12	5 000 ± 25
	25 - 19	1" - ¾"	1 250 ± 25		
	19 - 12,5	¾" - ½"	1 250 ± 10		
	12,5 - 9,5	½" - ⅜"	1 250 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
B	19 - 12,5	¾" - ½"	2 500 ± 10	11	4 584 ± 25
	12,5 - 9,5	½" - ⅜"	2 500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
C	9,5 - 6,3	⅜" - ¼"	2 500 ± 10	8	3 330 ± 20
	6,3 - 4,75	¼" - N°4	2 500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
D	4,75 - 2	N°4 - N°10	5 000 ± 10	6	2 500 ± 15

Banco REURBA

En la Tabla siguiente, se presentan los resultados del ensayo de abrasión Los Ángeles para el material reciclado de REURBA en condición antes de la compactación.

ANTES

Concepto	Peso (g)
Peso de la charola	861.5
Tipo de clasificación	A
Peso retenido en malla 1 ½" – 1"	1249.6
Peso retenido en malla 1" – ¾"	1250
Peso retenido en malla ¾" – ½"	1250.6
Peso retenido en malla ½" – ⅜"	1248.8
Peso inicial	5000
Número de esferas de acero	12
Peso total de esferas	4980.0
Peso retenido después de la prueba	3824.4
Peso final	4685.9
Pérdida por abrasión (Pa)	23.51 %

En la Tabla, se presentan los resultados del ensayo de abrasión Los Ángeles para el material reciclado de REURBA en condición compactada.

DESPUÉS

Concepto	Peso (g)
Peso de la charola	861.5
Tipo de clasificación	A
Peso retenido en malla 1 ½" – 1"	1247.7
Peso retenido en malla 1" – ¾"	1249.7
Peso retenido en malla ¾" – ½"	1250.2
Peso retenido en malla ½" – ⅜"	1250.1
Peso inicial	4997.7
Número de esferas de acero	12
Peso total de esferas	4980.0
Peso retenido después de la prueba	3624.8
Peso final	4486.3
Pérdida por abrasión (Pa)	27.47 %

Los resultados de la prueba de abrasión Los Ángeles para el material reciclado de concreto indican una pérdida por desgaste de **27.47 %**. Este valor se encuentra dentro del rango establecido por la normativa aplicable (por ejemplo, la **N-CMT-4-04/02 de la SCT** establece un límite máximo de 30% para bases hidráulicas, lo que sugiere que el material cumple con los criterios de resistencia al desgaste por abrasión y es

técnicamente viable para emplearse como agregado en la conformación de bases para pavimentos.

El incremento en la pérdida por abrasión después de la compactación puede atribuirse a la fractura de partículas más débiles durante el proceso de densificación, lo cual expone superficies más susceptibles al desgaste. Sin embargo, este comportamiento se mantiene dentro de parámetros aceptables y no compromete su desempeño estructural.

Banco AGC

En la Tabla siguiente, se presentan los resultados del ensayo de abrasión para el material del banco La Cañada en condición antes de la compactación.

ANTES

Concepto	Peso (g)
Peso de la charola	861.5
Tipo de clasificación	A
Peso retenido en malla 1 ½" – 1"	1247.7
Peso retenido en malla 1" – ¾"	1249.7
Peso retenido en malla ¾" – ½"	1250.2
Peso retenido en malla ½" – ⅜"	1250.1
Peso inicial	4997.7
Número de esferas de acero	12
Peso total de esferas	4980.0
Peso retenido después de la prueba	3874.7
Peso final	4736.2
Pérdida por abrasión (Pa)	22.47 %

En la Tabla, se presentan los resultados del ensayo de abrasión para el material del banco La Cañada en condición compactada.

DESPUÉS

Concepto	Peso (g)
Peso de la charola	861.5
Tipo de clasificación	A
Peso retenido en malla 1 ½" – 1"	1247.7
Peso retenido en malla 1" – ¾"	1249.7
Peso retenido en malla ¾" – ½"	1250.2

Peso retenido en malla $\frac{1}{2}$ " – $\frac{3}{8}$ "	1250.1
Peso inicial	4997.7
Número de esferas de acero	12
Peso total de esferas	4980.0
Peso retenido después de la prueba	4022.7
Peso final	4884.2
Pérdida por abrasión (Pa)	19.51 %

El material del banco La Cañada presentó una pérdida por abrasión de **22.47 % antes de la compactación** y de **19.51 % después de la compactación**, observándose una ligera disminución en el desgaste tras la compactación.

Este comportamiento sugiere una mejora en la estabilidad del material, posiblemente debido a un mejor acomodo de las partículas y a la eliminación de elementos más frágiles durante el proceso de compactación. Ambos valores cumplen ampliamente con la normativa, indicando una alta resistencia al desgaste.

Banco La Luz

En la Tabla siguiente, se presentan los resultados del ensayo de abrasión para el material del banco La Luz en condición antes de la compactación.

ANTES

Concepto	Peso (g)
Peso de la charola	861.5
Tipo de clasificación	A
Peso retenido en malla $1\frac{1}{2}$ " – 1"	1249.3
Peso retenido en malla 1" – $\frac{3}{4}$ "	1250.3
Peso retenido en malla $\frac{3}{4}$ " – $\frac{1}{2}$ "	1250.2
Peso retenido en malla $\frac{1}{2}$ " – $\frac{3}{8}$ "	1249.4
Peso inicial	4999.2
Número de esferas de acero	12
Peso total de esferas	4980.0
Peso retenido después de la prueba	3665.6
Peso final	4527.1
Pérdida por abrasión (Pa)	26.68 %

En la Tabla, se presentan los resultados del ensayo de abrasión para el material del banco La Luz en condición compactada.

DESPUÉS

Concepto	Peso (g)
Peso de la charola	861.5
Tipo de clasificación	A
Peso retenido en malla 1 ½" – 1"	1249.3
Peso retenido en malla 1" – ¾"	1249.4
Peso retenido en malla ¾" – ½"	1250.2
Peso retenido en malla ½" – ⅜"	1250.6
Peso inicial	4999.5
Número de esferas de acero	12
Peso total de esferas	4980.0
Peso retenido después de la prueba	3779.9
Peso final	4641.4
Pérdida por abrasión (Pa)	24.39 %

El material del banco La Luz presentó una pérdida por abrasión de **26.68 % antes de la compactación** y de **24.39 % después de la compactación**, mostrando una ligera mejora en su resistencia al desgaste.

Estos valores se encuentran dentro del límite permisible, lo que confirma que el material posee características adecuadas para su uso en capas de base hidráulica, manteniendo una resistencia aceptable frente a esfuerzos de impacto y fricción.

Comparación general de resultados

Para facilitar la interpretación de los resultados, se elaboró una tabla comparativa de la pérdida por abrasión para los tres bancos de materiales, considerando las condiciones antes y después de la compactación.

Tabla 5. Comparación de la pérdida por abrasión (Los Ángeles) de los materiales evaluados antes y después de la compactación.

Banco de material	Antes de compactación (%)	Después de compactación (%)	Límite normativo (%)	Cumplimiento
REURBA	23.51	27.47	≤ 30	Cumple
La Cañada (AGC)	22.47	19.51	≤ 30	Cumple

Banco de material	Antes de compactación (%)	Después de compactación (%)	Límite normativo (%)	Cumplimiento
La Luz	26.68	24.39	≤ 30	Cumple

Análisis general

En términos generales, los tres materiales evaluados presentan valores de pérdida por abrasión inferiores al límite máximo permitido por la normativa, lo que confirma su viabilidad técnica para su uso en bases hidráulicas.

El material reciclado de REURBA mostró un comportamiento ligeramente más susceptible al desgaste en condición compactada en comparación con los materiales naturales; sin embargo, sus valores permanecen dentro de rangos aceptables.

Por otro lado, los materiales naturales (La Cañada y La Luz) presentaron una tendencia a mejorar o estabilizar su resistencia al desgaste después de la compactación, lo cual está asociado a su origen pétreo y mayor uniformidad estructural.

9.11 Propiedades gravimétricas

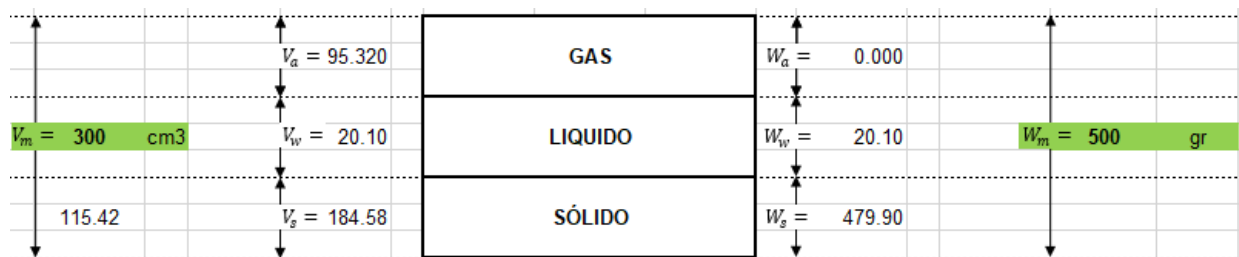
Con el objetivo de determinar las propiedades físicas fundamentales de los materiales evaluados, se realizaron pruebas gravimétricas en cada uno de los bancos de estudio. Estas pruebas permiten obtener parámetros como el contenido de humedad, peso volumétrico, gravedad específica, relación de vacíos y grado de saturación, los cuales son esenciales para caracterizar el comportamiento del material en condiciones reales de servicio.

El procedimiento se llevó a cabo mediante las diferentes fases del material (sólidos, agua y aire), así como del volumen total de la muestra. A partir de estos datos, se calcularon las relaciones volumétricas y gravimétricas que describen el estado físico del suelo o agregado.

Los resultados obtenidos se presentan para cada banco de material, permitiendo comparar su comportamiento antes y después de la compactación, así como evaluar su idoneidad para su uso en capas estructurales de pavimentos.

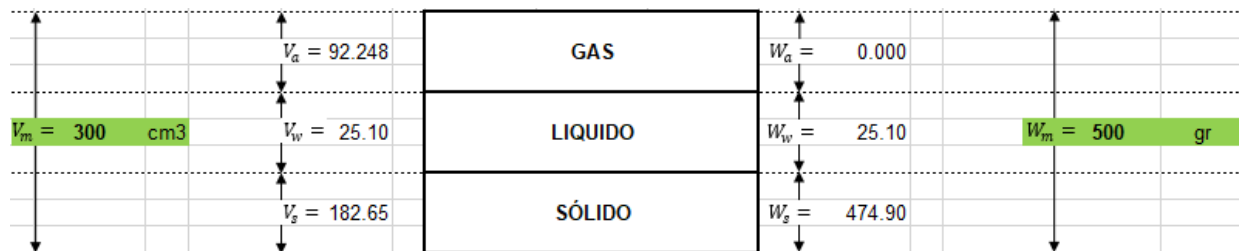
Estos parámetros son fundamentales para interpretar la respuesta mecánica observada en ensayos posteriores como CBR

Banco “La Luz”



Peso volumetrico			Peso seco			Peso del aire		
$\gamma_m = W_m / V_m$	1.67	gr/cm ³	$W_s = \frac{W_s}{1 + w/100}$	479.90	gr	$W_a = W_m - W_s - W_w$		
						0.000	gr	
Humedad			Volumen de sólidos			Volumen del aire		
$W_f =$	117.1	gr	$V_s = W_s / S_s$	184.58	gr	$V_a = V_m - V_s - V_w$		
$W_f + W_m =$	345.9	gr				95.320	gr	
$W_s =$	336.7	gr	Relación de vacíos			Grado de saturación		
$w = \frac{(W_f + W_m) - (W_f + W_s)}{(W_f + W_s)} \times 100$			$e = V_s / (V_m - V_s)$	1.60		$G_w = S_r = \frac{V_w}{V_p} \times 100$		
$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100$	4.19	%	Volumen del agua			17.42	gr	
Gravedad especifica			$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100$			Peso volumetrico		
$S_s = \frac{W_s}{V_s \gamma_w}$	2.600		$W_w = \frac{W_s W}{100}$	20.10	cm ³	$\gamma_a = \frac{\gamma_m}{1 + w/100}$	1.60	gr/cm ³

Banco “La Cañada”



Peso volumetrico			Peso seco			Peso del aire		
$\gamma_m = W_m/V_m$	1.67	gr/cm ³	$W_s = \frac{W_g}{1 + w/100}$	474.90	gr	$W_a = W_m - W_s - W_w$		
						0.000	gr	
Humedad			Volumen de sólidos			Volumen del aire		
$W_f =$	122.5	gr	$V_s = W_s/S_s$	182.65	gr	$V_a = V_m - V_s - V_w$		
$W_f + W_m =$	353.6	gr				92.248	gr	
$W_s =$	342	gr	Relación de vacíos			Grado de saturación		
$W = \frac{(W_f + W_m) - (W_f + W_s)}{(W_f + W_s) - W_f} \times 100$			$e = V_s/V_m - V_s$	1.56		$G_w = Sr = \frac{V_w}{V_v} \times 100$		
$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100$	5.28	%	Volumen del agua			21.39	gr	
Gravedad especifica			$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100$			Peso volumetrico		
$S_s = \frac{W_s}{V_s \gamma_w}$	2.600		$W_w = \frac{W_s W}{100}$	25.10	cm ³	$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 + W/100}$	1.58	gr/cm ³

Banco "REURBA"

$V_m = 400 \text{ cm}^3$	$V_a = 184.639$	GAS	$W_a =$	0.000	$W_m = 500 \text{ gr}$
	$V_w = 37.46$	LIQUIDO	$W_w =$	37.46	
	$V_s = 177.90$	SÓLIDO	$W_s =$	462.54	

Peso volumetrico			Peso seco			Peso del aire		
$\gamma_m = W_m/V_m$	1.25	gr/cm ³	$W_s = \frac{W_g}{1 + w/100}$	462.54	gr	$W_a = W_m - W_s - W_w$		
						0.000	gr	
Humedad			Volumen de sólidos			Volumen del aire		
$W_f =$	125.8	gr	$V_s = W_s/S_s$	177.90	gr	$V_a = V_m - V_s - V_w$		
$W_f + W_m =$	322	gr				184.639	gr	
$W_s =$	307.3	gr	Relación de vacíos			Grado de saturación		
$W = \frac{(W_f + W_m) - (W_f + W_s)}{(W_f + W_s) - W_f} \times 100$			$e = V_s/V_m - V_s$	0.80		$G_w = Sr = \frac{V_w}{V_v} \times 100$		
$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100$	8.10	%	Volumen del agua			16.87	gr	
Gravedad especifica			$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100$			Peso volumetrico		
$S_s = \frac{W_s}{V_s \gamma_w}$	2.600		$W_w = \frac{W_s W}{100}$	37.46	cm ³	$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 + W/100}$	1.16	gr/cm ³

9.12 Prueba de CBR (California Bearing Ratio)

Con el objetivo de evaluar la capacidad de soporte de los materiales analizados, se realizaron ensayos de California Bearing Ratio (CBR) conforme a la norma ASTM D1557, empleando la energía de compactación modificada ($2700 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$), representativa de las condiciones de diseño para capas estructurales de pavimentos.

Para cada banco de material se realizaron ensayos a diferentes contenidos de humedad, con el fin de analizar la influencia de este parámetro en la resistencia mecánica. A partir de los resultados obtenidos, se generaron curvas carga–penetración para cada condición de humedad, así como las respectivas correcciones conforme al procedimiento normativo.

Posteriormente, se determinaron los valores de CBR a partir de las penetraciones estándar (2.5 mm y 5.0 mm), seleccionando el valor representativo para cada caso. Este enfoque permite evaluar de manera integral el comportamiento mecánico de los materiales y establecer su viabilidad para su uso en bases hidráulicas.

Para cada banco de material, se presentan las curvas carga–penetraciones obtenidas a diferentes contenidos de humedad, con el fin de analizar la variación de la resistencia en función de este parámetro. Estas curvas permiten visualizar el comportamiento mecánico del material bajo condiciones controladas de compactación y constituyen la base para la determinación del valor de CBR.

Banco “La Luz”

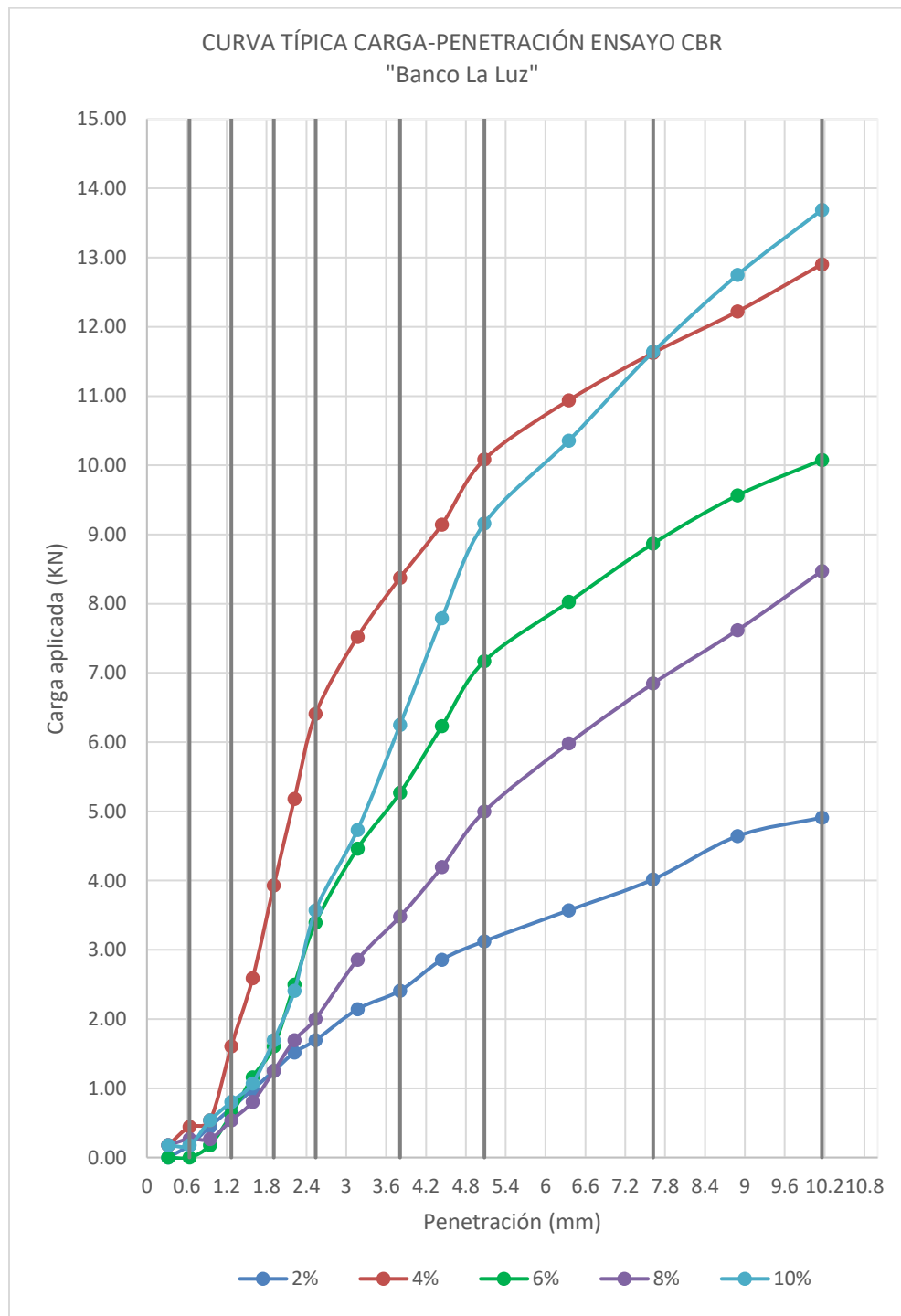


Fig 19. Curva típica carga-penetración ensayo cbr "Banco La Luz"

A partir de las curvas obtenidas, se realizó la corrección de la curva carga-penetración conforme al procedimiento establecido en la normativa, con el fin de eliminar irregularidades iniciales y obtener una curva representativa del comportamiento del

material. Sobre esta curva corregida se determinaron los valores de carga correspondientes a las penetraciones estándar de 2.5 mm y 5.0 mm, utilizados para el cálculo del CBR. Dichas graficas se muestran en el apéndice 1.

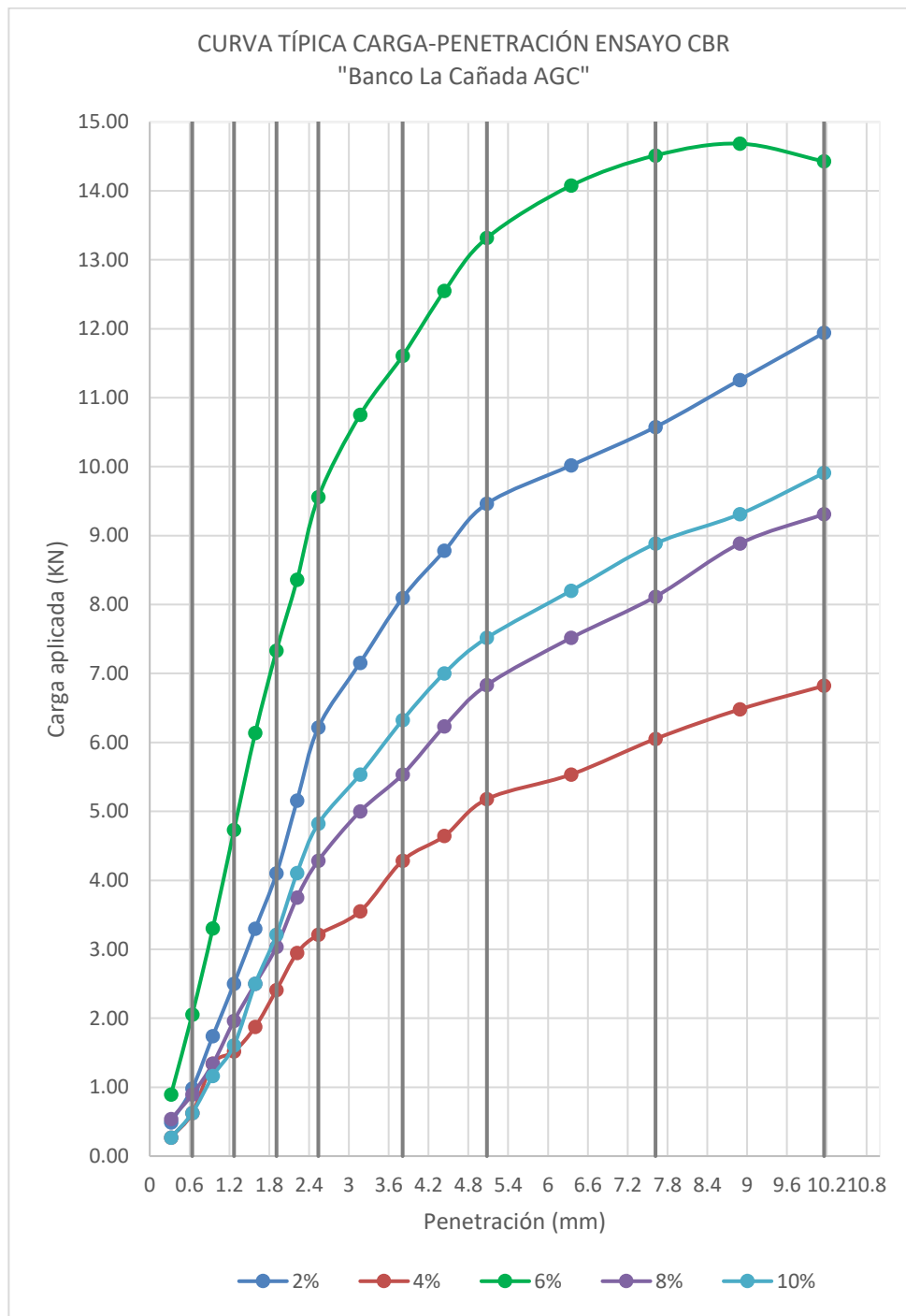
Con base en los resultados del ensayo CBR conforme a la norma ASTM D1557, se identifica que el material presenta una alta sensibilidad al contenido de humedad, lo que influye directamente en su capacidad de soporte.

Los valores de CBR muestran una tendencia general de incremento conforme aumenta la humedad, pasando de un valor inicial de 41.23% a una humedad de 1.93%, hasta alcanzar un valor máximo de **224.89%** a una humedad de 10.06%.

Este comportamiento indica que el material desarrolla su mayor resistencia en condiciones de humedad relativamente altas, cercanas a su contenido óptimo bajo energía de compactación modificada. No obstante, se presentan fluctuaciones intermedias en los valores de CBR, las cuales pueden atribuirse a variaciones en la distribución del agua, reacomodo de partículas finas y cambios en la estructura interna del material.

El alto valor de CBR alcanzado confirma que el material posee una excelente capacidad portante, siendo apto para su uso como subbase e incluso como base hidráulica, siempre que se controle adecuadamente el contenido de humedad durante su compactación en campo.

Banco “La Cañada (AGC)”



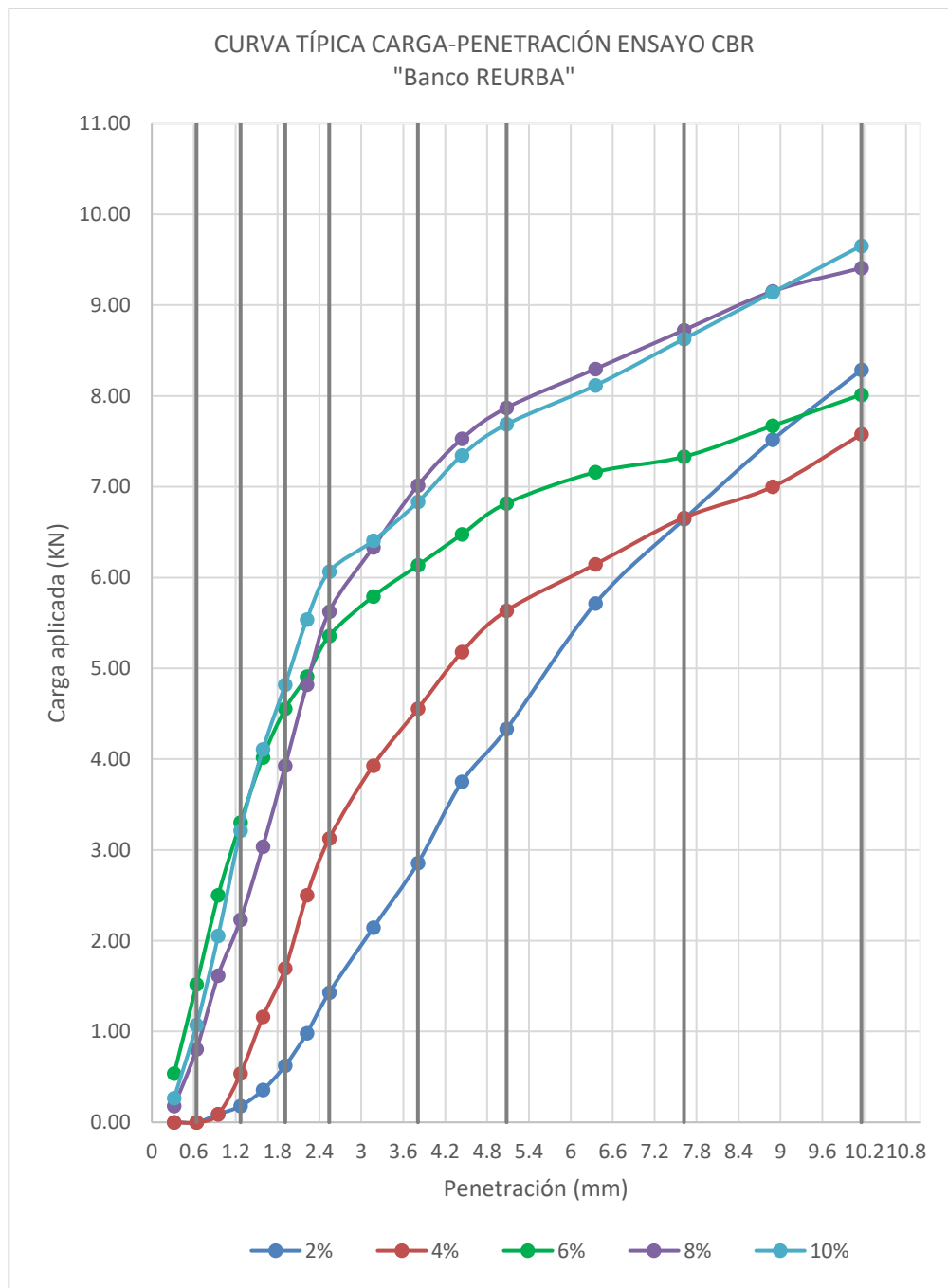
A partir de los resultados obtenidos en la prueba de CBR conforme a la norma ASTM D1557, se observa que el material presenta un comportamiento altamente dependiente del contenido de humedad, con variaciones significativas en su capacidad de soporte.

El valor máximo de CBR se alcanza a una humedad de 2.25%, con un valor de **199.94%**, lo que indica que el material desarrolla su mayor resistencia en condiciones relativamente secas. Posteriormente, se presenta una disminución notable del CBR al aumentar la humedad hasta 4.68% (67.50%), atribuida a la reducción de la fricción interna y al efecto de lubricación del agua.

Al continuar incrementando la humedad, el material muestra una recuperación en su capacidad portante, alcanzando nuevamente valores elevados, lo que evidencia una reorganización favorable de las partículas. Sin embargo, a contenidos de humedad mayores, se observa una tendencia decreciente, asociada a la generación de presiones intersticiales.

En términos generales, el material presenta valores elevados de CBR, lo que lo clasifica como apto para su uso en capas estructurales de pavimentos. Se recomienda controlar el contenido de humedad dentro de un rango aproximado de 2% a 7% para garantizar un comportamiento mecánico óptimo.

Banco “REURBA”



Con base en los resultados obtenidos del ensayo CBR conforme a la norma ASTM D1557 (compactación modificada), se observa que el material presenta un comportamiento no lineal en función del contenido de humedad, característico de materiales granulares con fracción fina activa.

El CBR muestra una disminución inicial al incrementar la humedad, pasando de un valor de 134.93% a una humedad de 3.18% a 97.45% a 5.73%, lo cual se asocia al efecto lubricante del agua que reduce la fricción interna entre partículas. Posteriormente, se observa un incremento progresivo de la capacidad de soporte, alcanzando valores de 127.44% y 149.93% en humedades intermedias.

El valor máximo de CBR se registra a una humedad de 10.74%, con un valor de **172.41%**, lo que indica que el material desarrolla su mayor capacidad portante en condiciones de humedad relativamente altas dentro del rango ensayado.

Estos resultados confirman que el material presenta una excelente capacidad estructural, siendo apto para su uso en subbases e incluso como base hidráulica. Se recomienda que las condiciones de compactación en campo se mantengan en un rango de humedad cercano al óptimo identificado ($\approx 9\%–11\%$) para maximizar su desempeño mecánico.

Banco de material	Humedad óptima (%)	CBR máximo (%)	Clasificación
REURBA	10.74	172.41	Excelente
La Cañada (AGC)	2.25	199.94	Excelente
La Luz	10.06	224.89	Excelente

Con base en los resultados obtenidos del ensayo CBR para los tres bancos de materiales evaluados, se observa que todos presentan valores de capacidad de soporte significativamente superiores al mínimo establecido por la normativa vigente.

De acuerdo con la especificación **N-CMT-4-02-003/21** de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT), el valor mínimo requerido de CBR para materiales utilizados en capas de base hidráulica es del **80 %** bajo condiciones de compactación controladas.

En este sentido, los materiales analizados presentan valores máximos de **172.41 % (REURBA)**, **199.94 % (La Cañada)** y **224.89 % (La Luz)**, lo que indica que todos

superan ampliamente el criterio normativo, confirmando su alta capacidad portante y su aptitud para ser utilizados en la construcción de capas estructurales de pavimentos.

Adicionalmente, se identificó que cada material presenta un comportamiento distinto en función del contenido de humedad, destacando que la humedad óptima para maximizar el CBR no coincide necesariamente con la humedad óptima de compactación obtenida en el ensayo Proctor. Este comportamiento resalta la importancia de controlar de manera precisa las condiciones de humedad en campo para garantizar el máximo desempeño mecánico del material.

En términos comparativos, el material del banco **La Luz** presentó el mayor valor de CBR, seguido por **La Cañada** y finalmente **REURBA**, aunque todos dentro de un rango que los clasifica como materiales de excelente calidad estructural.

En conjunto, estos resultados confirman que tanto los materiales naturales como el material reciclado evaluado cumplen con los requisitos técnicos establecidos por la normativa mexicana, respaldando su viabilidad para su aplicación en infraestructura vial bajo un enfoque técnico y sostenible.

9.12 Efecto de la energía de compactación en las propiedades de los materiales

Para comprender de manera integral la viabilidad técnica de los materiales evaluados, resulta indispensable analizar su comportamiento físico e hidráulico en dos estados fundamentales: en condición suelta (previo a la compactación) y en condición densificada (posterior a la compactación). La aplicación de la energía de compactación en laboratorio (método Proctor Modificado) simula los esfuerzos mecánicos a los que será sometido el material en campo mediante el equipo de rodillos.

Durante este proceso, el esqueleto mineral experimenta fricción, reacomodo y, en muchos casos, la fractura de las partículas más débiles (trituration secundaria). La Tabla 6, consolida los resultados de las pruebas realizadas para los tres bancos de estudio, contrastando los valores obtenidos antes y después de la compactación. Asimismo, se presenta la interpretación técnica de las variaciones registradas y su

cumplimiento con los parámetros exigidos por la norma N-CMT-4-02-002/22 aplicable a bases hidráulicas.

Tabla 6. Comparativa de propiedades de los materiales antes y después de la compactación e interpretación técnica.

Prueba (Norma)	Banco	Antes de Compactar	Después de Compactar	Límite Normativo	Interpretación de la Variación (Causas y Efectos)
Equivalente de Arena (ASTM D2419)	REURBA	64%	46%	Mínimo 40% (Cumplen)	Baja en todos los bancos. <i>Causa:</i> La fricción y ruptura de partículas durante el apisonado genera nuevos finos libres (polvo). <i>Efecto:</i> Aunque la "limpieza" disminuye, los valores se mantienen sobre el 40%, garantizando que los finos generados son inertes y no plásticos.
	AGC	71%	48%		
	La Luz	56%	43%		
Abrasión Los Ángeles (M-MMP-1-06/03)	REURBA	23.51%	27.47%	Máximo 30% (Cumplen)	REURBA sube; Naturales bajan. <i>Causa en RCD:</i> La compactación microfisura el mortero adherido al concreto reciclado, dejándolo más vulnerable al desgaste posterior. <i>Causa en naturales:</i> Las puntas débiles de la roca virgen se rompen al compactar, por lo que a la máquina entra la partícula ya estabilizada y resistente. <i>Efecto:</i> Todos garantizan excelente durabilidad bajo tráfico.
	AGC	22.47%	19.51%		
	La Luz	26.68%	24.39%		
Índice de Forma	REURBA	A: 38.7% L: 10.9%	A: 30.7% L: 6.7%	Máximo 40% (por parámetro)	Baja en todos los bancos. <i>Causa:</i> Las partículas excesivamente largas o planas son frágiles y se

Alargamiento (A)	AGC	A: 14.1% L: 3.5%	A: 13.7% L: 3.5%	(Cumplen)	fracturan al recibir la energía de compactación, adquiriendo formas más cúbicas. <i>Efecto:</i> Impacto altamente positivo que mejora la trabazón mecánica y el ángulo de fricción interna del estrato base.
Lajeo (L)	La Luz	A: 21.5% L: 5.6%	A: 19.7% L: 5.5%		
Límite Líquido (LL)	REURBA	13%	12%	Máximo 25%	Baja o se mantiene estable. <i>Causa:</i> El reacomodo y la trituración secundaria alteran ligeramente la superficie específica de los finos, reduciendo su capacidad de retención de agua.
(M-MMP-1-07/07)	AGC	14%	12%	(No Plásticos)	
	La Luz	18%	16%	(Cumplen)	<i>Efecto:</i> Garantiza que los estratos no sufrirán cambios volumétricos (expansión/contracción) ante variaciones de humedad.
Permeabilidad (k)	REURBA	1.36×10^{-2} cm/s	3.34×10^{-2} cm/s		Naturales bajan; REURBA sube. <i>Causa en naturales:</i> Reducción normal del índice de vacíos por densificación.
	AGC	4.00×10^{-2} cm/s	2.17×10^{-2} cm/s	Alta permeabilidad de drenaje	<i>Causa en RCD:</i> Al fracturarse el mortero, se organizan canales de flujo interconectados en el esqueleto mineral reciclado.
	La Luz	4.14×10^{-2} cm/s	3.19×10^{-2} cm/s	(Aceptable)	<i>Efecto:</i> Todos mantienen la capacidad de drenar rápidamente el agua infiltrada, protegiendo la

					estructura del pavimento.
--	--	--	--	--	---------------------------

El análisis comparativo expuesto en la Tabla X.X demuestra que el proceso de compactación no afecta negativamente la viabilidad de los materiales, sino que actúa como un filtro estabilizador. Particularmente en el material reciclado (REURBA), los esfuerzos aplicados durante la densificación eliminan las partículas alargadas y frágiles, mejorando su esqueleto mineral y su trabazón mecánica. Si bien este fenómeno de trituración secundaria genera un incremento de finos limpios (evidenciado en la reducción del equivalente de arena) y una ligera susceptibilidad a la abrasión por la fatiga del mortero reciclado, los valores residuales se mantienen estrictamente dentro de los márgenes de seguridad dictados por la normativa. En conclusión, tanto los agregados de origen natural como los RCD poseen la capacidad de absorber la energía de compactación de forma eficiente, transformándose en matrices estables, no plásticas y permeables, óptimas para su desempeño como bases hidráulicas.

10. Análisis de ciclo de vida

El análisis de ciclo de vida (ACV) se realizó con el objetivo de evaluar y comparar los impactos ambientales asociados a la producción de base hidráulica utilizando materiales naturales y residuos de construcción y demolición (RCD). La modelación se llevó a cabo mediante el software especializado SimaPro, siguiendo los lineamientos establecidos en las normas ISO 14040 e ISO 14044.

Se definieron límites del sistema equivalentes y una unidad funcional común, considerando todas las etapas relevantes del proceso, incluyendo extracción, transporte, procesamiento y disposición final. A partir de esta modelación, se obtuvieron indicadores ambientales enfocados principalmente en el potencial de calentamiento global (GWP100), así como en la evaluación de daño ambiental.

En la Figura 20, se presentan los resultados del análisis de caracterización de impactos ambientales para los cuatro escenarios evaluados: base con material natural, base con RCD, y sus respectivas alternativas optimizadas.

Caracterización

Comparando 1 p 'Base material natural', 1 p 'base material RCD', 1 p 'base material RCD alternativa' y 1 p 'base material alternativa'; Método: IPCC 2021 GWP100 (incl. CO2 uptake) V1.03 / Caracterización

Sei	Categoría de impacto	Unidad	Base material natural	base material RCD	base material RCD alternativa	base material alternativa
W	GWP100 - fossil	kg CO2-eq	19.3	11.8	6.43	19.3
W	GWP100 - biogenic	kg CO2-eq	0.315	0.264	0.745	0.315
W	GWP100 - land transformation	kg CO2-eq	0.0137	0.0161	0.009504	0.0138
W	GWP100 - CO2 uptake	kg CO2-eq	-0.242	-0.242	-0.404	-0.293

UCORDORA 001

9.6.0.1 PhD

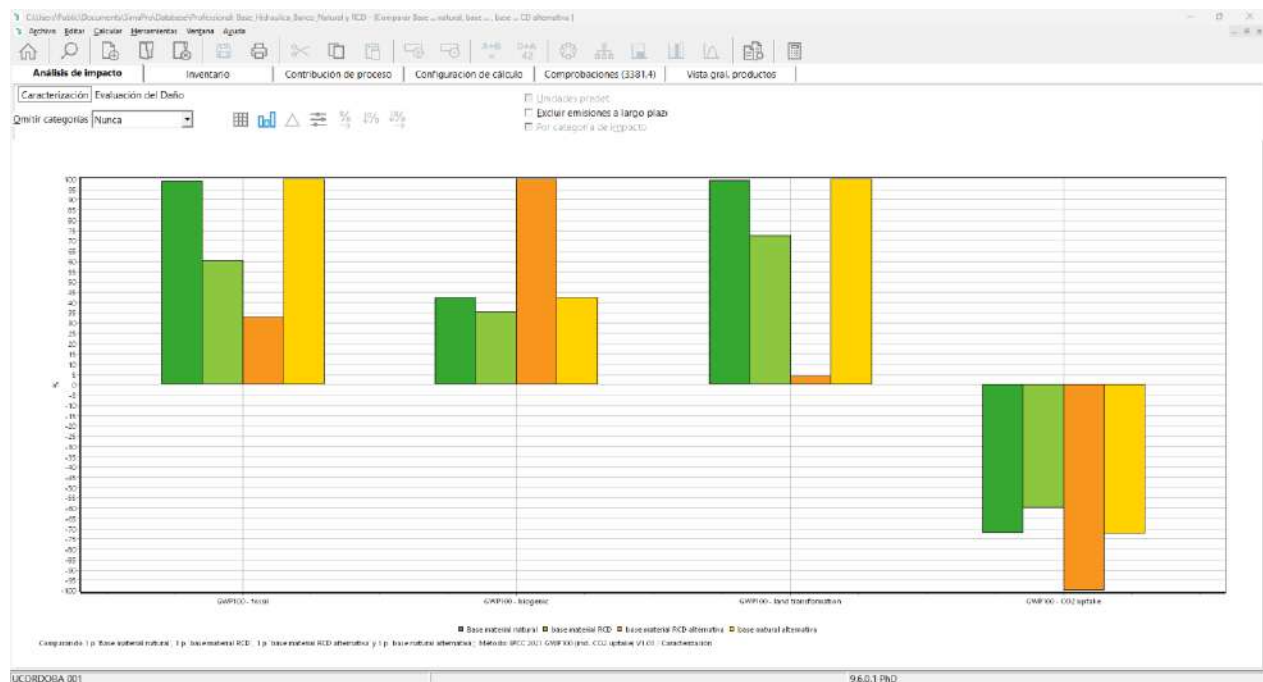


Fig.20 Resultados del análisis de impacto en cuanto a su caracterización comparando los cuatro procesos (material natural vs RCD y sus alternativas)

Como se observa, el escenario correspondiente al uso de material natural presenta el mayor impacto ambiental, particularmente en la categoría de cambio climático. En contraste, el uso de residuos de construcción y demolición muestra una reducción

significativa en las emisiones, destacando aún más la alternativa optimizada con RCD, la cual presenta el menor impacto global.

La Figura 21, muestra la evaluación de daño ambiental, integrando los efectos potenciales sobre la salud humana, los ecosistemas y los recursos.

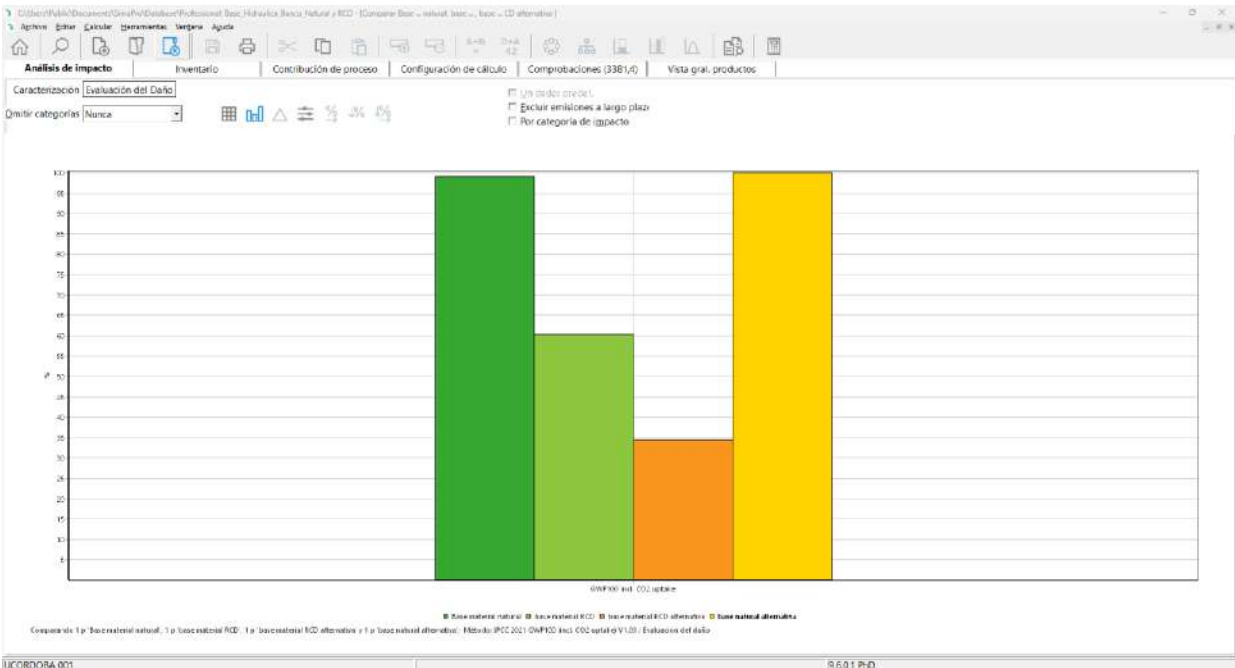
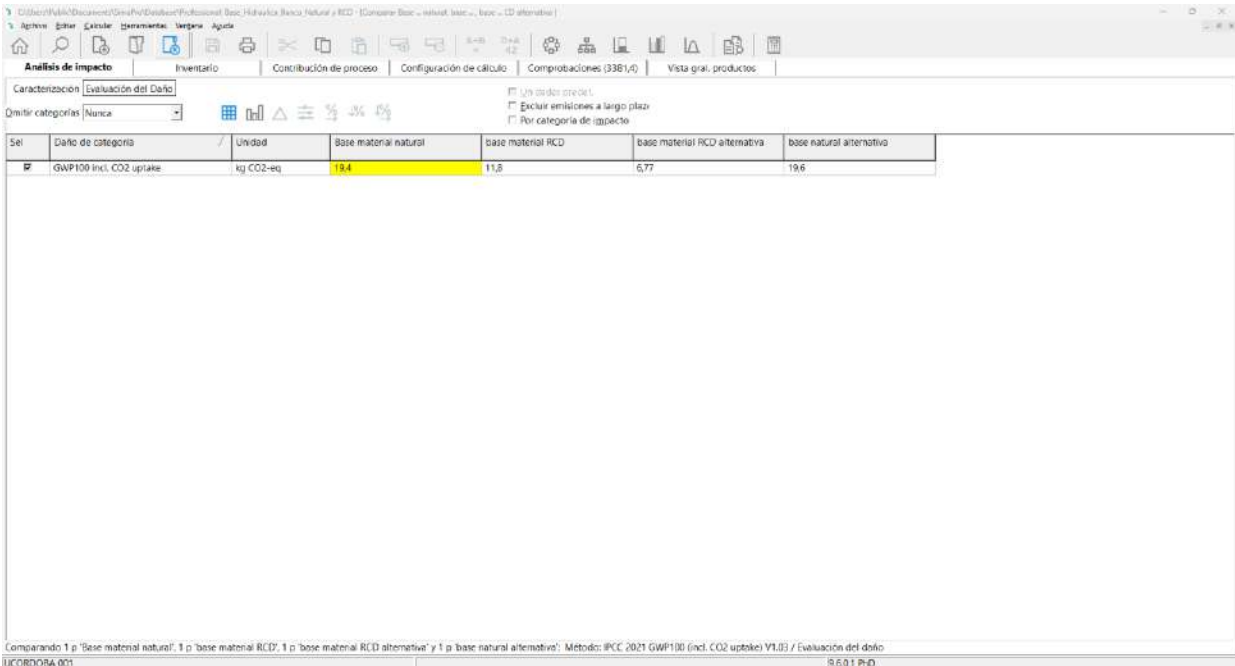


Fig.21 Resultados del análisis de impacto en cuanto a la evaluación de daño comparando los cuatro procesos (material natural vs RCD y sus alternativas)

Los resultados indican que los escenarios basados en materiales reciclados generan menores impactos en todas las categorías evaluadas. En particular, la alternativa optimizada con RCD presenta la menor contribución al daño ambiental, lo que confirma la ventaja del aprovechamiento de residuos frente al uso de materiales vírgenes.

En la Figura 22, se presenta el inventario de sustancias asociadas a cada uno de los procesos analizados, incluyendo emisiones al aire, agua y suelo.

No	Sustancia	Compartimiento	Subcompartimiento	Unidad	Base material natural	base material RCD	base material RCD alternativa	base natural alternativa
1	1-Butanol	Aire	high. pop.	kg	170	156	6,88	171
2	1-Butanol	Agua	river	kg	170	156	6,88	171
3	1-Butanol	Aire	high. pop.	kg	18,6	8,94	1,58	18,6
4	1-Butanol	Agua	river	kg	44,7	21,5	3,78	45,2
5	1-Pentanol	Aire	high. pop.	kg	252	270	2,81	252
6	1-Pentanol	Agua	river	kg	33,8	16,2	2,85	34,1
7	1-Propanol	Aire	high. pop.	kg	796	153	38,5	741
8	1-Propanol	Aire	low. pop.	kg	3,69	2,11	0,41	3,75
9	1-Propanol	Agua	river	kg	80,8	35,5	7,49	83,7
10	1,1,1-Trichloroethane	Aire	high. pop.	kg	6,72	5,31	0,131	6,73
11	1,1,1-Trichloroethane	Aire	low. pop.	kg	7,83	6,93	0,144	7,84
12	1,1,1-Trichloroethane	Agua	river	kg	21,8	15,7	1,23	21,9
13	1,1,1-Trichloroethane	Agua	river	kg	0,0107	0,0106	1,66-5	0,0107
14	1,3-Dioxolan-2-one	Agua	river	kg	400	348	10,2	401
15	1,4-Butanediol	Aire	high. pop.	kg	209	101	23,2	212
16	1,4-Butanediol	Agua	river	kg	480	233	53,3	487
17	2-Aminopropanol	Aire	high. pop.	kg	18,9	9,24	1,65	19,1
18	2-Aminopropanol	Agua	river	kg	45,5	22,3	3,96	45,9
19	2-Buten-2-methyl-	Aire	high. pop.	kg	1,48	0,0058	0,116	1,48
20	2-Buten-2-methyl-	Agua	river	kg	5,15	3,14	0,459	5,81
21	2-Methyl-1-propanol	Aire	high. pop.	kg	30,8	29,8	5,14	60,2
22	2-Methyl-1-propanol	Agua	river	kg	143	71	12,3	145
23	2-Methyl-2-butanol	Agua	low. pop.	kg	0,683	0,173	0,0545	0,68
24	2-Methyl-4-chlorophenoxyacetic acid	Aire	low. pop.	kg	26	24,1	0,857	26
25	2-Methyl-4-chlorophenoxyacetic acid	Agua	groundwater	kg	0,000248	0,00021	1,58E-5	0,00035
26	2-Methyl-4-chlorophenoxyacetic acid	Agua	river	kg	3,23	3	0,0457	3,24
27	2-Methyl-4-chlorophenoxyacetic acid	Suelo	agricultural	kg	10,5	5,37	0,403	10,7
28	2-Nitrobenzoic acid	Aire	high. pop.	kg	44,2	21,7	3,91	44,7
29	2-Propanol	Aire	high. pop.	kg	994	511	16,2	944
30	2-Propanol	Aire	high. pop.	kg	606	108	136	624
31	2-Propanol	Aire	low. pop.	kg	58,5	33,5	6,5	59,5
32	2-Propanol	Agua	river	kg	15,8	8,99	1,53	16
33	2-Propanol	Agua	river	kg	1,99	0,823	0,0535	1,9

Fig.22 Resultados del inventario de sustancias producidas en el proceso de cada una de las cuatro opciones

En términos de huella de carbono, la base elaborada con material natural presentó un impacto de **19.4 kg CO₂-eq**, mientras que la base con RCD registró **11.8 kg CO₂-eq**. Por su parte, la alternativa optimizada con RCD mostró el menor impacto, con **6.77 kg CO₂-eq**, evidenciando una reducción significativa frente a los procesos convencionales.

Estos resultados demuestran que la sustitución de materiales vírgenes por residuos reciclados permite reducir considerablemente las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción de bases hidráulicas. Esta reducción se debe principalmente a:

- La disminución en la extracción de recursos naturales
- La reducción en distancias de transporte
- Un menor consumo energético en los procesos de producción

En conjunto, el análisis de ciclo de vida confirma que el uso de residuos de construcción y demolición no solo es técnicamente viable, sino también ambientalmente favorable, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y promoviendo un enfoque de economía circular en la industria de la construcción vial.

11. Análisis ambiental de partículas P.M2.5

Para la evaluación de las emisiones de material particulado (PM2.5) derivadas de los procesos de trituración, se tomaron como marco de referencia los lineamientos establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Si bien la normativa EPA (específicamente bajo la subparte OOO del 40 CFR Part 60) no establece límites de emisión universales para cada banco de materiales de forma individual, esta agencia regula el desempeño de plantas de procesamiento de minerales no metálicos mediante controles de opacidad y la implementación de tecnologías de mitigación (como sistemas de riego o supresión de polvos). En este estudio, la referencia a los parámetros de la EPA se utiliza con un enfoque comparativo y de gestión de calidad del aire: el objetivo no es verificar el cumplimiento de una fuente estacionaria, sino cuantificar la carga contaminante emitida en la fuente (punto de trituración) del material reciclado (RCD) frente a la roca natural. Esta aproximación permite validar que el uso de agregados reciclados genera una huella de emisiones en la fuente significativamente menor, facilitando el cumplimiento de los estándares nacionales de calidad del aire ambiente (NAAQS) en el área de influencia del proyecto.

Con el fin de evaluar la concentración de partículas finas $PM_{2.5}$ asociadas a la producción de materiales para bases hidráulicas, se realizaron muestreos gravimétricos de 8 horas en distintos contextos del estado de Querétaro, incluyendo zonas de referencia (urbana y rural) y zonas directamente relacionadas con procesos de trituración de materiales pétreos, tanto reciclados como naturales.

Las mediciones de referencia se realizaron en una zona urbana (Universidad Autónoma de Querétaro) y una zona rural (Amealco de Bonfil), con el objetivo de establecer condiciones base de calidad del aire. Sin embargo, el análisis principal de este estudio se centra en la comparación entre la planta de reciclaje REURBA y un banco de materiales naturales denominado “La Luz”, debido a su relación directa con la producción de materiales para bases hidráulicas.

Cada sitio fue monitoreado durante jornadas de 8 horas, considerando un caudal constante de $2.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, lo que corresponde a un volumen total de 2.88 m^3 de aire por muestreo. Los filtros fueron pesados antes y después de cada jornada mediante una micro balanza analítica con resolución de 0.01 mg .



Fig 23. Equipo para la medición de partículas.

Tabla 7. Resultados del muestreo de material particulado

Sitio / Jornada	Peso inicial (mg)	Peso final (mg)	Δ masa (mg)	Concentración 8 h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Equivalente 24 h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Querétaro (urbano)	74.800	74.831	0.031	32.3	10.7
Querétaro (urbano)	75.000	75.034	0.034	35.4	11.8
Querétaro (urbano)	73.500	73.533	0.033	34.4	11.5
Promedio Querétaro	—	—	—	34.0	11.3
Amealco (rural)	77.700	77.714	0.014	14.6	4.9
Amealco (rural)	74.300	74.316	0.016	16.7	5.6
Amealco (rural)	75.600	75.615	0.015	15.6	5.2
Promedio Amealco	—	—	—	15.6	5.2
Trituradora REURBA (reciclado)	71.600	72.800	1.200	1250	416.7
Trituradora Banco La Luz (natural)	70.500	71.950	1.450	1510	503.3

Tabla 8. Comparación entre banco natural y de RCD

Sitio	Promedio 8 h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Equivalente 24 h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tipo
Trituradora REURBA	1250	416.7	Material reciclado
Banco La Luz	1510	503.3	Material natural

Para contextualizar los valores obtenidos en campo, se realizó una comparación con estudios internacionales sobre emisiones de material particulado en procesos de trituración. Diversas investigaciones reportan concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ en rangos que van desde cientos hasta miles de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en zonas cercanas a trituradoras, dependiendo de las condiciones de operación, control de polvo y distancia de medición (EPA, 1995; Kumar et al., 2014; Chaulya, 2004).

Los valores obtenidos en este estudio ($1250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en REURBA y $1510 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en La Luz) se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura, lo que indica que las emisiones registradas son consistentes con procesos industriales similares.

Tabla 9. Comparación con estudios de trituradoras

Estudio	Distancia	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Fuente
Industria de trituración (EE.UU.)	—	variable (hasta miles $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EPA (1995)
Industria trituradora (India)	50 m	200–1500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Kumar et al. (2014)
Zona industrial con trituradoras	—	hasta 1400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Chaulya (2004)
REURBA (este estudio)	~20 m	1250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Elaboración propia
La Luz (este estudio)	~20 m	1510 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Elaboración propia

Marco normativo

De acuerdo con la **NOM-025-SSA1-2021**, el límite permisible para partículas $\text{PM}_{2.5}$ es:

- **45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio de 24 horas**

A continuación, se presenta la comparación con los valores obtenidos:

Sitio	Promedio 24 h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Límite NOM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Cumplimiento
Querétaro (urbano)	11.3	45	Cumple
Amealco (rural)	5.2	45	Cumple
Trituradora REURBA	416.7	45	No aplicable (fuente puntual)
Trituradora La Luz	503.3	45	No aplicable (fuente puntual)

Es importante señalar que esta norma aplica a aire ambiente en zonas de exposición poblacional, por lo que los valores registrados en proximidad a fuentes de emisión industrial no representan necesariamente un incumplimiento normativo, sino condiciones propias de operación.

Análisis e interpretación de resultados

Los resultados obtenidos evidencian que los procesos de trituración, tanto de materiales reciclados como naturales, generan concentraciones elevadas de partículas $PM_{2.5}$ en zonas cercanas a la fuente emisora.

La comparación directa entre la planta REURBA y el banco “La Luz” muestra que este último presenta concentraciones ligeramente mayores. Esta diferencia puede atribuirse a diversos factores asociados a las características del material y al proceso de trituración. En el caso del banco natural, la trituración de roca virgen implica una mayor energía de fractura y una menor presencia de humedad, lo que favorece la generación y dispersión de partículas finas en el aire.

Por otro lado, el material procesado en REURBA proviene principalmente de excavaciones, el cual presenta una granulometría más heterogénea y, en algunos casos, mayor contenido de humedad, lo que contribuye a una ligera reducción en la emisión de partículas durante su procesamiento.

Al comparar estos resultados con la literatura, se observa que ambas mediciones se encuentran dentro de los rangos típicos reportados para actividades de trituración. Diversos estudios internacionales indican que las concentraciones de partículas $PM_{2.5}$ pueden variar desde cientos hasta miles de $\mu g/m^3$ en zonas cercanas a trituradoras, dependiendo de factores como la distancia a la fuente, las condiciones de operación y la implementación de medidas de control de polvo (EPA, 1995; Kumar et al., 2014; Chauhya, 2004).

En este sentido, el valor obtenido en el banco “La Luz” ($1510 \mu g/m^3$) y el registrado en la planta REURBA ($1250 \mu g/m^3$) se encuentran dentro del mismo orden de magnitud reportado en la literatura, lo que confirma la consistencia y validez de los resultados obtenidos en campo.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten establecer que, aunque los procesos de trituración generan concentraciones elevadas de material particulado en zonas

cercanas a la fuente, el uso de materiales reciclados no incrementa significativamente las emisiones en comparación con materiales naturales. No obstante, su principal ventaja radica en la reducción del impacto ambiental asociado a la extracción de recursos vírgenes, lo que refuerza su viabilidad dentro de un enfoque de economía circular.

12. ANÁLISIS ECONÓMICO

El presente capítulo tiene como objetivo analizar los costos asociados al uso de materiales pétreos en la construcción de bases hidráulicas para pavimentos, considerando tanto materiales de origen natural como materiales reciclados provenientes de residuos de construcción y excavación.

A diferencia de lo planteado comúnmente en la literatura, donde se asume que los materiales reciclados representan una alternativa de menor costo, la información obtenida en campo mediante entrevista con el responsable técnico de la planta de reciclaje REURBA, el Arq. Roberto Ledezma (2025), indica que no existe una diferencia económica significativa entre ambos materiales, manteniéndose costos comerciales prácticamente equivalentes.

Componentes del costo de una base hidráulica

El costo total de una base hidráulica se integra por diversos componentes, entre los que destacan:

- Extracción o acopio del material
- Procesamiento (trituración, cribado y clasificación)
- Transporte al sitio de obra
- Operación en campo (extendido, nivelación y compactación)
- Costos indirectos (administración, control de calidad y maquinaria)

Estos componentes son aplicables tanto para materiales naturales como reciclados, lo cual explica en gran medida la similitud en sus costos finales.

Costos del material natural

En el caso de los materiales naturales, el proceso inicia con la extracción en bancos pétreos, seguido de trituración, cribado, clasificación granulométrica, acopio y transporte a obra. Este proceso implica el uso intensivo de maquinaria pesada, consumo de combustible, mantenimiento y mano de obra especializada.

Adicionalmente, el transporte representa uno de los factores más influyentes en el costo final, dependiendo de la distancia entre el banco y el sitio de aplicación.

Costos del material reciclado (REURBA)

En el caso del material reciclado, el proceso productivo presenta una estructura similar en términos operativos. De acuerdo con la información obtenida, el sitio de REURBA funciona actualmente como un banco de tiro y planta de aprovechamiento de materiales provenientes principalmente de excavaciones.

El proceso se desarrolla de la siguiente manera:

Inicialmente, el material producto de excavaciones es transportado al sitio, donde se deposita. En una primera etapa, se realiza la separación de partículas de gran tamaño. Posteriormente, el material restante pasa por un proceso de cribado para obtener fracciones finas. Las partículas de mayor tamaño son sometidas a trituración y, en algunos casos, a una segunda trituración para cumplir con la granulometría requerida. Finalmente, el material se clasifica mediante cribas más cerradas para obtener productos como base hidráulica, arena, grava y otros subproductos.

Cabe destacar que, debido a que el material proviene principalmente de excavaciones, éste presenta una baja cantidad de impurezas, lo que reduce la necesidad de procesos complejos de limpieza. Sin embargo, el proceso sigue requiriendo maquinaria, consumo energético, mantenimiento y mano de obra, similares a los del material natural.

Estructura tipo **APU formal (estilo SICT)**

A continuación, se presenta el análisis de precios unitarios (APU) para la construcción de una base hidráulica utilizando material natural, considerando criterios de la SICT y condiciones típicas de obra.

BASE HIDRÁULICA CON MATERIAL NATURAL (APU FORMAL)

◇ Supuestos técnicos

- Factor de abundamiento: **1.25 m³ suelto = 1 m³ compactado**
- Distancias:
 - Banco → planta: **1 km**
 - Planta → obra: **5 km**
- Costos basados en:
 - Tabuladores de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT)
 - Manuales de costos unitarios en México

Concepto	Unidad	Cantidad	P.U. (MXN)	Importe (MXN)
1. Extracción en banco	m ³	1.25	100	125
2. Carga y acarreo corto (1 km)	m ³	1.25	25	31.25
3. Trituración y cribado	m ³	1.25	140	175
4. Transporte planta → obra (5 km)	m ³	1.25	70	87.50
5. Material base (valor comercial)	m ³	1.25	350	437.50
6. Tendido y conformación	m ³	1.00	80	80
7. Compactación	m ³	1.00	70	70
8. Control de calidad	m ³	1.00	25	25

TOTAL:

\$1,030.25 MXN/m³

Se presenta el análisis de precios unitarios para el uso de material reciclado,

considerando los procesos adicionales de manejo, selección y trituración del material.

BASE CON MATERIAL RECICLADO (RCD) – APU FORMAL

◇ Supuestos técnicos

- Factor de abundamiento: **1.25**
- Distancias:
 - RCD → planta: **5 km**
 - Planta → obra: **5 km**
- Se elimina extracción, pero se agregan procesos de manejo

Concepto	Unidad	Cantidad	P.U. (MXN)	Importe (MXN)
1. Adquisición RCD (bajo costo)	m ³	1.25	50	62.50
2. Transporte RCD → planta (5 km)	m ³	1.25	70	87.50
3. Separación y limpieza	m ³	1.25	80	100
4. Trituración RCD	m ³	1.25	130	162.50
5. Transporte planta → obra (5 km)	m ³	1.25	70	87.50
6. Tendido y conformación	m ³	1.00	80	80
7. Compactación	m ³	1.00	70	70
8. Control de calidad	m ³	1.00	25	25

TOTAL, DIRECTO:

\$675.00 MXN/m³

Ajuste realista (operación en planta)

En campo:

- hay pérdidas
- menor eficiencia en clasificación
- variabilidad del material

Se aplica un factor de ajuste típico en reciclados: **1.3 – 1.5**

El factor de ajuste de 1.3 a 1.5 aplicado al costo del material reciclado no proviene de un tabulador único, sino de criterios utilizados en la práctica de análisis de precios unitarios y de la literatura técnica sobre agregados reciclados, donde se documenta una menor eficiencia operativa, pérdidas de material y la necesidad de procesos adicionales de selección. Estos factores generan incrementos en el costo real respecto al costo teórico, típicamente en un rango del 20% al 50%.

Costo ajustado:

- Mínimo: **\$877.50 MXN/m³**
- Máximo: **\$1,012.50 MXN/m³**

Comparación de costos

En la Tabla X se presenta la comparación entre los costos de base hidráulica con material natural y material reciclado.

Concepto	Base natural	Base reciclada
Extracción	\$125	\$0
Transporte total	\$118.75	\$175
Procesamiento	\$175	\$262.5
Material	\$437.5	\$62.5
Colocación	\$175	\$175
TOTAL	\$1,030	\$877 – \$1,012

El análisis de precios unitarios, desarrollado con base en criterios de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT), indica que la base hidráulica convencional presenta un costo aproximado de \$1,030 MXN por metro cúbico compactado. Por su parte, el uso de residuos de construcción y demolición (RCD) muestra un costo directo menor; sin embargo, al considerar factores operativos como pérdidas de material, variabilidad en la calidad y procesos adicionales de selección, el costo final se ajusta a un rango de \$877 a \$1,012 MXN por metro cúbico.

Estos resultados demuestran que la eliminación de la etapa de extracción en el material reciclado es compensada por los costos asociados al transporte inicial y procesamiento, resultando en costos finales similares entre ambas alternativas.

Comparación económica entre material reciclado y natural

A partir del análisis realizado, se establece que:

- El proceso de producción del material reciclado es técnicamente equivalente al del material natural en términos de trituración, cribado y clasificación.
- El costo de transporte se mantiene como un factor determinante en ambos casos.
- Los costos de operación y procesamiento compensan la ausencia de extracción en el caso del material reciclado.

Por lo tanto, el costo final por metro cúbico de material reciclado resulta prácticamente igual al del material natural, sin representar un ahorro económico directo.

Beneficios económicos indirectos del material reciclado

Aunque no se identifican ventajas económicas directas, el uso de materiales reciclados genera beneficios indirectos relevantes, tales como:

- Reducción en costos asociados a la disposición final de residuos de construcción
- Disminución del impacto ambiental por la extracción de materiales vírgenes
- Aprovechamiento de materiales provenientes de excavaciones
- Cumplimiento de normativas relacionadas con la gestión de residuos en la construcción

Adicionalmente, se identificó que actualmente existe una limitada integración del ciclo de aprovechamiento por parte de algunas empresas constructoras, las cuales se limitan a disponer sus residuos en este tipo de plantas, sin reincorporar los materiales reciclados en sus propios procesos constructivos. Esta falta de seguimiento limita los beneficios potenciales del reciclaje en términos económicos y ambientales.

Consideraciones finales

En el contexto del presente estudio, se concluye que la viabilidad del uso de materiales reciclados en bases hidráulicas no radica en una reducción del costo directo, sino en sus beneficios ambientales y en su contribución a un modelo de economía circular.

Asimismo, se identifica que el principal reto no es técnico ni económico, sino de adopción y concientización por parte de los actores del sector construcción, quienes deben fomentar el uso de materiales reciclados para maximizar su aprovechamiento y reducir el impacto ambiental asociado a la actividad constructiva.

13. Modelo de Optimización Espacial para Sitios de Procesamiento de RCD

La ejecución del modelo de optimización espacial arrojó un mapa de calor que clasifica el territorio del municipio de Querétaro según su índice de aptitud para el reciclaje de RCD.

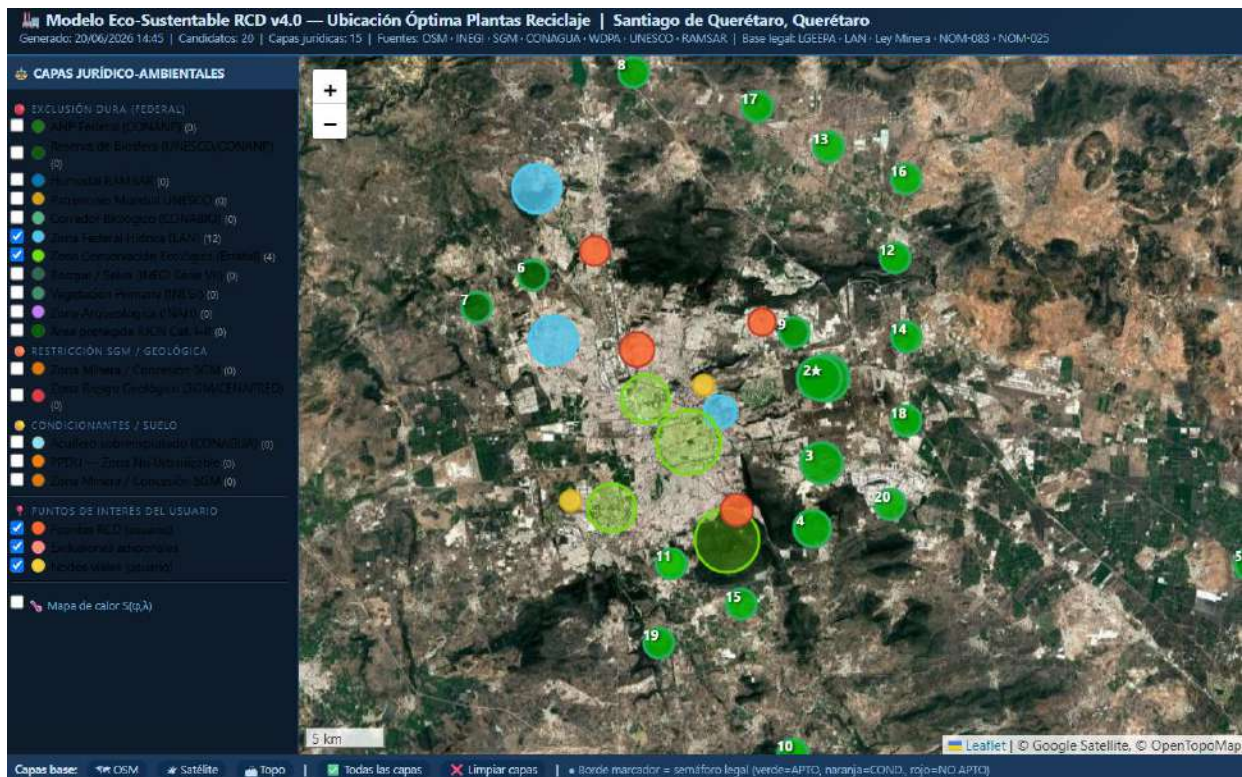


Fig. 24. Mapa de aptitud territorial para el procesamiento de RCD en Querétaro generado mediante el algoritmo de optimización espacial.

El análisis geoespacial confirma la viabilidad de implementar estrategias de co-ubicación industrial. El algoritmo evaluó de manera prioritaria los 9 bancos de material y sitios preexistentes ingresados en la interfaz de usuario. Al cruzar las coordenadas de estos sitios con las zonas de exclusión ambiental y los polos de generación de residuos, se estructuró el ranking de viabilidad.

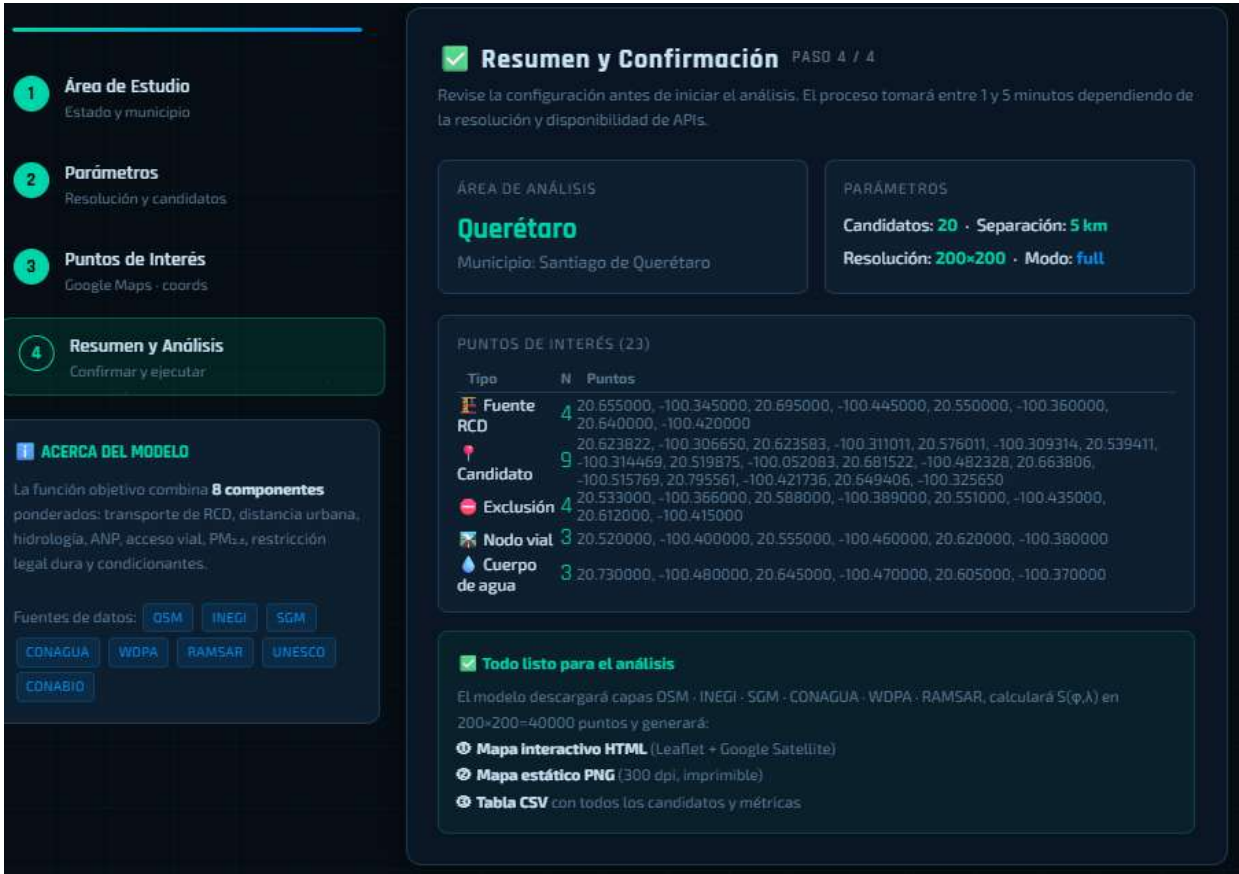


Fig. 25. Resumen y Análisis de los parámetros, candidatos y puntos de interés considerados

Los resultados demuestran que sitios operativos como REURBA no solo cuentan con un material mecánicamente competente, sino que espacialmente se ubican en zonas estratégicas que minimizan el impacto ambiental por transporte y evitan la vulneración de reservas ecológicas o mantos acuíferos.

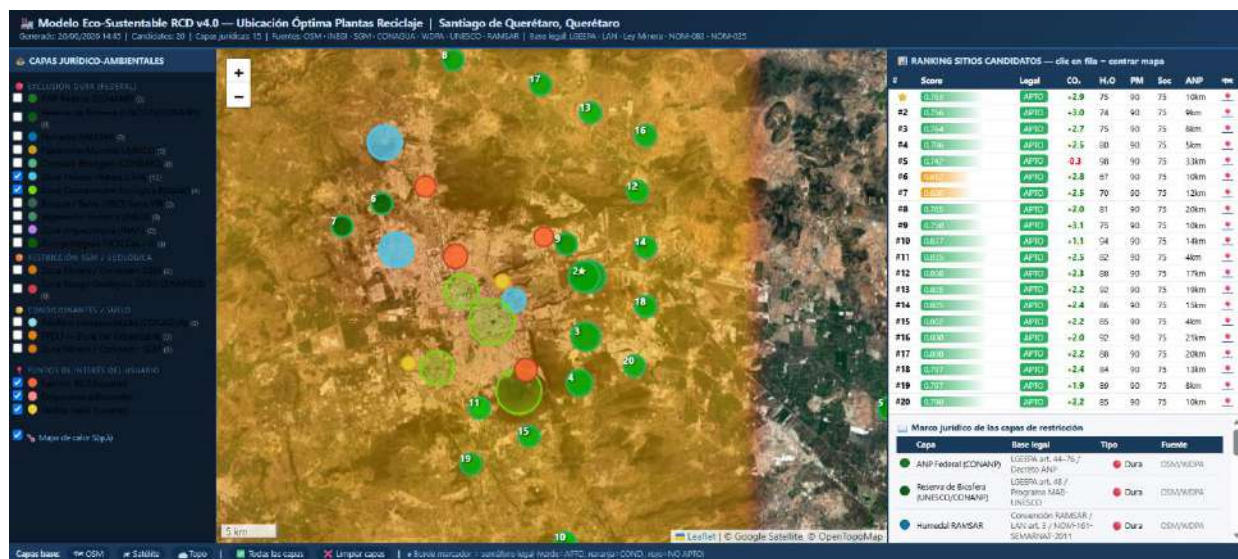


Fig. 26. Ranking de los sitios candidatos competentes arrojados por el programa, (Banco REURBA clasificado como el numero 9).

X. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten analizar de manera integral el comportamiento mecánico, hidráulico y ambiental de los materiales evaluados, considerando tanto agregados naturales como materiales reciclados provenientes de residuos de construcción y excavación.

Desde el punto de vista geotécnico, los tres bancos de materiales presentan propiedades adecuadas para su uso en capas estructurales de pavimentos, particularmente en subbases y bases hidráulicas. Los valores de CBR obtenidos en todos los casos superan ampliamente el valor mínimo del 80 % establecido por la normativa, lo que confirma su alta capacidad portante.

Las diferencias observadas en la granulometría influyen directamente en el comportamiento mecánico. El material proveniente de REURBA, al presentar una curva bien graduada, mostró una mayor estabilidad y consistencia en los resultados, así como una mejor respuesta a la compactación. En contraste, el material del banco La Luz, con menor contenido de finos, presentó mayor variabilidad en los resultados, lo que sugiere una mayor sensibilidad a las condiciones de compactación y al contenido de humedad.

Uno de los hallazgos más relevantes del estudio es la relación no lineal entre el contenido de humedad y la resistencia del material. A partir de los ensayos Proctor y CBR, se identificó que la humedad que maximiza la capacidad portante no coincide con la humedad óptima de compactación. Este comportamiento se observó de manera consistente en los tres bancos, donde la resistencia máxima se alcanzó en rangos específicos de humedad distintos al valor de densidad máxima.

Este resultado tiene implicaciones importantes en campo, ya que demuestra que el control del contenido de humedad no debe basarse únicamente en criterios de compactación, sino también en el desempeño mecánico del material.

10.1 Caracterización granulométrica de los materiales

Los resultados del análisis granulométrico permiten identificar diferencias claras entre los tres bancos de materiales evaluados, las cuales influyen directamente en su comportamiento mecánico.

El material proveniente de REURBA presenta una curva bien graduada, con una distribución equilibrada de tamaños de partícula y un contenido de finos menor al 20 %, condición que favorece el empaquetamiento granular y mejora la respuesta a la compactación.

Por su parte, el material del banco AGC (La Cañada) muestra una menor presencia de fracciones intermedias, lo que genera una estructura ligeramente menos estable y requiere mayor control durante el proceso de compactación.

En el caso del banco La Luz, se observa una granulometría más gruesa y un menor contenido de finos, lo cual favorece el drenaje interno del material, aunque puede generar menor cohesión entre partículas y mayor dependencia de la energía de compactación aplicada.

En conjunto, los tres materiales presentan características compatibles con su uso en capas granulares de pavimentos, aunque con comportamientos diferenciados asociados a su distribución granulométrica.

10.2 Propiedades de plasticidad y limpieza del material

Los resultados de los ensayos de límites de Atterberg indican que el material evaluado presenta un límite líquido inferior al 25 %, lo que lo clasifica como de baja plasticidad y comportamiento predominantemente granular.

Estos resultados son consistentes con los obtenidos en el ensayo de equivalente de arena, donde se registraron valores superiores al mínimo normativo del 40 %, tanto antes como después de la compactación.

En conjunto, estos resultados evidencian que el material presenta una fracción fina limpia, con baja presencia de arcillas activas, lo que favorece su estabilidad volumétrica y reduce la susceptibilidad a cambios de humedad.

10.3 Compactación y resistencia (Proctor y CBR)

El análisis conjunto de los ensayos Proctor y CBR permite identificar una relación no lineal entre el contenido de humedad y la resistencia del material.

Para el material de REURBA, la densidad máxima seca se alcanzó aproximadamente a una humedad del 14 %, mientras que la máxima capacidad portante se presentó en valores de humedad cercanos al 8 %, evidenciando una diferencia entre ambos parámetros.

En términos comparativos, los valores de CBR muestran que el material de REURBA presentó los resultados más altos y consistentes, seguido del material del banco AGC (La Cañada), mientras que el material de La Luz presentó una mayor dispersión, indicando mayor sensibilidad a las condiciones de compactación.

Todos los materiales superan ampliamente el valor mínimo requerido por la normativa, lo que confirma su alta capacidad estructural para su uso en pavimentos.

10.4 Forma de partículas

Los resultados del ensayo de lajeo y alargamiento indican que los materiales presentan valores dentro de los límites aceptables para su uso en capas granulares.

El valor conjunto cercano al 50 % sugiere que, aunque existe presencia de partículas con geometría no cúbica, estas no predominan al grado de afectar negativamente la compactación o la transmisión de esfuerzos.

En este sentido, la geometría de las partículas se considera adecuada para su aplicación en bases hidráulicas.

10.5 Permeabilidad

Los coeficientes de permeabilidad obtenidos, del orden de 10^{-3} a 10^{-2} cm/s, indican que los materiales evaluados presentan un comportamiento típico de materiales granulares con buena capacidad de drenaje.

Esta característica resulta favorable para su uso en bases hidráulicas, ya que permite la evacuación del agua infiltrada y reduce el riesgo de pérdida de capacidad estructural por saturación.

10.6 Modelo de optimización espacial para plantas de reciclaje

La integración del modelo computacional de optimización espacial permite escalar los hallazgos de laboratorio a una propuesta de gestión territorial integral, transitando de un análisis de sitios aislados hacia la conceptualización de una red de infraestructura descentralizada. La caracterización geotécnica demostró que los RCD tratados pueden alcanzar especificaciones estructurales rigurosas —tales como el 100% de grado de compactación requerido en capas de bases de pavimento—. Sin embargo, la viabilidad operativa, económica y sustentable de incorporar estos materiales en las vías terrestres depende directamente de la distancia de acarreo entre los centros de generación y los puntos de procesamiento.

El modelo espacial demuestra que depender exclusivamente de los bancos de material existentes limita la eficiencia del sistema. En cambio, al articular estratégicamente la infraestructura preexistente (como el sitio REURBA) con las nuevas propuestas de nodos de procesamiento identificadas por el algoritmo, se establece una red de cobertura regional. Esta configuración en red garantiza que, independientemente de la zona del municipio de Querétaro donde se produzcan los excedentes o demoliciones de concreto, exista una alternativa cercana de recolección y tratamiento. Como resultado, se mitigan de forma drástica los costos logísticos del transporte de carga pesada y se reduce la huella de carbono asociada a los traslados de grandes distancias, validando que el reciclaje de RCD es viable tanto en su comportamiento mecánico como en su distribución territorial.

10.7 Análisis de calidad del aire (PM_{2.5})

Los resultados del análisis de partículas PM_{2.5} evidencian que los procesos de trituración constituyen una fuente importante de emisión de material particulado fino.

La comparación entre materiales reciclados y naturales muestra que no existen diferencias significativas en la generación de partículas, aunque los materiales naturales pueden presentar concentraciones ligeramente mayores.

Los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura internacional para este tipo de procesos, lo que valida los resultados obtenidos.

Si bien las concentraciones registradas superan los límites establecidos para aire ambiente, estas corresponden a condiciones propias de operación industrial y no representan directamente condiciones de exposición poblacional.

10.8 Análisis de ciclo de vida (ACV)

El análisis de ciclo de vida permitió identificar diferencias significativas en la huella de carbono asociada a cada alternativa de material.

Los resultados muestran que el uso de materiales reciclados reduce de manera importante las emisiones de CO₂-eq en comparación con los materiales naturales, alcanzando reducciones superiores al 60 % en escenarios optimizados.

Esta disminución se asocia principalmente a la reducción en la extracción de materiales vírgenes, así como a la optimización en los procesos de transporte y procesamiento.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que el uso de materiales reciclados representa una alternativa técnicamente viable y ambientalmente favorable para la construcción de bases hidráulicas en infraestructura vial.

Con la finalidad de consolidar los hallazgos obtenidos en las evaluaciones técnica, económica y ambiental, se presenta un análisis integral que supera la visión aislada de los ensayos de laboratorio tradicionales. La viabilidad real del uso de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) como base hidráulica en pavimentos depende por completo de la interdependencia entre su comportamiento mecánico, el impacto ecológico generado durante su ciclo de vida y los costos asociados a su procesamiento y puesta en obra. Entender el material desde un solo eje resultaría insuficiente para el diseño de infraestructura sustentable. Por lo tanto, en la **Tabla X.X** se estructuran de manera sintética las interacciones clave que vinculan estas tres dimensiones esenciales de la investigación, permitiendo correlacionar las propiedades del material con sus efectos globales.

Tabla 10. Matriz de interacción entre las diferentes propiedades a evaluar.

Propiedad Evaluada	Interacción Técnica (Desempeño)	Interacción Ambiental (Impacto / ACV)	Interacción Económica (Costos)
Físicas: Granulometría y Límites de Atterberg	Define la trabajabilidad y el esqueleto mineral del material. REURBA mostró un comportamiento estable sin plasticidad excesiva.	Las partículas finas están directamente relacionadas con la emisión de PM _{2.5} durante la trituración, carga y acarreo.	Impacta en los costos de trituración (procesamiento) para alcanzar los tamaños máximos normativos (\$262.5 MXN/m ³ para RCD).
Volumétricas:	Determina la energía de compactación	Dicta el volumen de agua requerido para	Afecta los precios unitarios por el

Humedad Óptima y Peso Volumétrico	necesaria para alcanzar la densidad máxima (100% de compactación en obra).	estabilizar la base, un recurso crítico en el análisis de ciclo de vida.	arrendamiento de pipas de agua y horas-máquina de los rodillos compactadores.
Mecánicas: Resistencia (CBR) y Desgaste (Abrasión)	Garantiza la capacidad de soporte de carga bajo tráfico. Los RCD superaron los estándares normativos (CBR alto).	Una mayor resistencia estructural prolonga la vida útil del pavimento, reduciendo mantenimientos futuros y la huella de carbono a largo plazo.	Minimiza los costos de ciclo de vida (LCC) al evitar fallas prematuras por fatiga o deformación en la carpeta asfáltica.

Como se observa en la matriz de interacciones anterior, existe una correlación directa y medible entre las propiedades físicas del residuo reciclado y las variables macroeconómicas y ambientales del proyecto vial. Por ejemplo, la optimización de la granulometría y el control estricto de la humedad óptima no solo garantizan el cumplimiento normativo de densificación en obra, sino que regulan directamente el consumo de recursos hidráulicos y los tiempos de operación de la maquinaria pesada, incidiendo de forma directa en los precios unitarios de procesamiento y colocación.

Asimismo, el sobresaliente desempeño mecánico registrado (reflejado en los elevados valores de CBR obtenidos para el material de REURBA) asegura una alta capacidad de soporte estructural que prolonga la vida útil del estrato. Desde la perspectiva del análisis de ciclo de vida (ACV), esta durabilidad minimiza las intervenciones por mantenimiento preventivo o correctivo a largo plazo, lo que reduce sustancialmente tanto los costos del ciclo de vida (LCC) como la acumulación de emisiones de gases de efecto invernadero.

Finalmente, la presencia de fracciones finas generadas durante la trituration secundaria del concreto reciclado plantea un desafío técnico-ambiental relacionado con las emisiones de material particulado (PM2.5); sin embargo, el costo de mitigación ambiental mediante el riego y control de polvos se compensa con creces al eliminar los costos de extracción de bancos naturales y mitigar el impacto por disposición inadecuada en ecosistemas locales. Este enfoque interaccional demuestra que la adopción de bases hidráulicas recicladas constituye una alternativa técnicamente

sólida, económicamente competitiva y ambientalmente superior, alineada con los objetivos de la economía circular en la infraestructura del transporte.

XI. CONCLUSION

El presente estudio evaluó de manera integral el comportamiento mecánico, hidráulico, ambiental y económico de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) provenientes de REURBA en comparación con bancos naturales, confirmando que el material reciclado es técnica, ambiental y operativamente viable para la construcción de bases hidráulicas en infraestructura vial bajo la norma N-CMT-4-02-002/22.

Desde el punto de vista mecánico, el material alcanzó un valor soporte California (CBR) máximo de 172.41 %, superando el mínimo requerido del 80 %, y una pérdida por abrasión Los Ángeles de 27.47 %, manteniéndose dentro del límite máximo del 30 %. Una aportación significativa de esta investigación fue determinar que la humedad que maximiza la capacidad portante no coincide con la humedad óptima de compactación (Proctor); mientras que la densidad máxima se alcanza cerca del 14 % de humedad, la mayor capacidad portante (trabazón mecánica) se obtiene en un rango estricto del 9 % al 11 %, factor crítico para la ejecución en campo.

Los ensayos complementarios validaron esta estabilidad: los límites de Atterberg confirmaron un material no plástico, el equivalente de arena y el índice de forma aseguraron una adecuada limpieza y geometría de partículas, y las pruebas de permeabilidad garantizaron la capacidad de drenaje necesaria.

Se demostró que la gestión eficiente de los RCD en el municipio de Querétaro no debe depender de centros de procesamiento aislados, sino de la consolidación de una red de infraestructura descentralizada que integre tanto los bancos de extracción existentes como nuevas propuestas espaciales estratégicas. La programación del modelo de análisis multicriterio permitió comprobar que una distribución nodal optimiza la logística de recolección en función de la proximidad geográfica con las fuentes de generación de residuos (zonas de desarrollo urbano). Esta red descentralizada garantiza alternativas de procesamiento accesibles en toda la región, reduciendo de

manera simultánea los costos operativos de transporte y el impacto ambiental por emisiones contaminantes derivados del acarreo a grandes distancias, consolidando una solución integral y sustentable para la infraestructura vial local.

En la dimensión ambiental, el Análisis de Ciclo de Vida demostró que el uso de RCD permite una reducción del 65.1 % en la huella de carbono (6.77 kg CO₂-eq por tonelada vs. 19.4 kg CO₂-eq del material natural), mientras que la generación de partículas PM_{2.5} durante la trituración fue de 1,250 µg/m³, un 17.2 % menor que la reportada para la roca virgen (1,510 µg/m³), cumpliendo con los estándares de la EPA.

Económicamente, aunque el costo de procesamiento y colocación del RCD (\$877.00 - \$1,012.00 MXN/m³) es competitivo frente al material natural (\$1,030.00 MXN/m³), la ventaja real radica en la rentabilidad macroeconómica al evitar la apertura de bancos de préstamo y reducir la disposición en rellenos sanitarios.

En conjunto, estos resultados respaldan el uso de materiales reciclados como una alternativa alineada con los principios de economía circular, ofreciendo una solución técnica robusta, ambientalmente superior y económicamente justificada para la infraestructura vial moderna.

PRODUCTOS DERIVADOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN Y ACTIVIDADES ACADÉMICAS

Como resultado del desarrollo de la presente investigación y en cumplimiento con la formación integral del programa de Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad, se han generado los siguientes productos académicos, de investigación y de vinculación social:

1. Publicaciones y Artículos Científicos

- **Miranda Sánchez, C., & Chávez Alegría, O. (2025).** "Evaluación Mecánica e Hidráulica de Bases Granulares para Pavimentos en México". *Congreso Internacional de Investigación Academia Journals CDMX 2025*. Publicado en la base de datos EBSCOHOST y portal *AcademiaJournals.com* (ISSN 1946-5351, Vol. 17, No. 06).
- **Miranda Sánchez, C., Chávez Alegría, O., & Miranda Sánchez, B. (2025).** "Evaluación sustentable de residuos de construcción como material para bases de pavimentos". *XIX Coloquio de Posgrado de la Facultad de Ingeniería*, Universidad Autónoma de Querétaro. (Artículo presentado como autor principal).
- **Miranda Sánchez, B., Chávez Alegría, O., & Miranda Sánchez, C. (2025).** "Predicción de zonas críticas mediante análisis numérico en muro de contención reforzado y beneficios ecológicos". *XIX Coloquio de Posgrado de la Facultad de Ingeniería*, Universidad Autónoma de Querétaro. (Participación como coautor).

2. Estancias Académicas y Profesionales

- **Movilidad Internacional:** Estancia de investigación en el Departamento de Ingeniería Ambiental de la **Universidad de Córdoba, Colombia** (diciembre 2025 - febrero 2026), bajo la tutela de la Mgtr. Viviana Soto Barrera, enfocada en la comparación de normativas internacionales de RCD entre México y Colombia.

- **Estancia Profesional:** Desarrollo de prácticas de investigación aplicada (150 horas) como parte de los requisitos curriculares del programa de posgrado, orientadas al análisis de proyectos de infraestructura y uso de herramientas tecnológicas en Vías Terrestres.

3. Participación en Congresos

- **Ponencia Virtual:** Presentación del artículo "Evaluación Mecánica e Hidráulica de Bases Granulares para Pavimentos en México" en el 5º Congreso Internacional de Investigación Academia Journals CDMX 2025 (octubre, 2025).

4. Retribución Social

- **Actividad de Divulgación:** Impartición de plática informativa y motivacional sobre la importancia de la Ingeniería Civil y el área de Vías Terrestres en la Escuela Preparatoria Oficial Núm. 136 (Ixtlahuaca, Estado de México, diciembre 2025), beneficiando a 141 estudiantes con el objetivo de fomentar la vocación científica y profesional.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agrela, F., Barbudo, A., Ramírez, A., Ayuso, J., Carvajal, M. D., & Jiménez, J. R. (2011). Construction of road sections using mixed recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 19(4), 379–388. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.004>
2. Araújo, M., et al. (2026). *Advances in Circular Valorization of Construction and Demolition Waste (CDW) Toward Low-Carbon and Resilient Construction: A Comprehensive Review*. Sustainability (MDPI), 18(6), 2759.
3. ASTM International. (2015a). *ASTM C127-15: Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate*. ASTM International.
4. ASTM International. (2015b). *ASTM C128-15: Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate*. ASTM International.
5. ASTM International. (2017). *ASTM D2487-17: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification*

- System). ASTM International.
6. ASTM International. (2019). *ASTM C136/C136M-19: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*. ASTM International.
 7. ASTM International. (2019). *ASTM D75/D75M-19: Standard practice for sampling aggregates*. ASTM International.
 8. ASTM International. (2013). *ASTM D1557-12: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort*. ASTM International.
 9. ASTM International. (2013). *ASTM D1883-13: Standard test method for California Bearing Ratio (CBR) of laboratory-compacted soils*. ASTM International.
 10. ASTM International. (2014). *ASTM D2419-14: Standard test method for sand equivalent value of soils and fine aggregate*. ASTM International.
 11. Behera, M., Bhattacharyya, S. K., Minocha, A. K., Deoliya, R., & Maiti, S. (2020). Recycled aggregate from C&D waste and its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, 68, 501–516.
 12. Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. (2023). *Costos de materiales y maquinaria en construcción*. México.
 13. Chaulya, S. K. (2004). *Air quality status of an industrial area: stone crusher units*. Environmental Monitoring and Assessment.
 14. Chen, X., et al. (2024). Advances in sustainable pavement materials and design. *Frontiers in Materials*.
 15. Delgado, J., & Ramírez, P. (2018). Reutilización de residuos de construcción en pavimentos. *Revista Ingeniería Civil*.
 16. El-Badawy, S. M., & Gabr, A. (2021). Mechanistic-empirical pavement design guide: Overview and applications. *Journal of Transportation Engineering*.
 17. European Commission. (2020). *Circular economy action plan*.
 18. European Environment Agency. (2020). *Construction and demolition waste management in Europe*.
 19. Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N., & Hultink, E. (2017). The circular economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.
 20. Gobierno de México. (2023). *Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011*.
 21. Gómez, L., & López, R. (2019). Análisis económico de materiales reciclados en pavimentos. *Revista de Ingeniería*.
 22. Gutiérrez, J., & García, M. (2019). Evaluación económica de materiales reciclados. *Revista Construcción*.
 23. Hernández, J., & López, R. (2020). Análisis de costos en la producción de agregados reciclados para infraestructura vial. *Revista de Ingeniería Civil*, 45(2), 55–67.
 24. Humam, A., et al. (2020). Waste management in construction projects. *Environmental Research*.
 25. INIFED. (2020). *Lineamientos para infraestructura educativa*.
 26. Instituto Mexicano del Transporte. (2018). *Manual de costos y producción de*

- agregados pétreos. Querétaro, México.
27. Islam, M., et al. (2023). Limitations of AASHTO pavement design methods. *Transportation Research Record*.
 28. Jiang, Y., et al. (2023). Water consumption in recycled aggregates. *Resources, Conservation & Recycling*.
 29. Jiménez, J. R., Ayuso, J., López, M., Fernández, J. M., & De Brito, J. (2013). Use of recycled aggregates in construction. *Construction and Building Materials*, 40, 159–168.
 30. Kumar, A., et al. (2014). Assessment of particulate matter emissions from stone crushing industry. *Atmospheric Environment*.
 31. McLanahan, S. (2024). Water use in aggregate production. *Journal of Environmental Engineering*.
 32. Medina, C. (2017). Recycled aggregates in construction: A review. *Construction and Building Materials*.
 33. Medina, C., et al. (2021). Environmental benefits of recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*.
 34. Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Agenda 2030 para el desarrollo sostenible*.
 35. Pacheco, M. (2019). *Evaluación técnica y económica del uso de residuos de construcción en pavimentos*. Universidad Nacional Autónoma de México.
 36. Pavement Interactive. (2023). *Mechanistic-empirical pavement design guide overview*.
 37. Pineda, G. R. (2020). *Diseño de pavimentos*.
 38. Poon, C. S., & Chan, D. (2006). Feasible use of recycled aggregates in construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 47(3), 281–293.
 39. Prakash, A., & Rathod, H. (2024). Sustainable pavement engineering. *Journal of Infrastructure Systems*.
 40. Rodríguez, A., et al. (2020). Propiedades mecánicas de agregados reciclados. *Revista Ingeniería Civil*.
 41. Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT). (2022). *N-CMT-4-02-002/22: Materiales para bases hidráulicas*.
 42. Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2024). *Tabulador de costos de maquinaria y análisis de precios unitarios*. Gobierno de México.
 43. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2003). *NOM-083-SEMARNAT-2003*.
 44. Secretaría de Salud. (2014). *Norma de calidad del aire para partículas PM_{2.5}*.
 45. Shah, A., et al. (2023). Sustainable usage of demolished concrete waste as a sub-base material in road pavement. *Frontiers in Sustainability*, 4, 1060878.
 46. Silva, R., de Brito, J., & Dhir, R. (2014). Properties and composition of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*.
 47. Silva, R., et al. (2017). Environmental impacts of recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*.
 48. U.S. Environmental Protection Agency. (1995). *AP-42: Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Section 11.19.2 Crushed Stone Processing and Pulverized Mineral Processing*.
 49. World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines*:

- Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀).*
50. Xing, W., et al. (2021). Transport impacts of recycled materials. *Sustainable Construction Materials*.

LITERATURA CITADA

- Agrela, F., Barbudo, A., Ramírez, A., et al. 2011. Construction of road sections using recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*.
- Asphalt Institute. *Thickness Design – Asphalt Pavements for Highways and Streets*.
- ASTM International. 2013–2019. Normas ASTM para caracterización de materiales.
- Behera, M., et al. 2020. Recycled aggregate in construction. *Construction and Building Materials*.
- Das, B. M. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Cengage Learning.
- Garber, N. J., & Hoel, L. A. (2015). *Traffic and Highway Engineering*. Cengage Learning
- Geissdoerfer, M., et al. 2017. Circular economy concept. *Journal of Cleaner Production*.
- Jiménez, J. R., et al. 2013. Use of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*.
- Medina, C. 2017. Recycled aggregates review. *Construction and Building Materials*.
- Poon, C. S., & Chan, D. 2006. Use of recycled aggregates. *Resources, Conservation and Recycling*.
- Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. 2022. Norma N-CMT-4-02-002/22.
- SEMARNAT. 2003. NOM-083-SEMARNAT-2003.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Wiley.

APENDICE

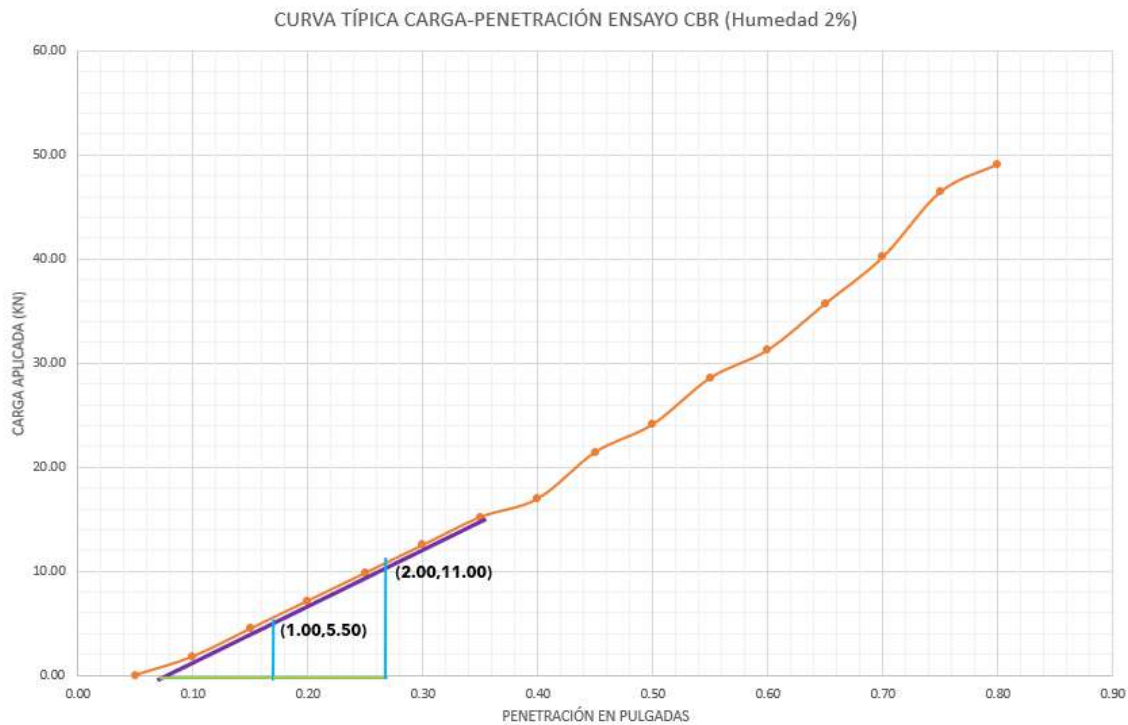
ABREVIATURAS DE EMPLEO COMUN EN ESPAÑOL

ACV – Análisis de Ciclo de Vida
AGC – Banco de materiales AGC
ASTM – American Society for Testing and Materials
CBR – California Bearing Ratio
CO₂e – Dióxido de carbono equivalente
GWP – Global Warming Potential (Potencial de calentamiento global)
INIFED – Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa
ISO – International Organization for Standardization
LGPGIR – Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
NACRCD – Norma Ambiental para el Control de Residuos de Construcción y Demolición
N-CMT-4-02-002/22 – Norma de materiales para bases y subbases hidráulicas
NOM – Norma Oficial Mexicana
ONU – Organización de las Naciones Unidas
PM10 – Partículas suspendidas menores a 10 micrómetros
PM2.5 – Partículas suspendidas menores a 2.5 micrómetros
RCD – Residuos de Construcción y Demolición
REURBA – Empresa recicladora de residuos de construcción (Querétaro)
SICT – Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes
SEMARNAT – Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SUCS (USCS) – Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
tCO₂e – Toneladas de dióxido de carbono equivalente

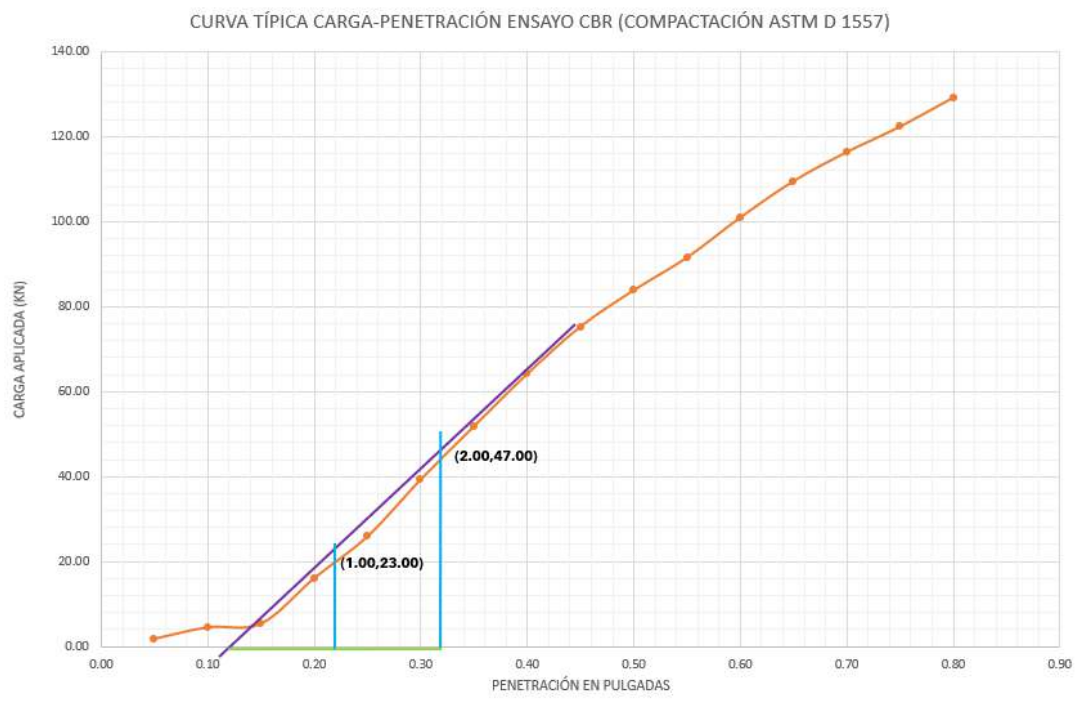
APENDICE

APENDICE 1

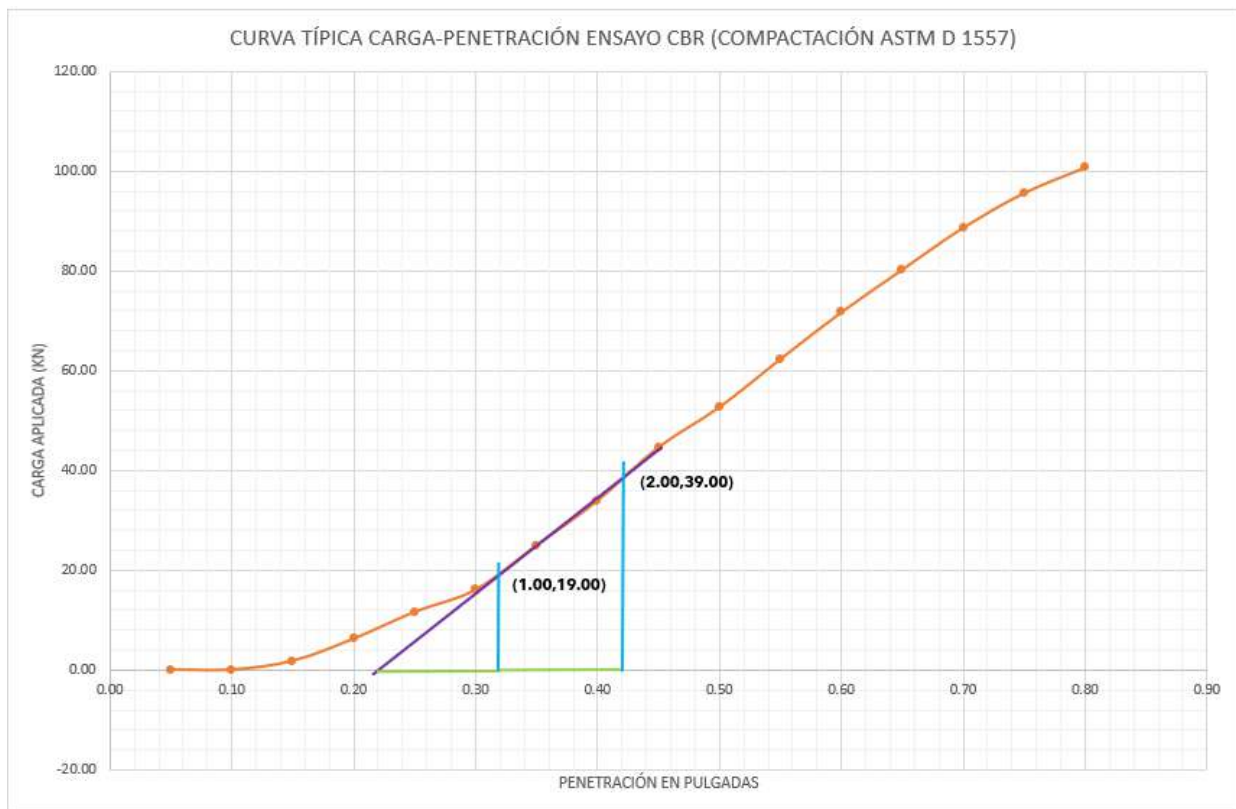
Curvas corregidas ensayo cbr banco “La Luz”



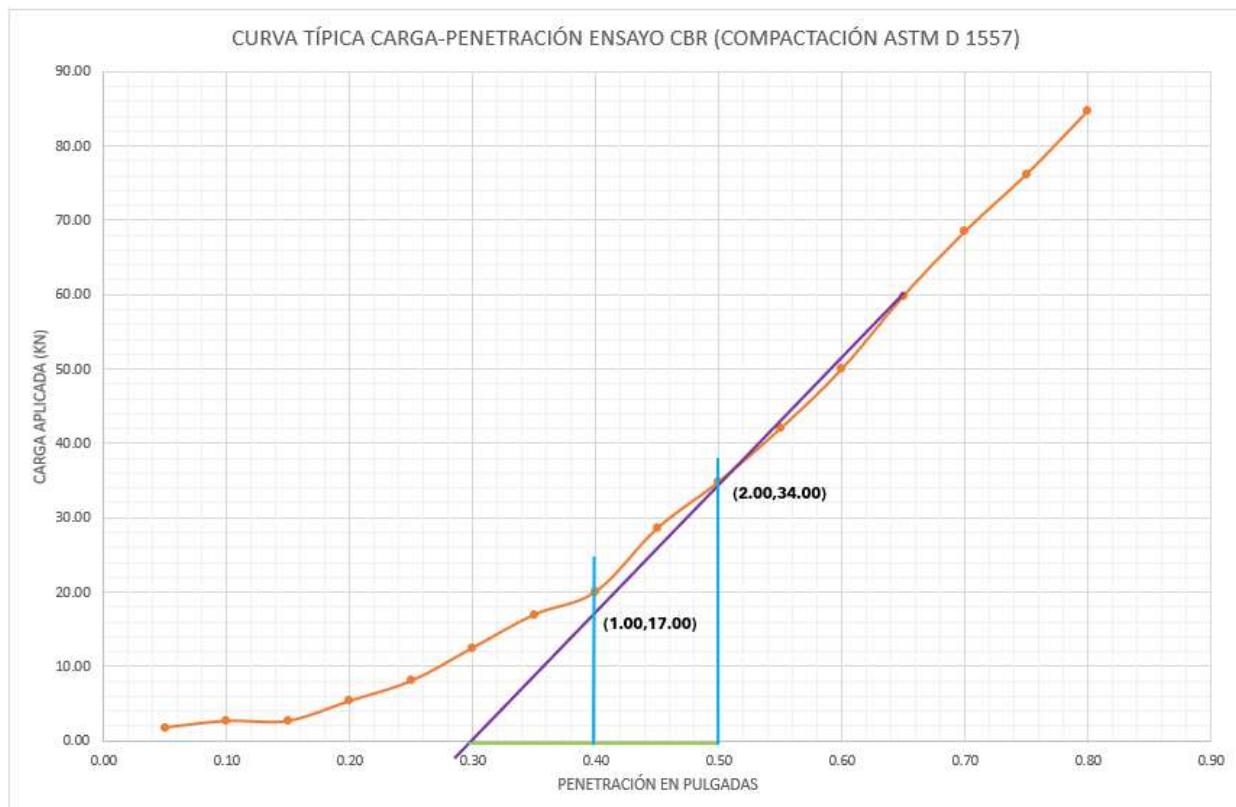
CURVA corregida TÍPICA CARGA-PENETRACIÓN ENSAYO CBR (Humedad 2%)



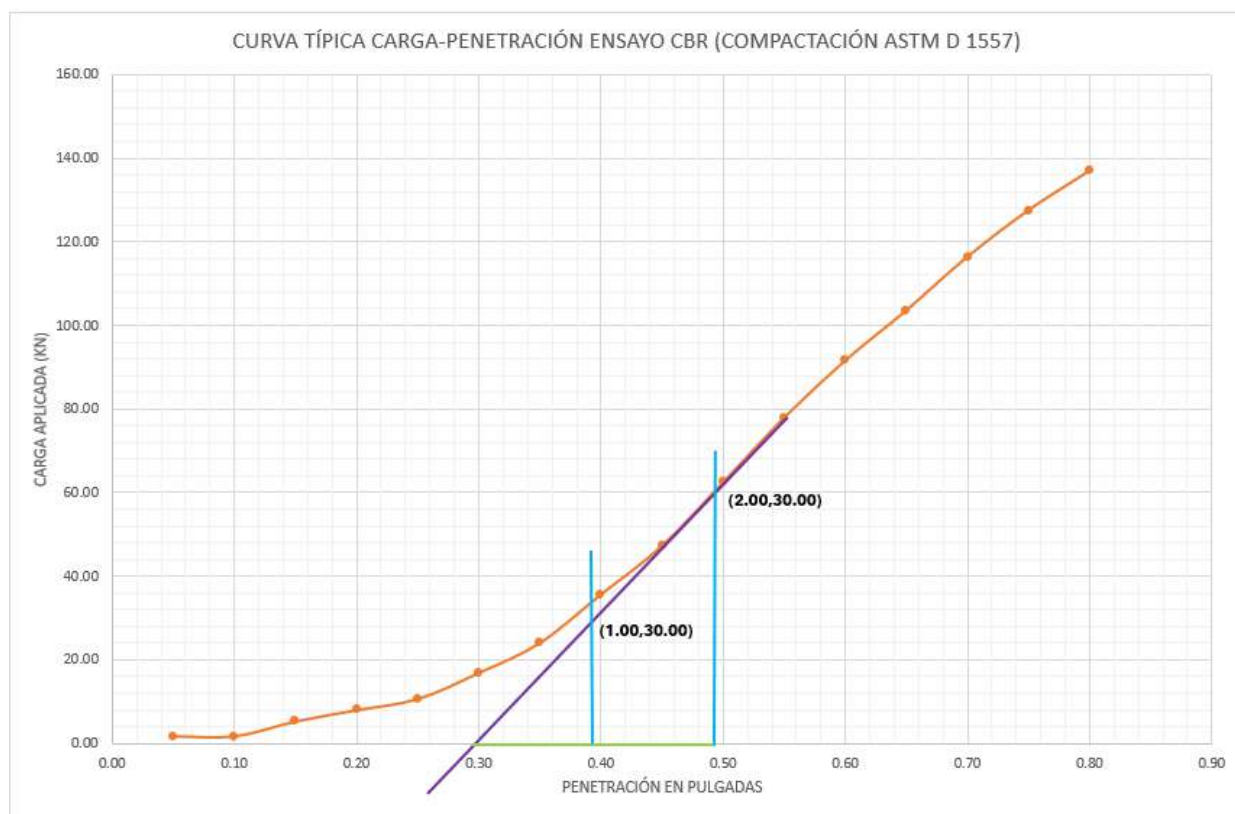
CURVA corregida TÍPICA CARGA-PENETRACIÓN ENSAYO CBR (Humedad 4%)



CURVA corregida TÍPICA CARGA-PENETRACIÓN ENSAYO CBR (Humedad 6%)

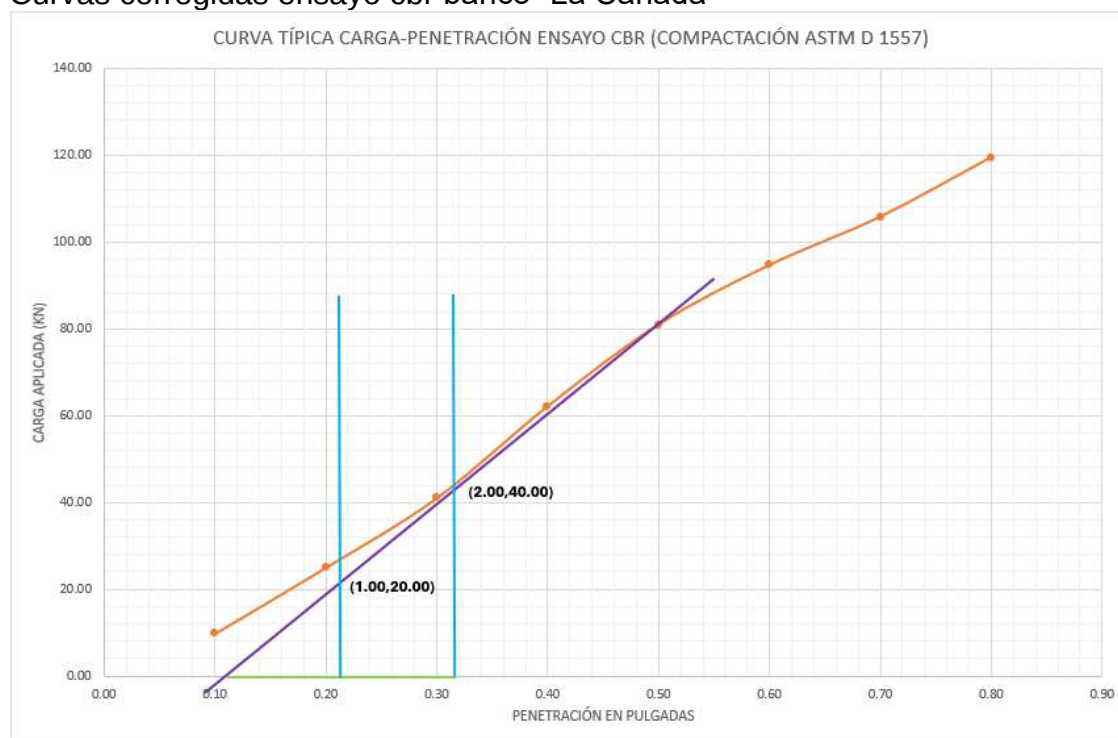


CURVA corregida TÍPICA CARGA-PENETRACIÓN ENSAYO CBR (Humedad 8%)

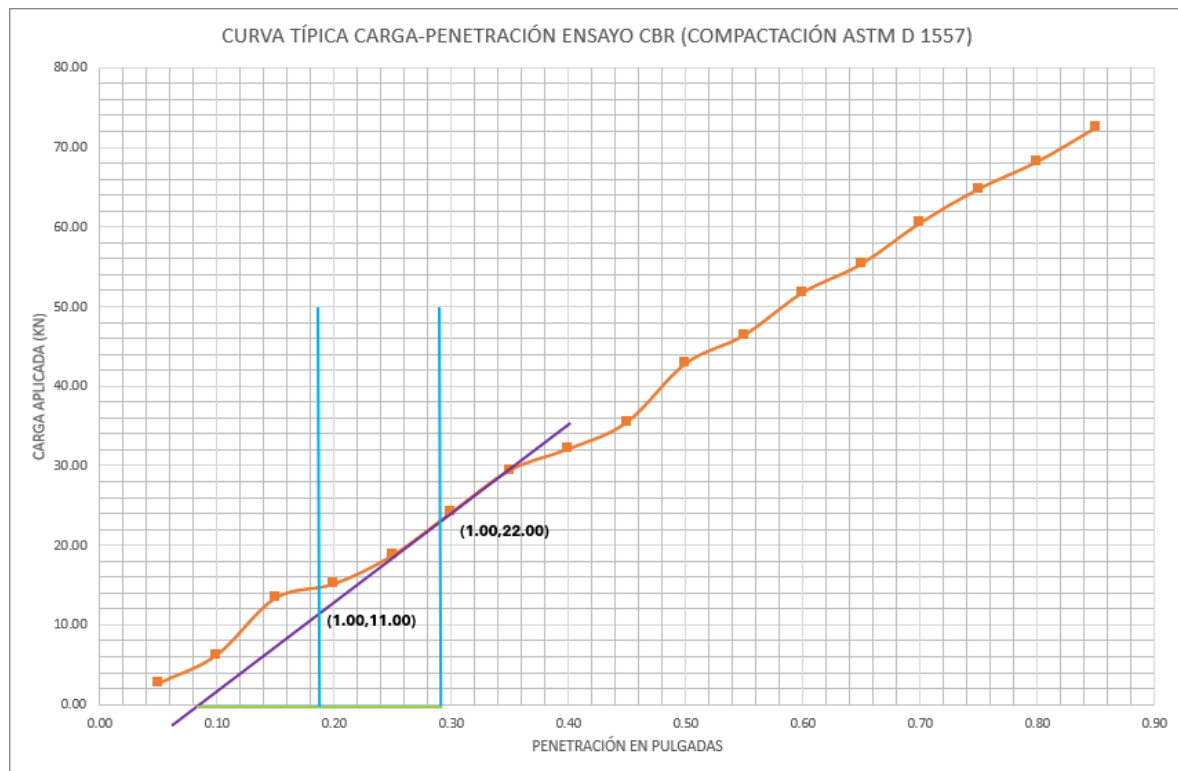


CURVA corregida TÍPICA CARGA-PENETRACIÓN ENSAYO CBR (Humedad 10%)

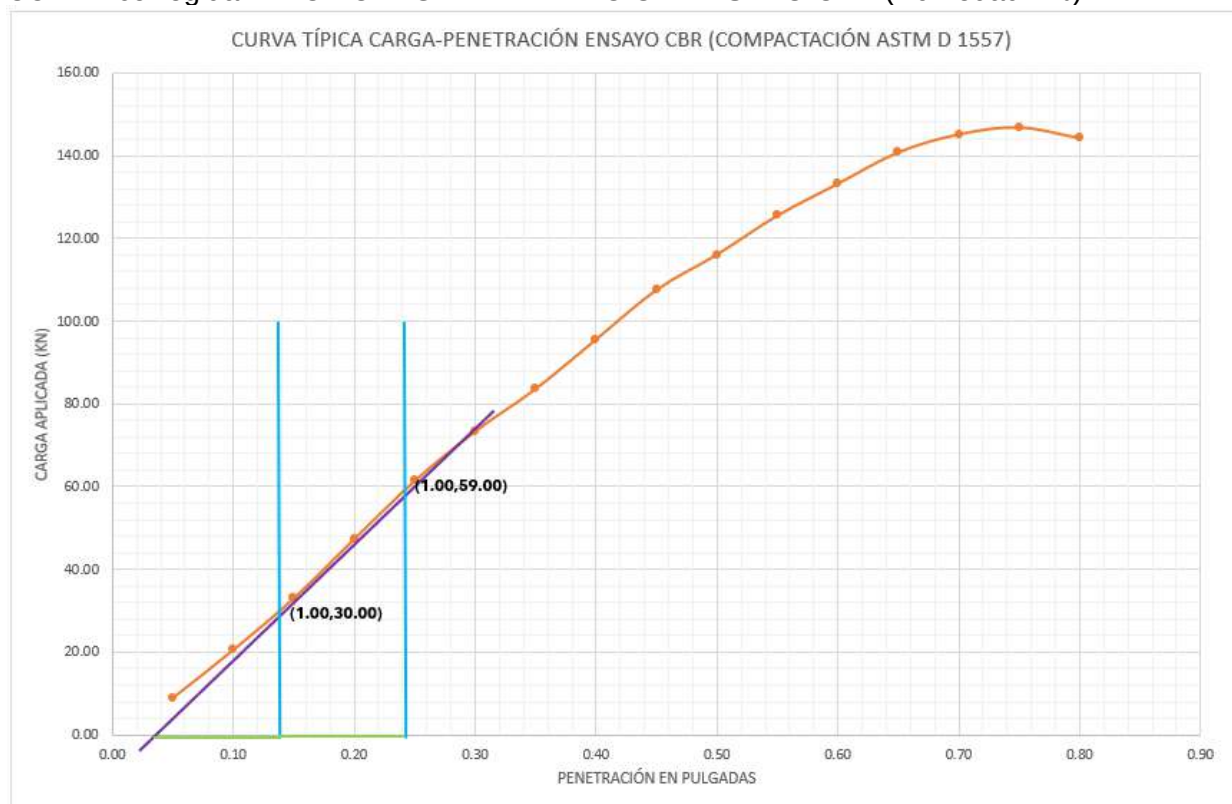
Curvas corregidas ensayo cbr banco “La Cañada”



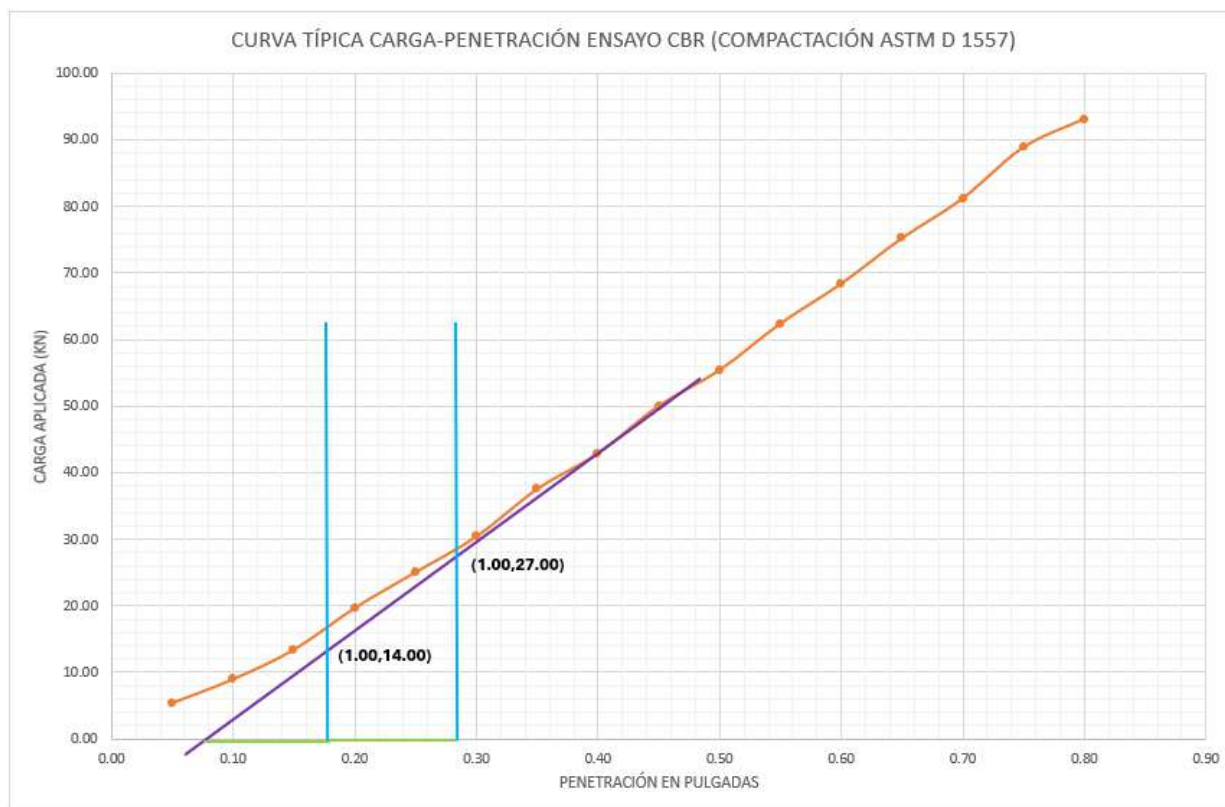
CURVA corregida TÍPICA CARGA-PENETRACIÓN ENSAYO CBR (Humedad 2%)



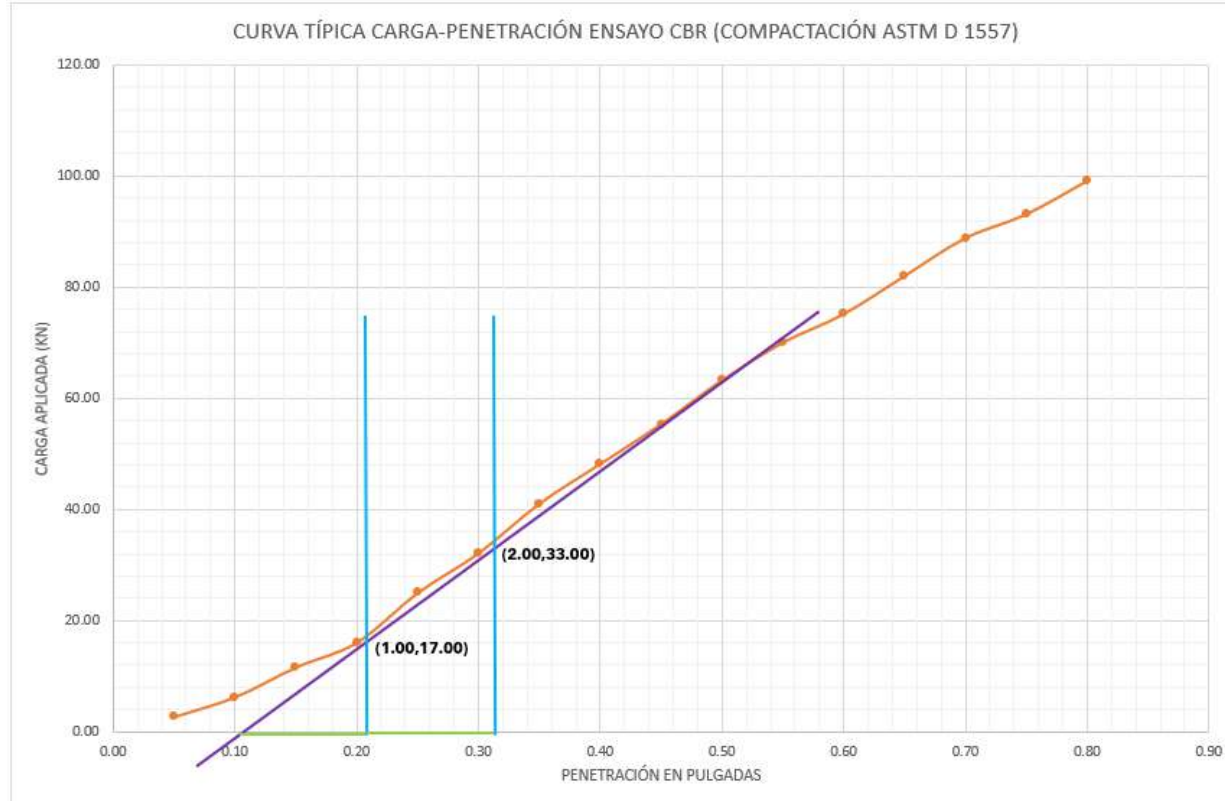
CURVA corregida TÍPICA CARGA-PENETRACIÓN ENSAYO CBR (Humedad 4%)



CURVA corregida TÍPICA CARGA-PENETRACIÓN ENSAYO CBR (Humedad 6%)

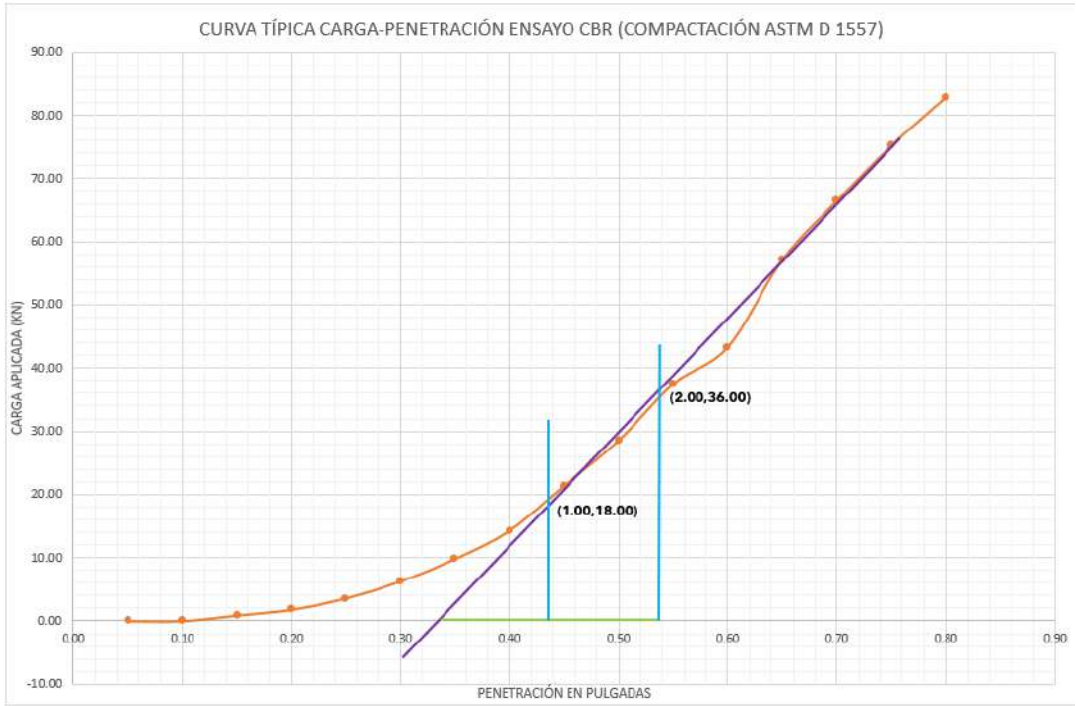


CURVA corregida TÍPICA CARGA-PENETRACIÓN ENSAYO CBR (Humedad 8%)

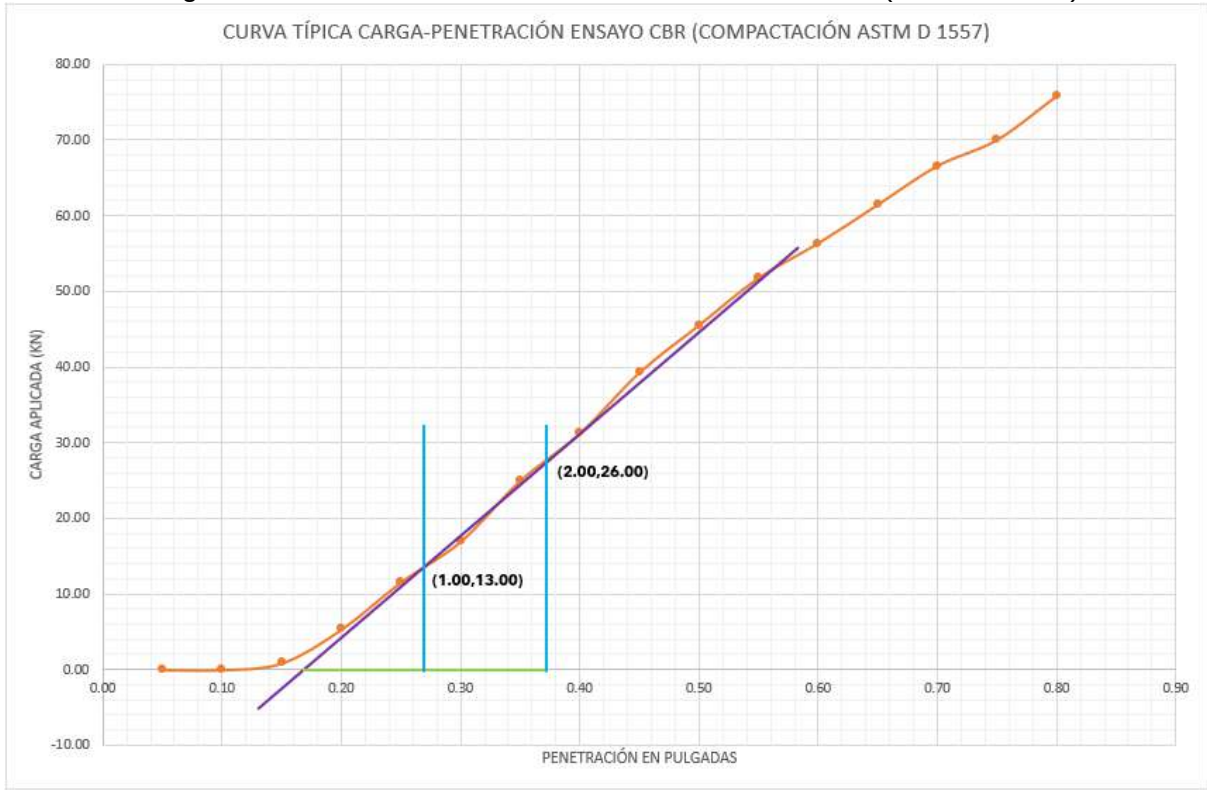


CURVA corregida TÍPICA CARGA-PENETRACIÓN ENSAYO CBR (Humedad 10%)

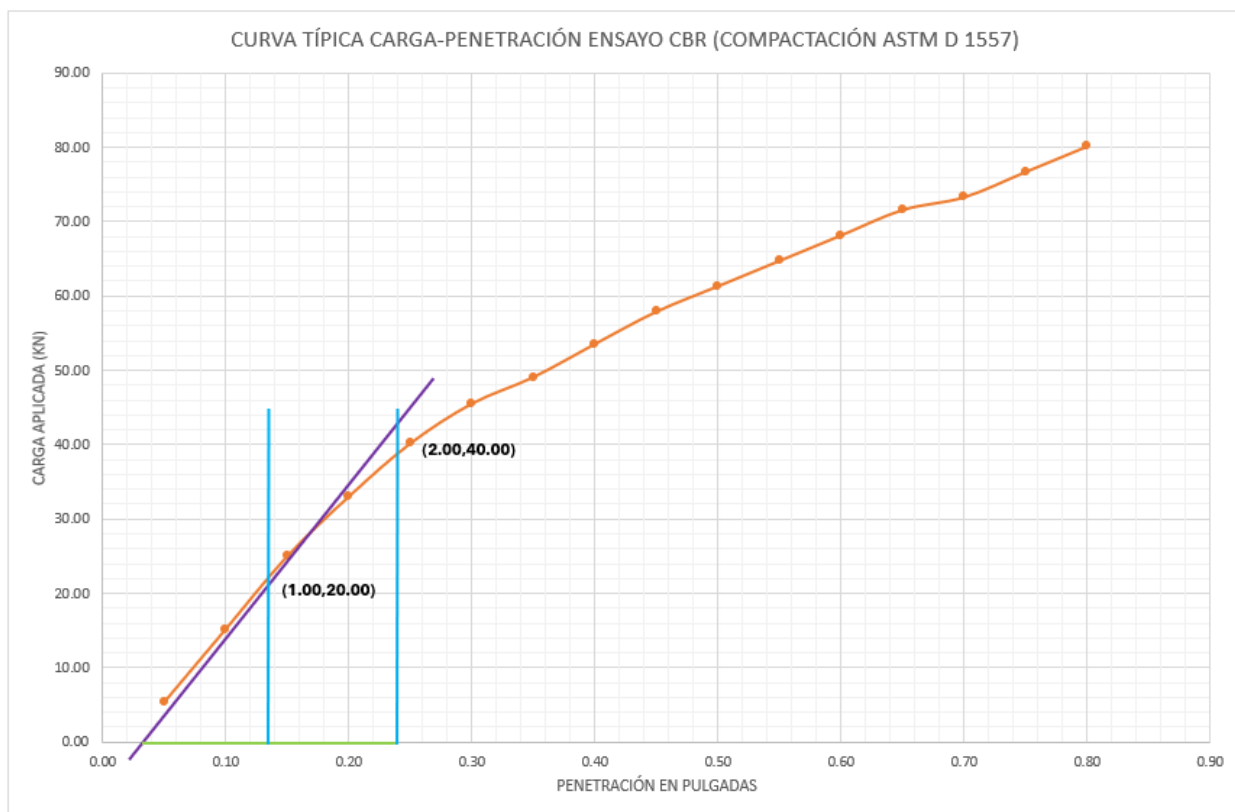
Curvas corregidas ensayo cbr banco “REURBA”



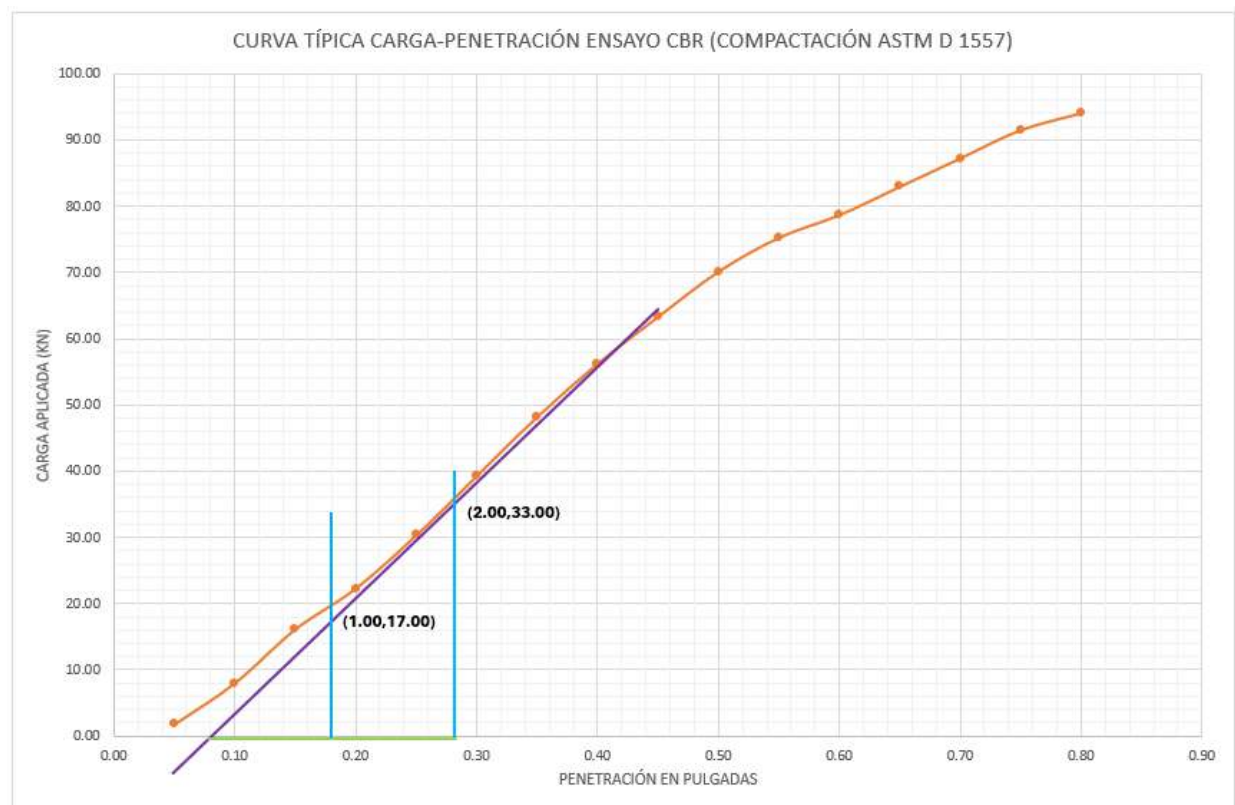
CURVA corregida TÍPICA CARGA-PENETRACIÓN ENSAYO CBR (Humedad 2%)



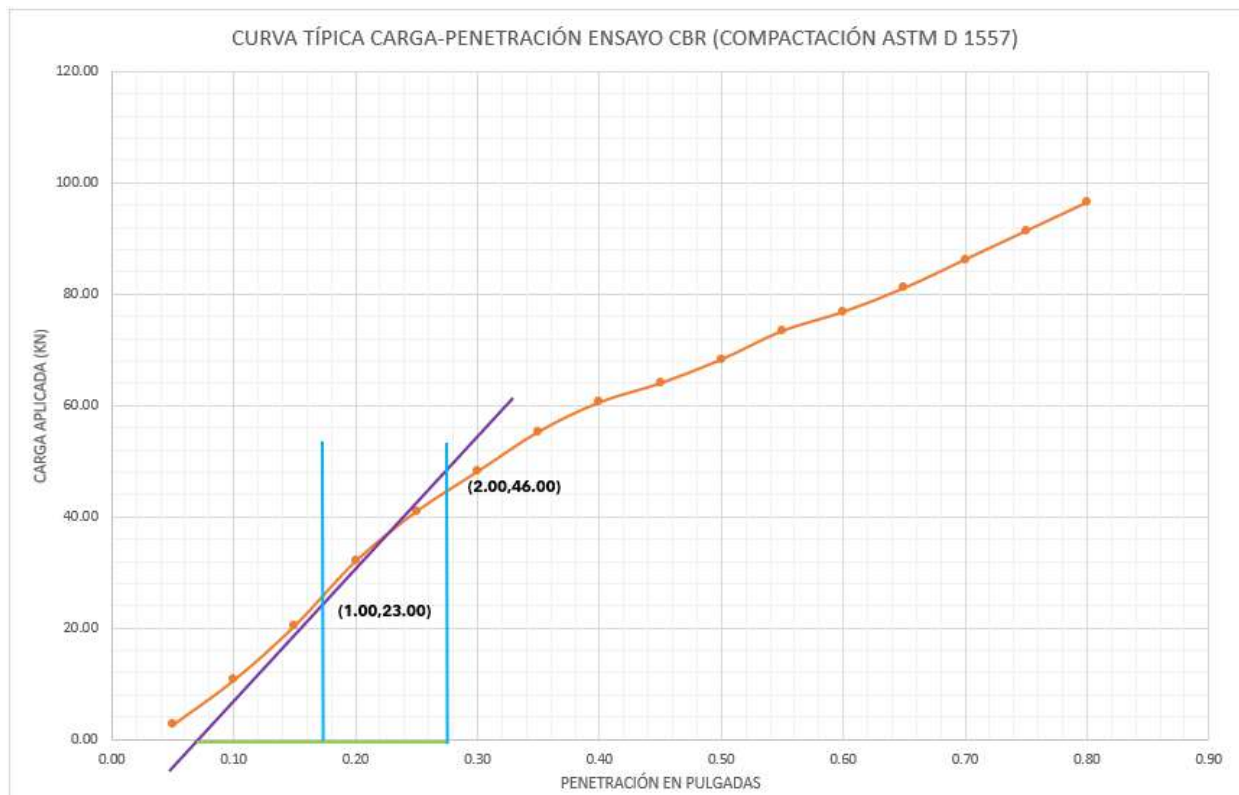
CURVA corregida TÍPICA CARGA-PENETRACIÓN ENSAYO CBR (Humedad 4%)



CURVA corregida TÍPICA CARGA-PENETRACIÓN ENSAYO CBR (Humedad 6%)



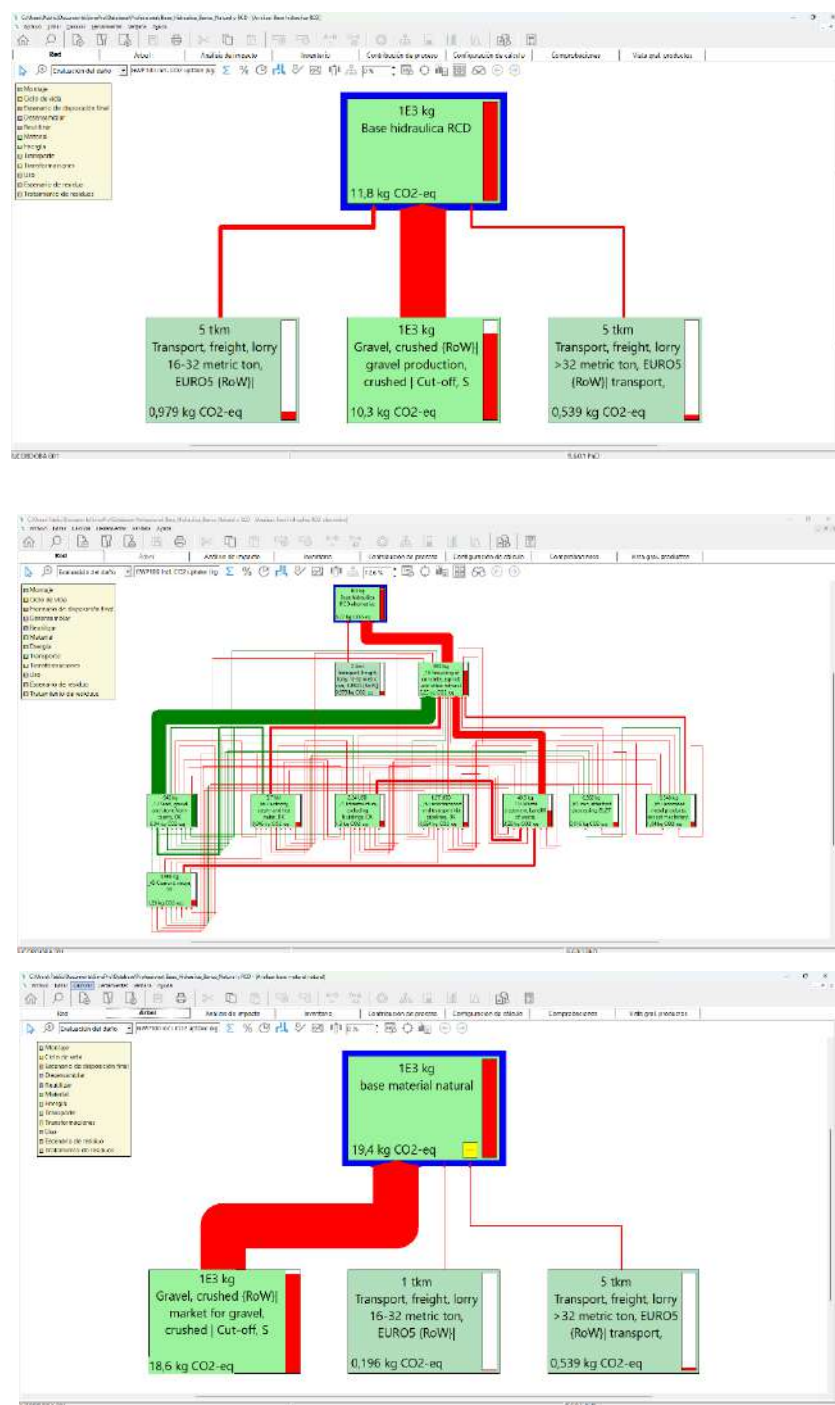
CURVA corregida TÍPICA CARGA-PENETRACIÓN ENSAYO CBR (Humedad 8%)



CURVA corregida TÍPICA CARGA-PENETRACIÓN ENSAYO CBR (Humedad 10%)

APENDICE 2

Interfaz del programa Sima Pro para el análisis de ciclo de vida



Árbol o diagrama de actividades del ciclo de vida para la producción de base hidráulica con materiales naturales y con RCD

Documentación | Entradas/salidas | Resumen | Configuración del sistema

Productos

Salidas asociadas a la tecnología: Productos y co-productos	Cantidad	Un.	Cantidad	Asignación %	Tipo de residuo	Categoría	Comentario
Base material natural: elemento	1000	kg	Más	100 %	No definido	Creciente	

Salidas asociadas a la tecnología: Productos emitidos

Cantidad	Un.	Distribución	DS+2 o Min	Max	Comentario

Entradas

Entradas asociadas desde la naturaleza (recursos)

Subcompañía	Cantidad	Un.	Distribución	DS+2 o Min	Max	Comentario

Entradas asociadas desde la tecnología (materias primas/combustibles)

Cantidad	Un.	Distribución	DS+2 o Min	Max	Comentario
1000	kg	Indefinido			
2	ton	Indefinido			
5	ton	Indefinido			

Entradas asociadas desde la tecnología (energía/calor)

Cantidad	Un.	Distribución	DS+2 o 2 ^a Min	Max	Comentario

Salidas

Emisiones al aire

Subcompañía	Cantidad	Un.	Distribución	DS+2 o 2 ^a Min	Max	Comentario

Emisiones al agua

Subcompañía	Cantidad	Un.	Distribución	DS+2 o Min	Max	Comentario

Emisiones al suelo

Subcompañía	Cantidad	Un.	Distribución	DS+2 o Min	Max	Comentario

Túnel final de residuos

Subcompañía	Cantidad	Un.	Distribución	DS+2 o 2 ^a Min	Max	Comentario

Emisiones no materiales

Subcompañía	Cantidad	Un.	Distribución	DS+2 o 2 ^a Min	Max	Comentario

Aspectos sociales

Subcompañía	Cantidad	Un.	Distribución	DS+2 o Min	Max	Comentario

Aspectos económicos

Subcompañía	Cantidad	Un.	Distribución	DS+2 o Min	Max	Comentario

UC10000A.001

Entradas y salidas del proceso para la producción de base hidráulica con material natural y con RCD

General | Configuración de parámetros | Configuración de métodos | Configuración de parámetros

Nombre: [Base RCD]
Comentario: []

Función de cálculo: []
P: []
A: []
B: []
C: []
D: []
E: []
F: []
G: []
H: []
I: []
J: []
K: []
L: []
M: []
N: []
O: []
P: []
Q: []
R: []
S: []
T: []
U: []
V: []
W: []
X: []
Y: []
Z: []

Método: []

Producto: [Base hidráulica RCD]

Cantidad	Un.	Proceso	Comentario
1	kg	Base hidráulica RCD	

Emisiones al aire: []
Emisiones al agua: []
Emisiones al suelo: []

Emisiones no materiales: []

Aspectos sociales: []

Aspectos económicos: []

Calcular | Cancelar

UC10000A.001

Método usado para analizar, red-árbol y comparar (aplica mismo método para todos los análisis de la base de RCD y base natural)

APENDICE 3

Metodología empleada para la optimización Humedad–CBR

La determinación de la humedad óptima basada en los valores de CBR se realizó mediante un procedimiento de ajuste numérico y optimización, con el objetivo de identificar la condición de humedad que maximiza la capacidad portante del material en cada banco. Para ello se implementó un modelo polinomial de segundo grado, el cual ha demostrado ser adecuado en muestras con número reducido de datos experimentales, evitando problemas de sobreajuste y garantizando una función continua y derivable dentro del rango de humedades ensayadas.

Posteriormente se aplicó un algoritmo de optimización basado en *Differential Evolution* (DEoptim) en el entorno RStudio. Este método estocástico explora el dominio permitido (intervalo entre la humedad mínima y máxima registrada para cada banco) y converge hacia el valor de humedad que maximiza la predicción del modelo polinomial ajustado. El algoritmo evalúa iterativamente combinaciones de humedad, penaliza valores fuera del rango experimental y retorna el punto donde el CBR predicho alcanza su valor máximo.

Este procedimiento se aplicó de manera independiente para los tres bancos de material: **Reurba, La Cañada y La Luz**, generándose automáticamente gráficos de las curvas ajustadas y marcando visualmente la humedad óptima y el CBR máximo alcanzado.

Metodología — Algoritmo Genético para estimar la humedad óptima (h_{opt})

Para complementar el análisis tradicional de las curvas humedad–CBR obtenidas en laboratorio, se implementó un algoritmo genético (GA por sus siglas en inglés) con el fin de estimar la humedad óptima teórica que maximiza la resistencia mecánica de cada material evaluado. Los algoritmos genéticos constituyen técnicas de optimización inspiradas en los principios de selección natural, permitiendo explorar espacios no lineales y multimodales de manera robusta, especialmente cuando la información disponible es escasa o presenta variabilidad experimental.

El modelo empleado se basó en la función parabólica:

$$CBR = a - b(h - h_{ptm})^2$$

donde:

- **a** representa el valor máximo teórico del CBR,
- **b** controla la curvatura del comportamiento resistencia-humedad,
- **h_{opt}** es la humedad óptima verdadera del material,
- **h** corresponde a una humedad “latente” estimada por el GA.

A diferencia de la optimización directa, los algoritmos genéticos permiten reconstruir humedades latentes más coherentes con la respuesta mecánica observada, reduciendo la influencia del ruido experimental y mejorando la forma de la curva teórica de resistencia.

Para cada banco de material se generó una población inicial de 100 soluciones, evolucionando durante un máximo de 600 iteraciones mediante operadores de cruce, mutación y selección elitista. El criterio de aptitud se definió como la minimización del error cuadrático entre valores observados y predichos. Los algoritmos se ejecutaron de manera independiente en los bancos Reurba, La Cañada y La Luz.

Tipo de algoritmo empleado

Se seleccionó el algoritmo **Differential Evolution (DE)**, una técnica metaheurística de optimización estocástica inspirada en procesos evolutivos. Este algoritmo es robusto para la búsqueda global de soluciones en problemas no lineales, como la relación humedad–CBR, y permite identificar el punto en el cual la resistencia (CBR) alcanza su máximo valor dentro de los rangos medidos en laboratorio.

Desarrollo metodológico

1. **Recolección de datos experimentales:** se realizaron 18 ensayos CBR, correspondientes a tres energías de compactación (600 kN, 971 kN y 2700 kN).

En cada prueba se registró la humedad inicial, la densidad seca obtenida y el valor de CBR.

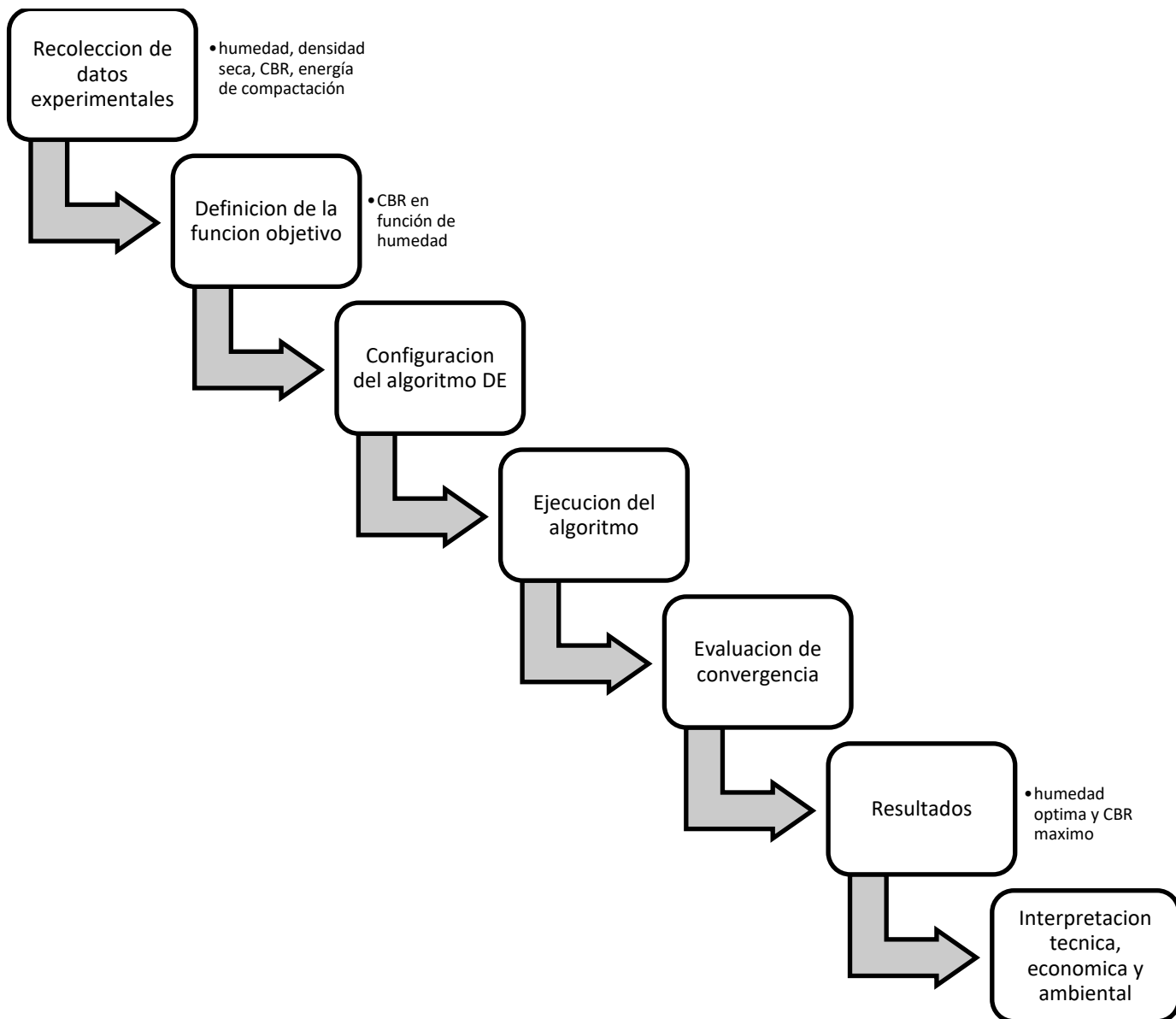
2. **Definición del problema de optimización:** el objetivo fue maximizar el valor del CBR en función de la humedad, considerando la ecuación de ajuste polinómico derivada de los datos experimentales.
3. **Implementación del algoritmo DE:** se programó el algoritmo en Python utilizando la librería `scipy.optimize.differential_evolution`, donde la función objetivo consistió en el CBR ajustado en función de la humedad. Se establecieron límites de búsqueda para la humedad con base en los rangos experimentales medidos.
4. **Obtención de la humedad óptima:** el algoritmo identificó el valor de humedad que maximiza el CBR para cada energía de compactación. En los casos de 600 kN y 971 kN, el óptimo se proyectó fuera del rango ensayado, confirmando la tendencia ascendente observada en los datos. Para 2700 kN se obtuvo un valor cercano al 8 % de humedad, coherente con el comportamiento parabólico típico de la relación humedad-CBR.
5. **Interpretación económica y ambiental:** al determinar de manera precisa la humedad óptima, se reduce la necesidad de realizar pruebas experimentales adicionales, lo que implica un **ahorro de recursos y tiempo de laboratorio**. Además, se promueve un **consumo más eficiente de agua** en la compactación de mezclas con residuos de construcción, contribuyendo a la sostenibilidad de los procesos constructivos.

Datos de entrada (Input)

- Humedad medida en laboratorio (%).
- Densidad seca (γ_d).
- Valores de CBR obtenidos en los 18 ensayos.
- Energía de compactación aplicada (600 kN, 971 kN, 2700 kN).
- Rango de búsqueda para la humedad (definido por los límites experimentales).

Datos de salida (Output)

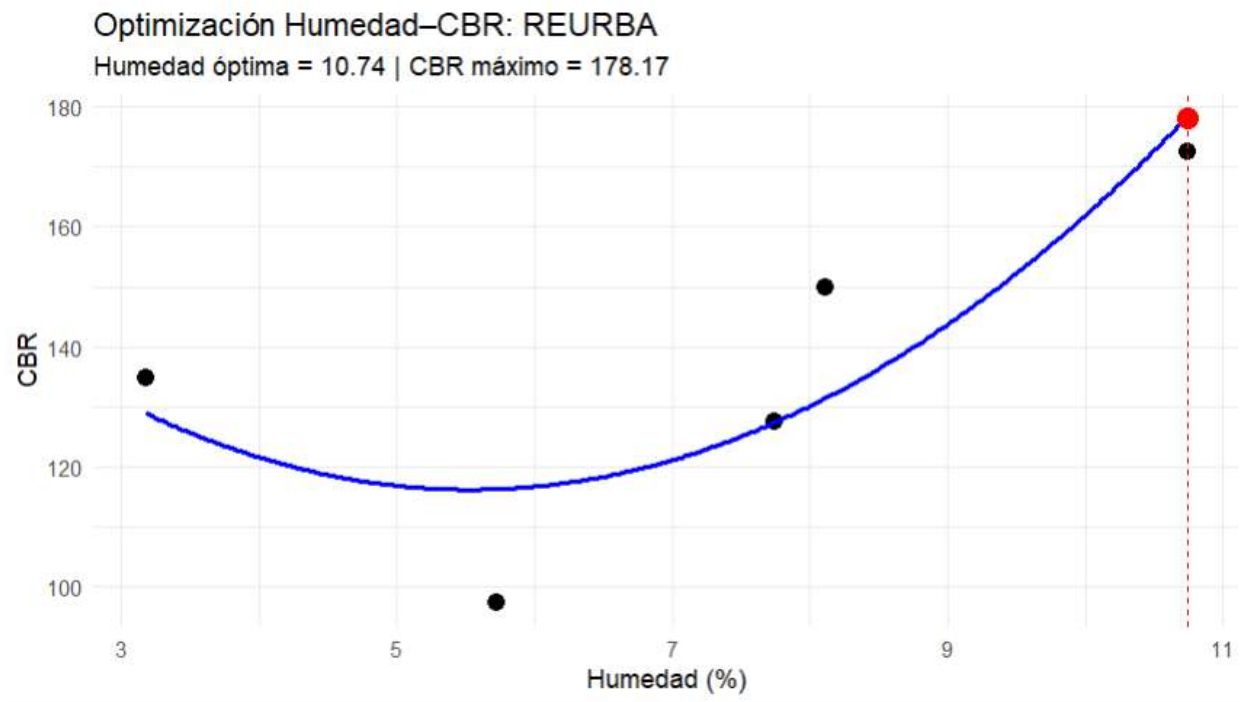
- Valor de **humedad óptima** para cada energía de compactación.
- Valor de **CBR máximo proyectado**.
- Curvas ajustadas humedad–CBR.
- Reporte comparativo (experimental vs optimizado).



Optimización de Humedad-CBR y algoritmo genético en RStudio

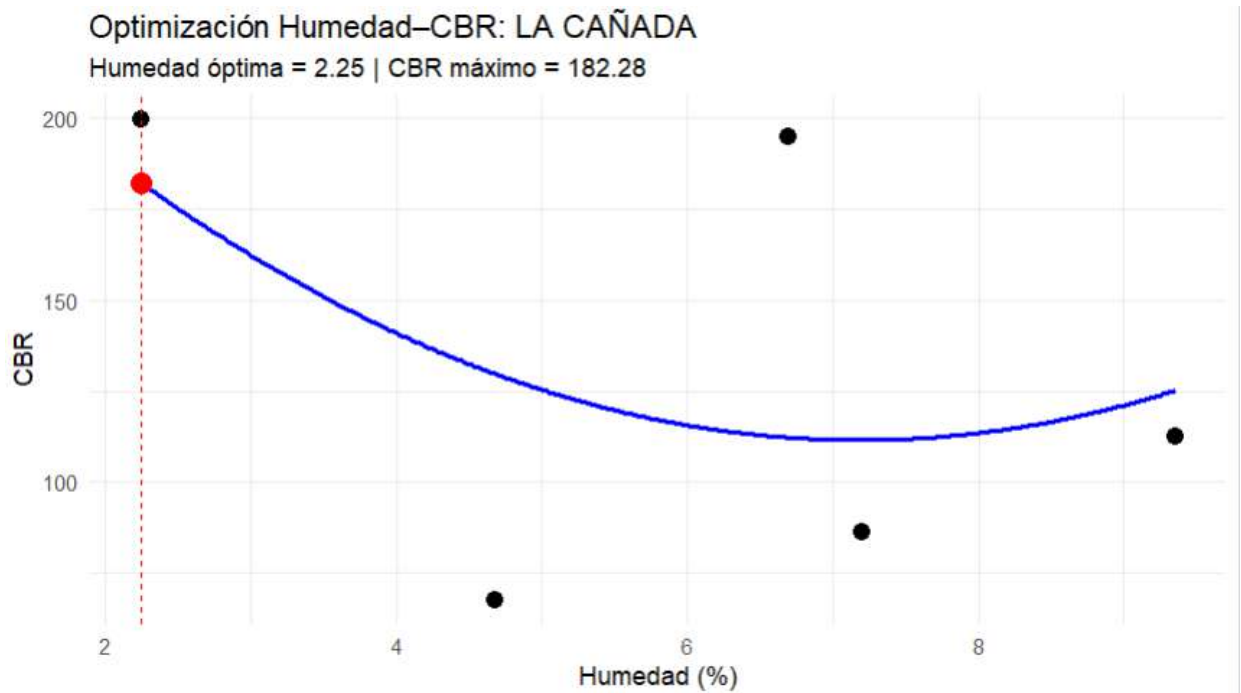
Banco Reurba

- Humedad óptima obtenida: **10.74 %**
- CBR máximo estimado: **178.17**
- Comportamiento: la curva presenta incremento progresivo del CBR hasta alcanzar un pico cercano al límite superior del intervalo de humedad estudiado, indicando sensibilidad moderada a la variación de humedad.



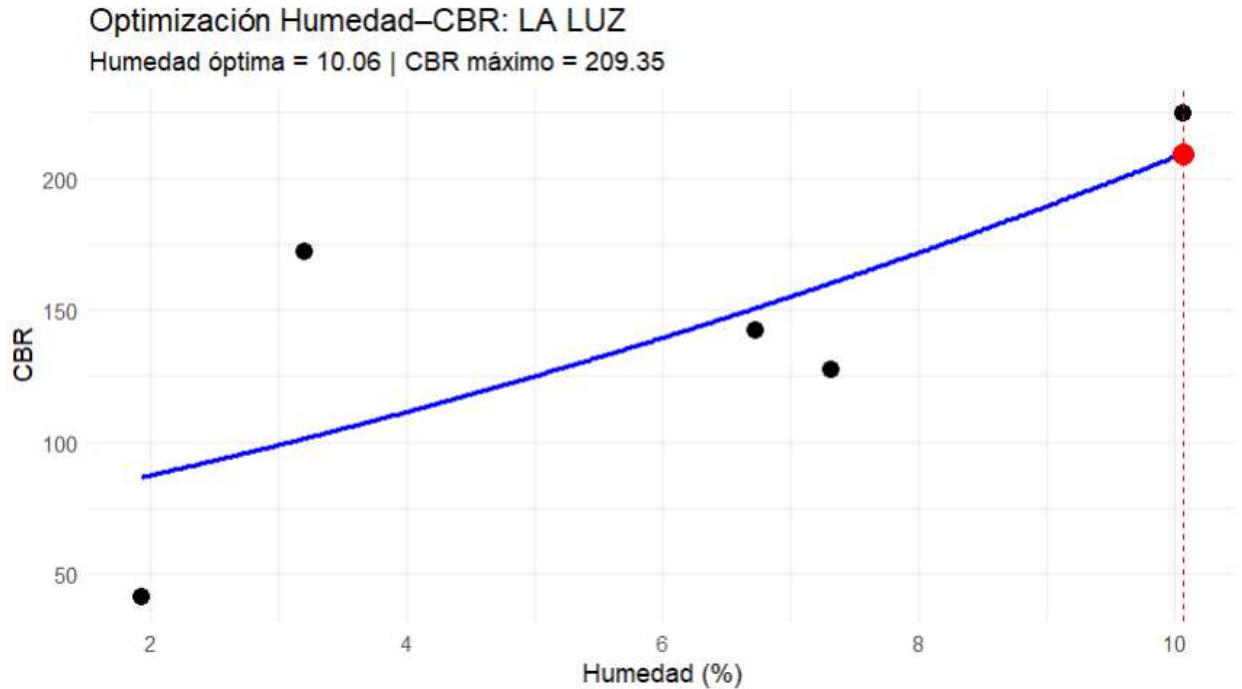
Banco La Cañada

- Humedad óptima obtenida: **2.25 %**
- CBR máximo estimado: **182.28**
- Comportamiento: el CBR muestra variaciones pronunciadas con cambios en la humedad, evidenciando una caída importante en humedades medias, lo que sugiere un material más dependiente del contenido de agua.



Banco La Luz

- Humedad óptima obtenida: **10.06 %**
- CBR máximo estimado: **209.35_**
- Comportamiento: material con una tendencia clara a mejorar su resistencia mecánica con el aumento de humedad hasta un punto crítico, después del cual disminuye gradualmente.



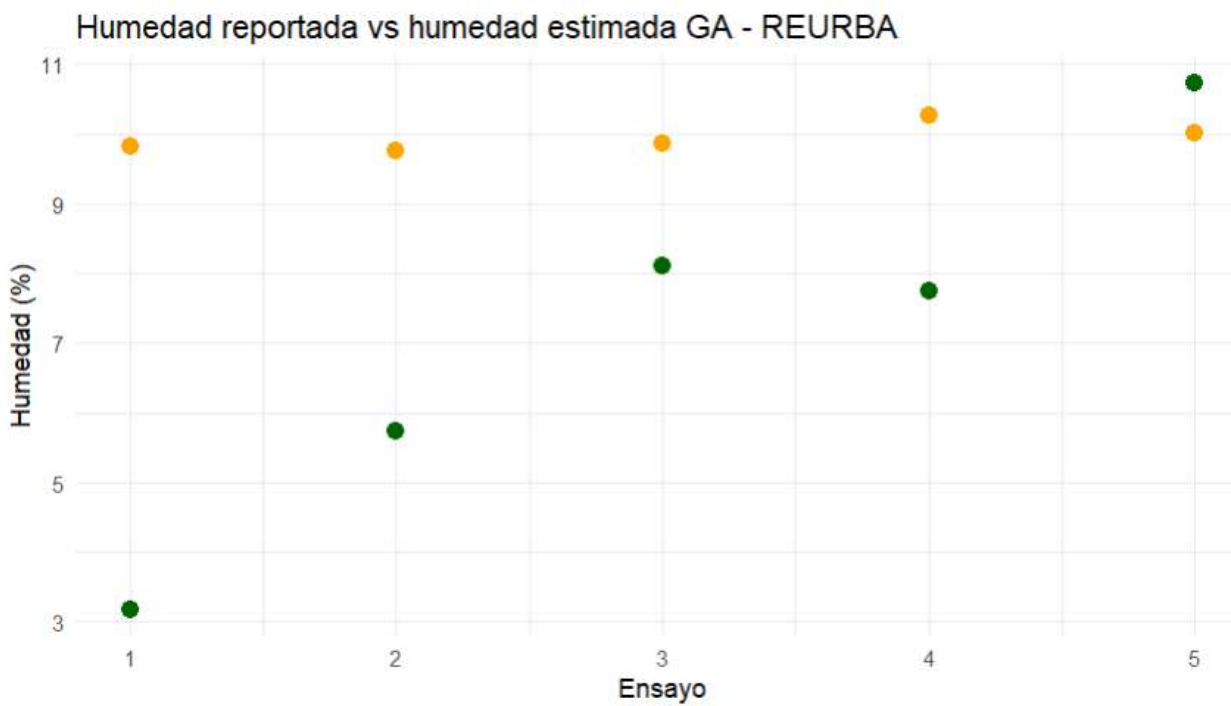
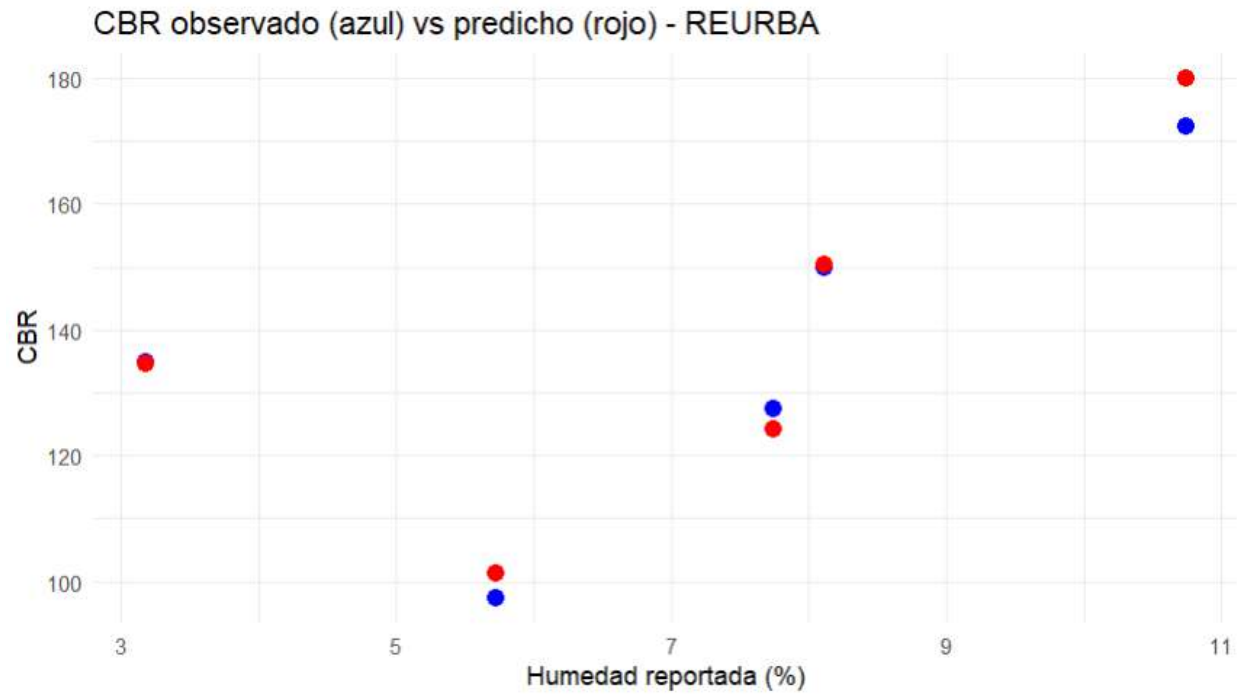
Resultados del algoritmo genético

Los valores óptimos estimados para cada banco fueron:

Banco Reurba

- **$h_{opt} = 10.03\%$**
- **$a = 180.79$**
- **$b = 1031.21$**
- **$SSE = 84.03$**

El valor óptimo de humedad se ubica hacia el extremo superior del rango experimental ($\approx 10\text{--}11\%$), lo que coincide con el comportamiento ascendente del CBR observado. El modelo parabólico se ajustó de forma adecuada (SSE bajo), indicando buena consistencia interna en los datos.

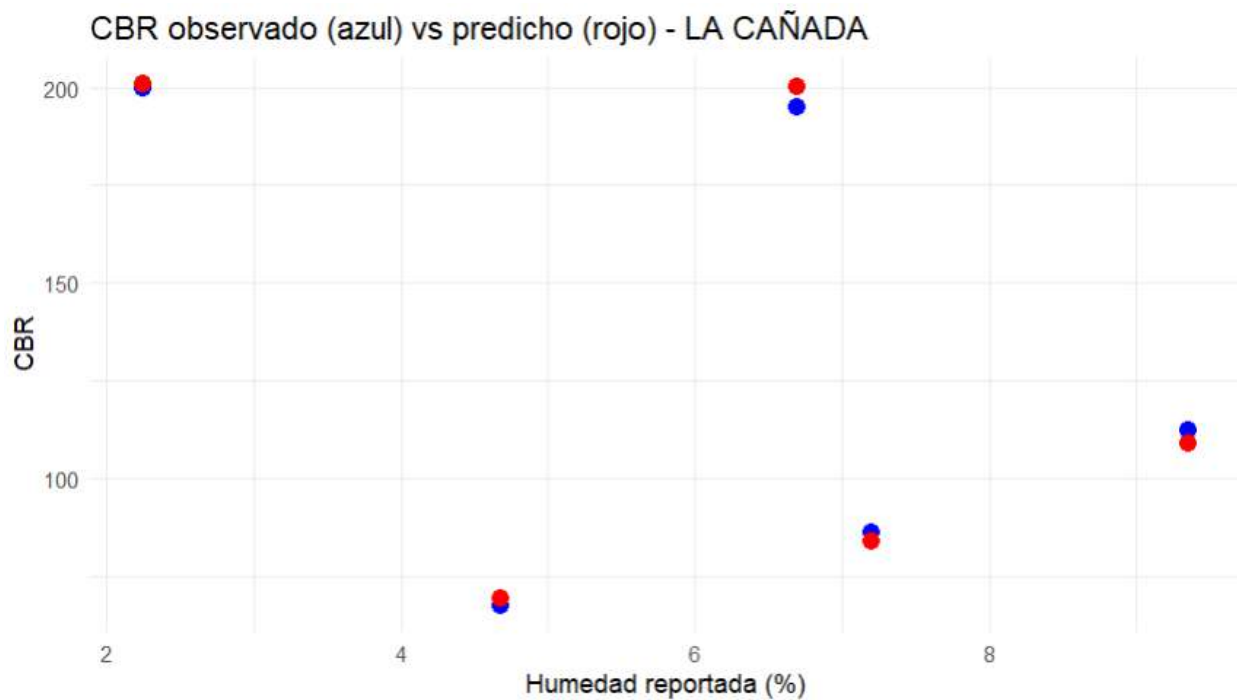


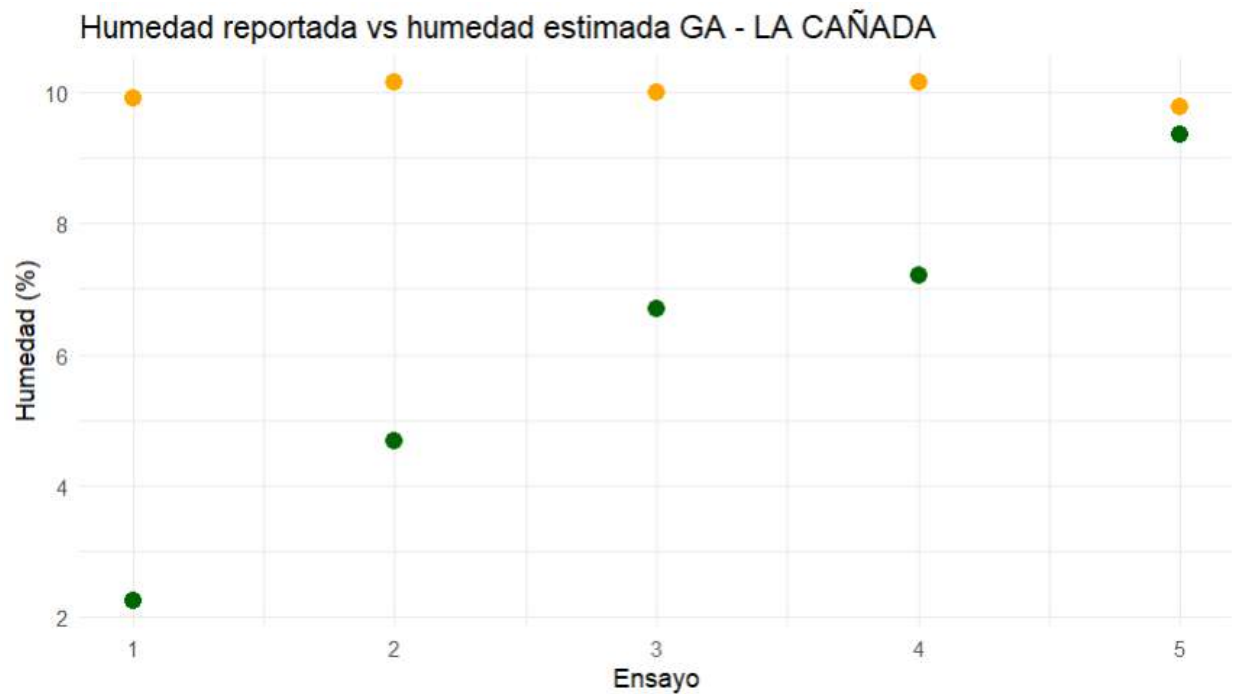
Banco La Cañada

- **$h_{opt} = 9.96\%$**

- **a = 207.73**
- **b = 3202.07**
- **SSE = 51.08**

Este banco mostró el **mejor ajuste** de los tres (menor SSE). La curvatura elevada ($b > 3000$) indica un material con fuerte sensibilidad a la variación de humedad: pequeñas desviaciones respecto a la humedad óptima reducen considerablemente la capacidad portante. Esto coincide con el comportamiento experimental irregular de este banco.

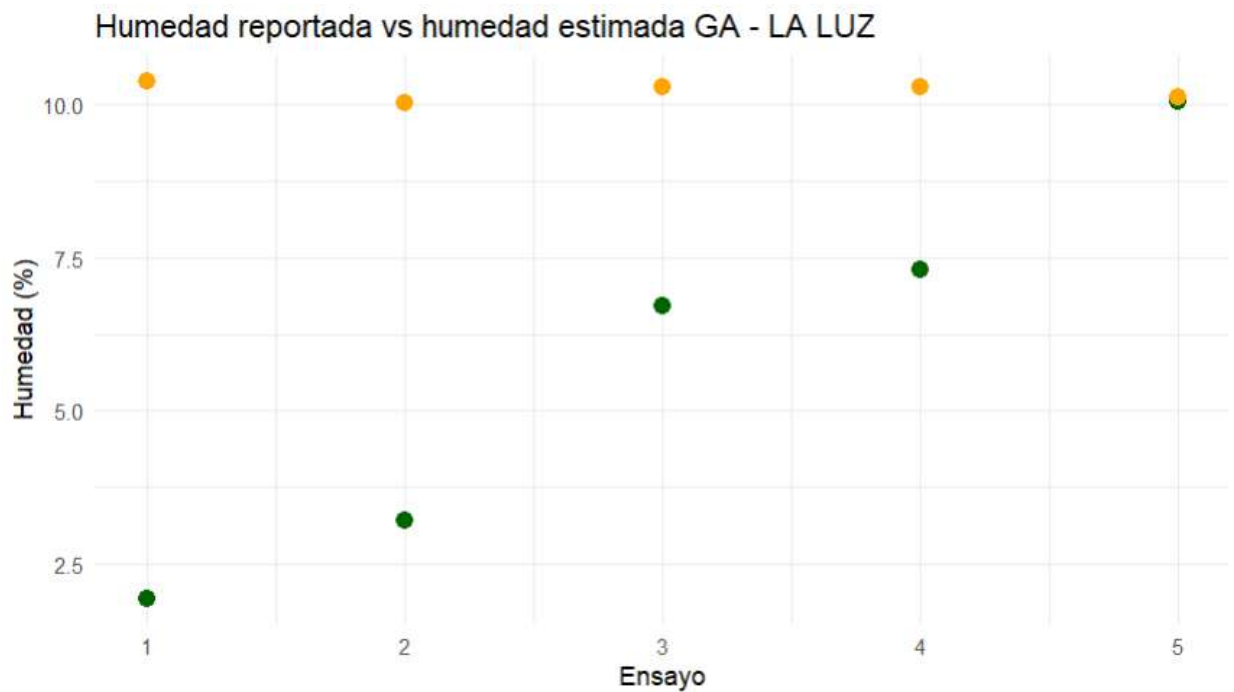
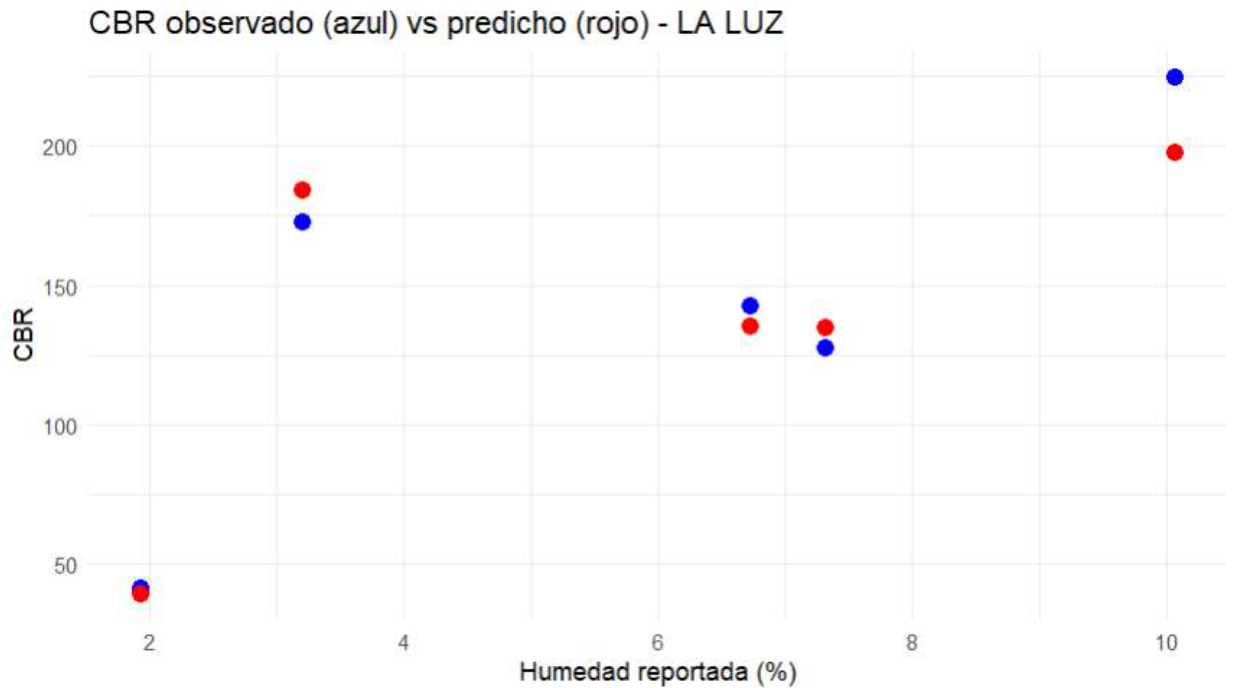




Banco La Luz

- **$h_{opt} = 10.12\%$**
- **$a = 197.95$**
- **$b = 2010.16$**
- **$SSE = 989.09$**

Aunque el GA identifica una humedad óptima cercana a 10.1%, el valor del error ($SSE \approx 1000$) indica que los datos presentan mayor dispersión. Es el banco con **peor ajuste**, lo cual se asocia al valor atípico de densidad (2812 kg/m^3) que ocasiona curvas menos consistentes. El modelo aún permite estimar una humedad razonable, pero con menor confiabilidad comparada con los otros bancos.



Al comparar los tres bancos se observa que cada uno presenta una respuesta distinta frente a la humedad, lo cual confirma la importancia de determinar curvas individualizadas para cada fuente de material y no asumir un comportamiento uniforme.

- **REURBA** muestra una curva relativamente estable, con un incremento progresivo del CBR conforme aumenta la humedad hasta llegar a su punto óptimo. Este comportamiento indica una estructura interna menos sensible a la interacción agua–matriz, siendo apto para condiciones donde la humedad puede variar ligeramente.
- **LA CAÑADA** exhibe el comportamiento más irregular, con valores altos en baja humedad, seguidos de caídas marcadas. Esto sugiere una granulometría y plasticidad que influyen en la retención de agua y pueden generar dispersión en la resistencia. Es un material que requiere control más estricto durante la compactación.
- **LA LUZ** presenta un comportamiento típico de materiales granulares con finos controlados: el CBR incrementa con la humedad hasta alcanzar un máximo claro, lo que facilita definir con precisión una humedad óptima operacional.

En conjunto, los resultados indican que la sensibilidad a la variación de humedad es mayor en **La Cañada**, mientras que **La Luz** y **Reurba** muestran comportamientos más consistentes y previsibles.

Código Fuente del Modelo de Optimización Espacial para RCD

El presente anexo documenta el algoritmo desarrollado en el lenguaje de programación Python para la evaluación multicriterio del territorio. **El script fue codificado y optimizado metodológicamente en iteración con el asistente de inteligencia artificial Gemini**, garantizando la correcta integración de librerías de análisis numérico computacional (NumPy, SciPy) y manejo de datos estructurados (Pandas) para la resolución de matrices espaciales. El modelo calcula distancias geoespaciales reales y asigna penalizaciones paramétricas basadas en los radios de protección ambiental.

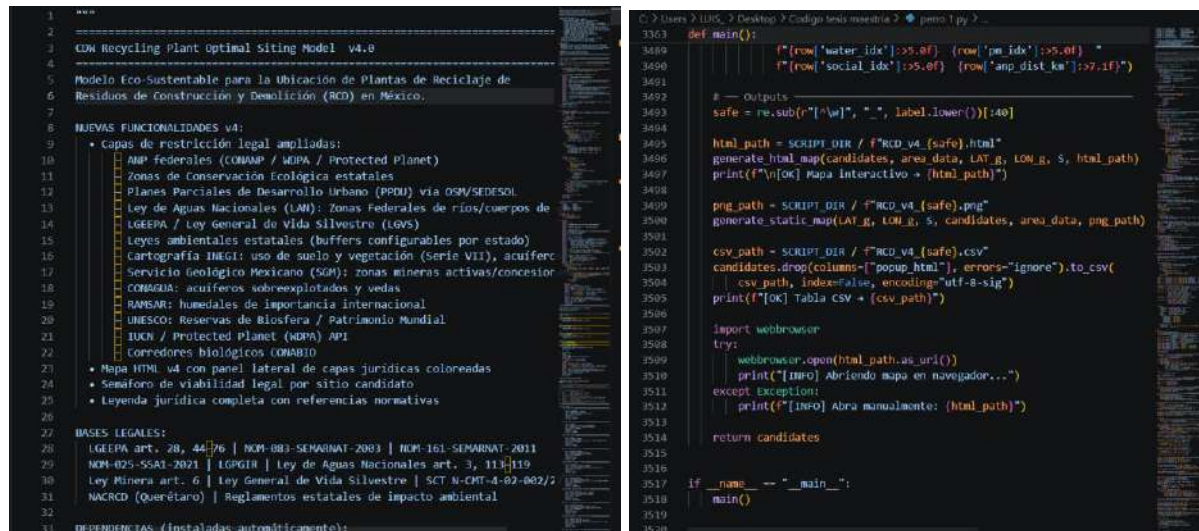
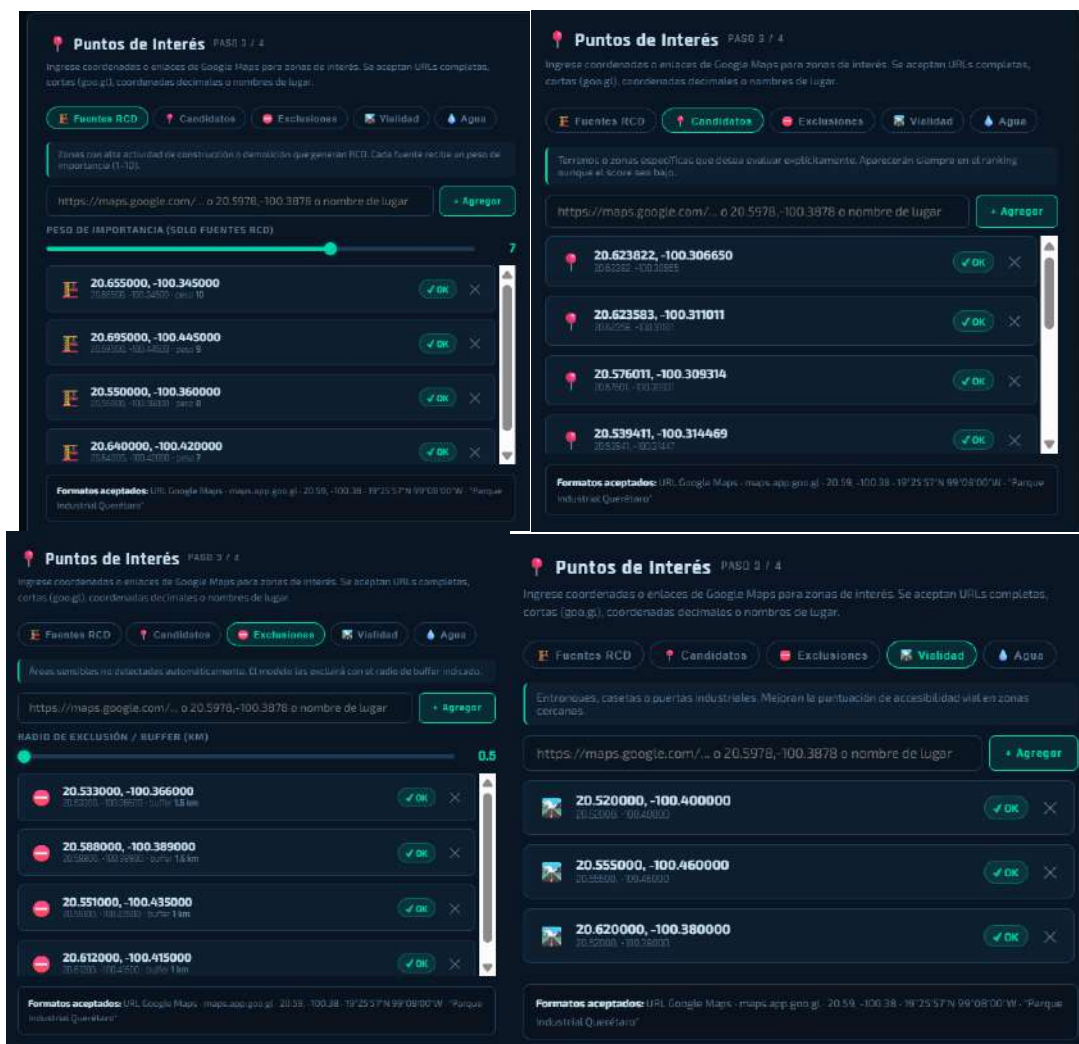
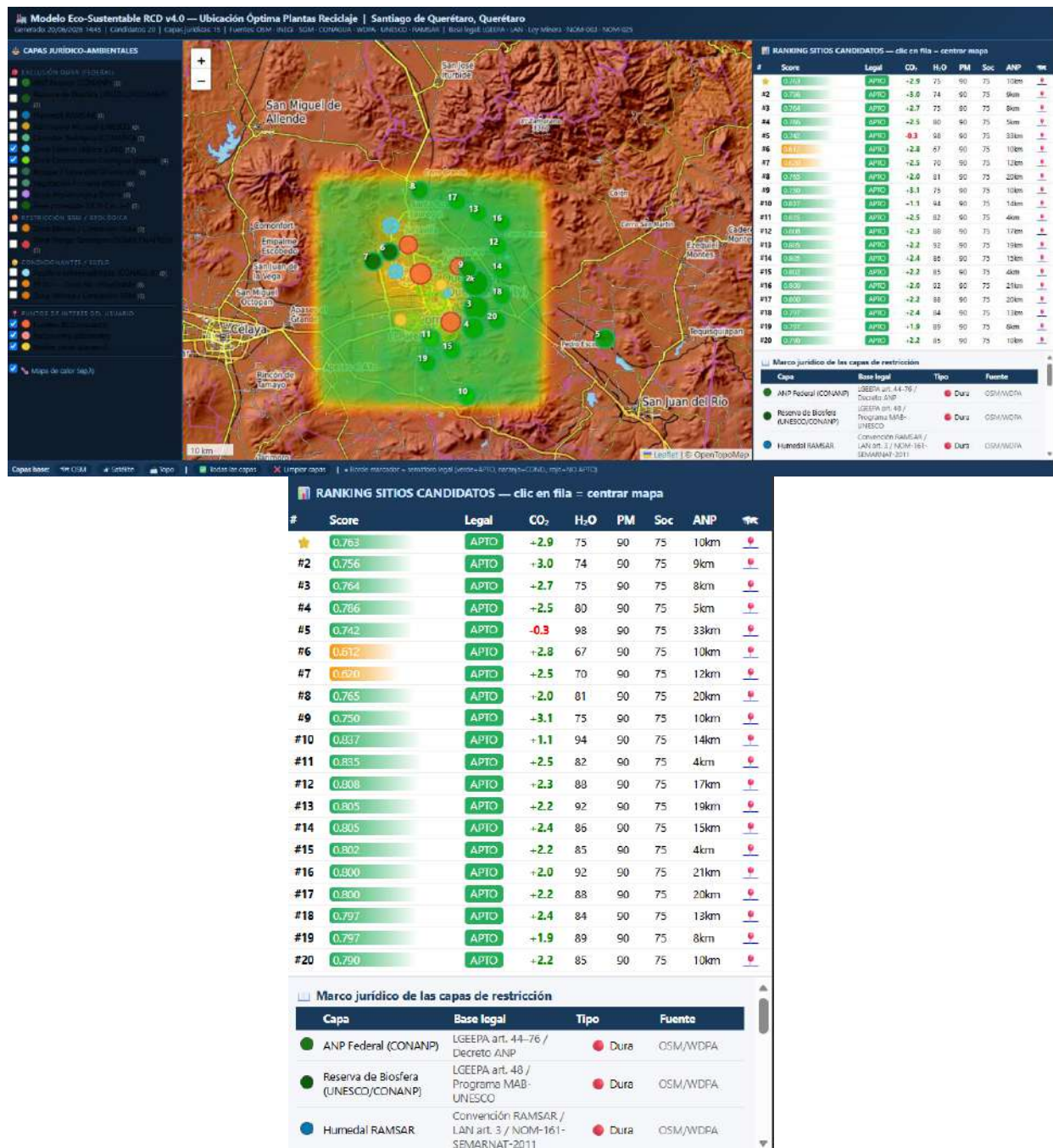


Imagen representativa de las 3518 líneas de código realizado para el modelo de optimización espacial





Interfaz de la pagina de resultados que arroja el modelo