

**ESTADO DEL CONOCIMIENTO DE LODOS RESIDUALES DE PTAR APLICADO EN
BASES Y SUBBASES GRANULARES PARA VÍAS Terciarias: CASOS DE
ESTUDIO Y SU POSIBLE APLICACIÓN EN COLOMBIA**

CRISTIAN ANDRÉS ECHEVERRY ROMERO

DIRECTOR

ING. JUAN MANUEL GONZÁLEZ GUZMÁN M.Sc.



UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C., SEPTIEMBRE DE 2021

ESTADO DEL CONOCIMIENTO DE LODOS RESIDUALES DE PTAR APLICADO
BASES Y SUBBASES GRANULARES PARA VÍAS TerciARIAS: CASOS DE
ESTUDIO Y SU POSIBLE APLICACIÓN EN COLOMBIA

CRISTIAN ANDRÉS ECHEVERRY ROMERO

DIRECTOR

ING. JUAN MANUEL GONZÁLEZ GUZMÁN M.Sc.



UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C., SEPTIEMBRE DE 2021

Nota aceptación

Firma de tutor

Firma de jurado 1

Firma de jurado 2

Bogotá D. C., septiembre de 2021

DEDICATORIA

Este trabajo es para mi madre y toda mi familia, los pilares que sostuvieron mis ganas de salir adelante.

Para mis amigos, compañeros y mentores, las personas con las cuales tuve el privilegio de compartir la responsabilidad, la felicidad y la preocupación que definen día a día el camino que tiene que recorrer un estudiante para convertirse en ingeniero.

AGRADECIMIENTOS

Me llena de dicha y orgullo poder expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que directa o indirectamente ofrecieron desinteresadamente su esfuerzo, su tiempo y su ayuda al desarrollo y la mejora de este, el trabajo de grado con el cual aspiro a obtener mi título profesional.

En primer lugar, agradezco a Myriam, mi madre, por el amor y el apoyo incondicional que me ha traído a donde estoy ahora.

Al profesor Juan Manuel, el tutor de mi trabajo, por saber guiarme, con mucha paciencia, a través del camino que la investigación puso frente a mí y que estaré dispuesto a seguir recorriendo de ahora en adelante.

A todos los docentes que tuvieron la amabilidad de compartir conmigo parte de su sabiduría y que supieron forjar en mí el criterio ingenieril del que me siento tan orgulloso.

A mi maestro, Andrés, por darme el impulso que necesitaba para comprometerme de corazón con este proyecto, por su consejo y colaboración.

A Diego, por recomendarme al mejor tutor que pude haber tenido y por poner a mi disposición su investigación, en la cual me inspiré para seleccionar el campo de aplicación de este trabajo.

A Paula y Jennifer, por las incontables horas de reflexión que me llenaron de ideas e inspiración, por la motivación que me dieron para seguir adelante y por la revisión cuidadosa de las palabras que están a punto de leer.

No me alcanzarán las palabras para terminar de agradecerles a todos ustedes.

CONTENIDO

Resumen	10
Introducción	11
Capítulo 1. Problema	12
Identificación del problema	12
Descripción del problema	12
Planteamiento del problema	13
Delimitación	14
Delimitación conceptual	14
Delimitación cronológica.....	14
Objetivos	15
Objetivo general.....	15
Objetivos específicos	15
Antecedentes	16
Justificación	22
Capítulo 2. Marco referencial	23
Marco teórico	23
Aguas residuales.....	23
Fuentes de aguas residuales.	24
Caracterización de las aguas residuales.....	24
Clasificación de las aguas residuales.....	26
Tratamiento de las aguas residuales.....	29
Lodos residuales.....	35
Biosólidos.....	40
Control, seguimiento y monitoreo en PTAR.....	42
Marco legal	43
Marco conceptual	46
Capítulo 3. Metodología	50
Uso de lodo residual para base y subbase de carreteras en Brasil	52
Identificación preliminar - Caso 1	52
Caracterización de los materiales utilizados - Caso 1.....	53
Resultados - Caso 1	57
Subbase granular a partir de lodos residuales de PTAR en Ecuador	67
Identificación preliminar - Caso 2	67
Caracterización de los materiales utilizados - Caso 2.....	68
Resultados - Caso 2	70
Empleo de lodo residual en la producción de agregado en Polonia	72
Identificación preliminar - Caso 3	72
Caracterización de los materiales utilizados - Caso 3.....	72
Resultados - Caso 3	74
Lodos residuales mejorados para la construcción de carreteras en Polonia	76
Identificación preliminar - Caso 4	76

Caracterización de los materiales utilizados - Caso 4.....	76
Resultados - Caso 4	79
Capítulo 4. Propuesta de aplicación en Colombia	81
Tratamiento de aguas residuales y caracterización de subproductos en Colombia	81
Comparación de subproductos	84
Propuesta de aplicación.....	88
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones	91
Conclusiones	91
Recomendaciones	92
Bibliografía	94
Anexos	98
Anexo 1. Determinación de la similitud entre lodos residuales	98

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama de Ishikawa Identificación del Problema.....	12
Figura 2. Curvas granulométricas típicas para cenizas de lodos residuales comparadas con los límites granulométricos para capas no ligadas y material de cobertura según normativa de Reino Unido.....	18
Figura 3. Relación entre la proporción de lodo residual empleado y la densidad bulk obtenida en las muestras..	21
Figura 4. Esquema típico de una planta de tratamiento de aguas residuales.....	31
Figura 5. Rejillas empleadas en fases de pretratamiento.....	32
Figura 6. Sistema de tratamiento primario típico.....	33
Figura 7. Diseño metodológico.....	51
Figura 8. Curvas de compactación obtenidas para las mezclas suelo-lodo-aditivo.....	59
Figura 9. Variación del CBR en función de la dosificación en los aditivos.....	60
Figura 10. Módulo resiliente para las mezclas de suelo-lodo residual-aditivos.....	65
Figura 11. Resultados del ensayo de rueda cargada (LWT) en las muestras seleccionadas.....	66
Figura 12. Relación densidad seca y CBR obtenida para la muestra ensayada.....	70
Figura 13. Gráfico del ensayo de compactación en el material ensayado.....	71
Figura 14. Arena de cuarzo y vidrio residual empleados en la manufactura de un material no convencional para formar parte de capas granulares para carreteras.....	77

Lista de tablas

Tabla 1	Efectos de la adición de cenizas de lodo residual en mezclas de base granular	19
Tabla 2	Descripción de las formulaciones de los agregados elaborados	20
Tabla 3	Propiedades físicas y mecánicas de los agregados elaborados	20
Tabla 4	Características de las aguas grises	25
Tabla 5	Caracterización típica de las aguas residuales sin tratamiento previo	26
Tabla 6	Desempeño en eficiencias de remoción para el tratamiento de ARDs	28
Tabla 7	Composición típica de los lodos residuales	38
Tabla 8	Tipos de tratamientos para lodos residuales	39
Tabla 9	Concentraciones máximas permitidas por US EPA para biosólidos clase A	41
Tabla 10	Tipos de base o subbase granular	44
Tabla 11	Requisitos de los agregados para subbases granulares	44
Tabla 12	Requisitos de los agregados para bases granulares	45
Tabla 13	Propiedades de los materiales empleados	54
Tabla 14	Normativa local aplicable a los ensayos mecánicos	57
Tabla 15	Resultados obtenidos del ensayo de CBR en las muestras preparadas y comparación con la normativa colombiana vigente	61
Tabla 16	Resistencia a la compresión inconfiada para muestras de suelo-lodo residual-aditivo	62
Tabla 17	Resistencia a la tracción indirecta para muestras de suelo-lodo residual-aditivo	64
Tabla 18	Clasificación de subbases según granulometría	68
Tabla 19	Propiedades del material empleado en la investigación	69
Tabla 20	Caracterización fisicoquímica del lodo residual proveniente de la PTAR Hajdów	73
Tabla 21	Propiedades físicas y mecánicas de agregados sinterizados	75
Tabla 22	Propiedades del lodo residual empleado	77
Tabla 23	Composición química del polvo de vidrio residual	78
Tabla 24	Composición química de la arena de cuarzo	78
Tabla 25	Propiedades determinadas en el material fabricado	79
Tabla 26	Resistencia a la compresión para diferentes muestras del material fabricado	80
Tabla 27	Composición de los biosólidos obtenidos en la PTAR El Salitre (Bogotá)	81
Tabla 28	Composición de los biosólidos obtenidos en la PTAR San Fernando (Itagüí)	82
Tabla 29	Sistemas de tratamiento de aguas residuales con procesos secundarios en Colombia	84
Tabla 30	Caracterización de los lodos residuales a comparar	85
Tabla 31	Comparación de los lodos estudiados con los lodos obtenidos en Colombia	86
Tabla 32	Cuadro resumen de las metodologías investigadas para base y subbase granular	88
Tabla 33	Resumen de la composición del material obtenido aplicando las metodologías en Colombia	87

Resumen

El presente estudio de investigación pretende aplicar las metodologías identificadas en cuatro países alrededor del mundo en materiales granulares que empleen lodos residuales de PTAR como material de reemplazo parcial, orientados a bases y subbases para vías.

La organización del estudio parte de la caracterización de los agregados, suelos y lodos residuales utilizados en cada metodología, incluyendo sus propiedades fisicoquímicas y composición de partículas.

A continuación, se presentaron los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio efectuados sobre las muestras, junto con su análisis mediante la comparación con la normativa aplicable en cada caso.

Finalmente, se dieron algunas recomendaciones sobre el potencial de aplicabilidad de metodologías similares en el contexto nacional, así como posibles fuentes de materiales y ensayos adicionales necesarios para este efecto.

Palabras clave: aguas residuales, aprovechamiento, base y subbase granular, lodo residual, reutilización, vías terciarias.

Introducción

Desafortunadamente, la gran mayoría de subproductos que se generan en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales - PTAR, simplemente son transportados y dispuestos en rellenos sanitarios sin ser reciclados y/o reutilizados, intensificando así, una problemática que ha venido aquejando con el paso de los años a buena parte del mundo.

Es también un hecho que tanto el sector urbano como el rural se encuentran en un proceso de densificación poblacional acelerado, esto lleva consigo un incremento en el uso diario del agua per cápita, lo cual deriva en una mayor cantidad de subproductos en forma de lodo que se producen al interior de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, sean estos centralizados o descentralizados.

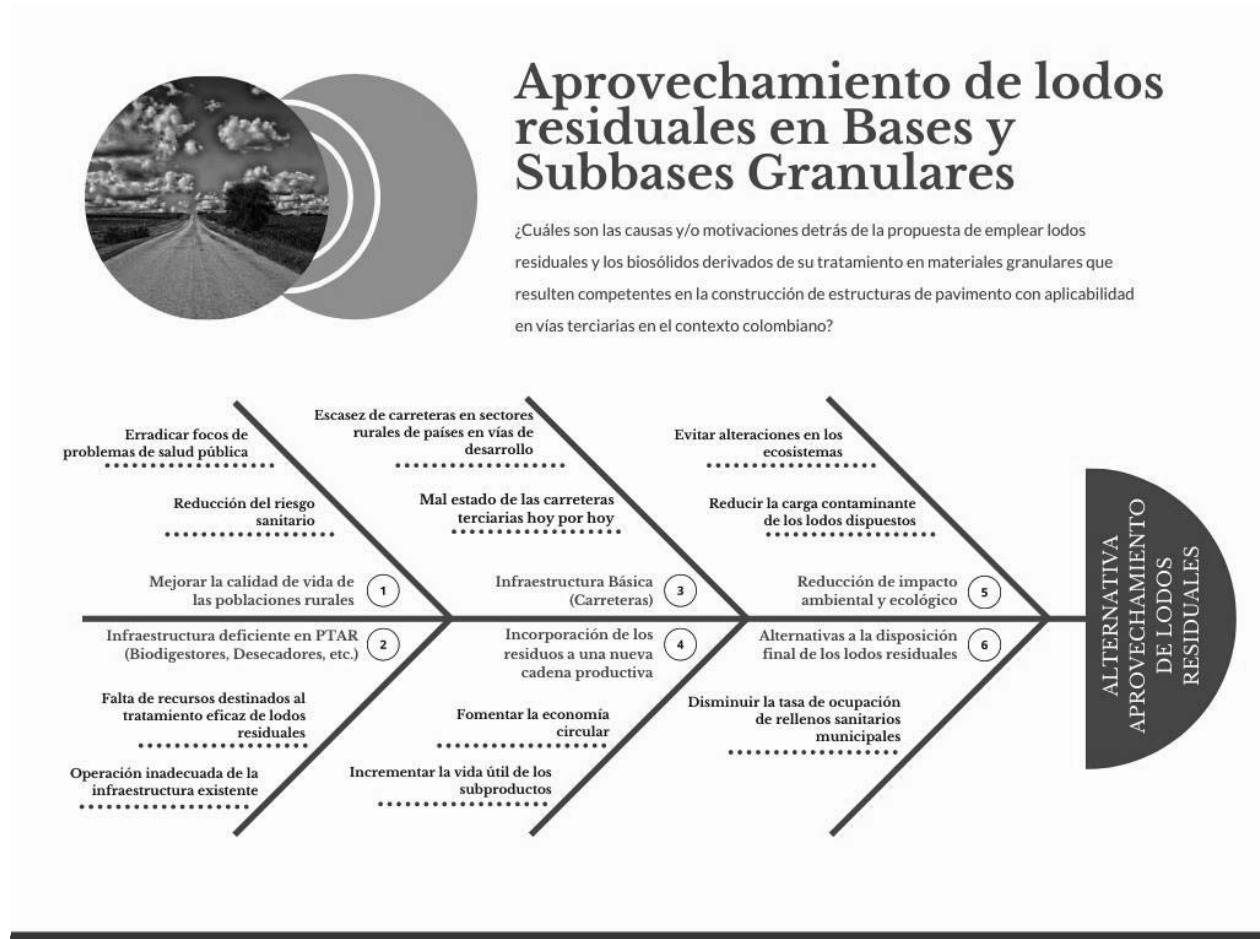
En vista de esta problemática, se busca brindar una alternativa para reutilizar estos subproductos como material de reemplazo parcial en bases y subbases granulares que conformen la estructura de pavimento de las vías terciarias en Colombia, mejorando sus condiciones operativas y generando un impacto positivo en las economías locales.

Capítulo 1. Problema

Identificación del problema

Figura 1.

Diagrama de Ishikawa Identificación del Problema.



Fuente: Propia.

Descripción del problema

Inconvenientes como las alteraciones en los ecosistemas y las consecuentes afectaciones en la salud pública son inherentes al mal manejo de los lodos residuales de las PTAR. Es por esta razón que la ingeniería mundial encuentra un reto desafiante

en la disposición final de este tipo de residuos, debido a que alternativas convencionales como la disposición en vertederos, en el suelo o en fuentes hídricas son costosas y peligrosas (Lucena et al., 2014).

Asimismo, en el aspecto económico está demostrado que el procesamiento de lodos residuales representa cerca del 50% de los gastos operativos en las Plantas de Tratamiento, a pesar de que los mismos constituyen un pequeño porcentaje del volumen total de agua residual tratada (U.S. EPA, 2008).

En vista de esta situación, Colombia, como país en vías de desarrollo, se ve en la necesidad de investigar técnicas alternativas para la reutilización o disposición final de los residuos derivados de los procesos de tratamiento en las PTAR (Ingunza, Junior & Medeiros, 2013).

Por consiguiente, se propone aplicar parte de los lodos producidos en las Plantas de Tratamiento en las bases y/o subbases granulares de las vías terciarias que requieren mejores condiciones de operación, incorporándolos a una nueva cadena productiva y mejorar la calidad de vida de las poblaciones rurales de nuestro país, fortaleciendo su crecimiento económico y dando mayores oportunidades a sus habitantes en materia de salud, educación y empleo.

Planteamiento del problema

¿Constituye la aplicación de lodos residuales de PTAR en bases y subbases granulares para vías terciarias una alternativa técnica, económica y medioambientalmente viable en Colombia?

Delimitación

Delimitación conceptual

Este trabajo de investigación se limita a presentar y analizar los resultados obtenidos a partir de ensayos de California Bearing Ratio – CBR, compactación Proctor estándar, compresión simple, Resistencia a la Tracción Indirecta – RTI, módulo resiliente y deterioro ejecutados en las muestras de los estudios base.

Para este efecto, se comparan estas muestras con la normativa colombiana vigente en el aspecto de especificaciones técnicas para bases y subbases granulares. Estas comparaciones permiten formular recomendaciones para su posible aplicación en vías terciarias.

Delimitación cronológica

El trabajo de investigación contó con una duración aproximada de seis meses comprendidos en la selección de los artículos de investigación base, investigación preliminar, estructuración de la propuesta de aplicación y análisis de resultados.

Objetivos

Objetivo general

Aplicar el estado del conocimiento de lodos residuales en bases y subbases granulares para vías terciarias en Colombia.

Objetivos específicos

- Identificar las metodologías exitosas investigadas en la aplicación de lodos residuales de PTAR en materiales granulares.
- Establecer las propiedades fisicoquímicas tanto de los lodos residuales como de los materiales granulares empleados en la conformación de agregados con potencial de aplicabilidad en bases y subbases granulares.
- Analizar las propiedades físicas y mecánicas resultantes del proceso de reemplazo parcial de materiales granulares con los lodos residuales investigados.
- Proponer la adición de lodos residuales provenientes de PTAR en bases y subbases granulares en Colombia conforme a la normativa vigente.

Antecedentes

A partir del uso doméstico, industrial e institucional del recurso hídrico previamente tratado en una planta de tratamiento de agua potable, la población de diseño destina sus aguas residuales al sistema de alcantarillado, este las recoge y conduce a las plantas de tratamiento de aguas residuales PTAR, las cuales ejecutan un proceso de tratamiento secuencial coordinado con el fin de reducir al máximo la carga contaminante presente en el agua, esta puede ser de carácter físico, químico o microbiológico. Para este efecto, se vale de una infraestructura capaz de sedimentar las partículas sólidas suspendidas, que pasan a generar un subproducto con altas cargas contaminantes y cuya naturaleza tiene el potencial de derivar en problemas de salud pública y riesgo sanitario, este subproducto se conoce como *lodo residual*.

El continente europeo, cuenta con bastante experiencia respecto de la reutilización de lodos residuales en el sector de la construcción. Cuenta de esto se observa en la gran cantidad de publicaciones en libros especializados y artículos de investigación que relacionan información importante en la búsqueda de la producción artificial de agregados ligeros con aplicaciones específicas en la preparación de estructuras de pavimento que requieren menores especificaciones técnicas, como, por ejemplo, las que constituyen las vías terciarias. A continuación, se describen algunas de estas publicaciones:

1. En el libro “Sustainable Construction Materials”, los autores Dhir, R., Ghataora, G., & Lynn, C. Propusieron usos potenciales de cenizas provenientes de lodos residuales como material de relleno en capas de subbase y como material de

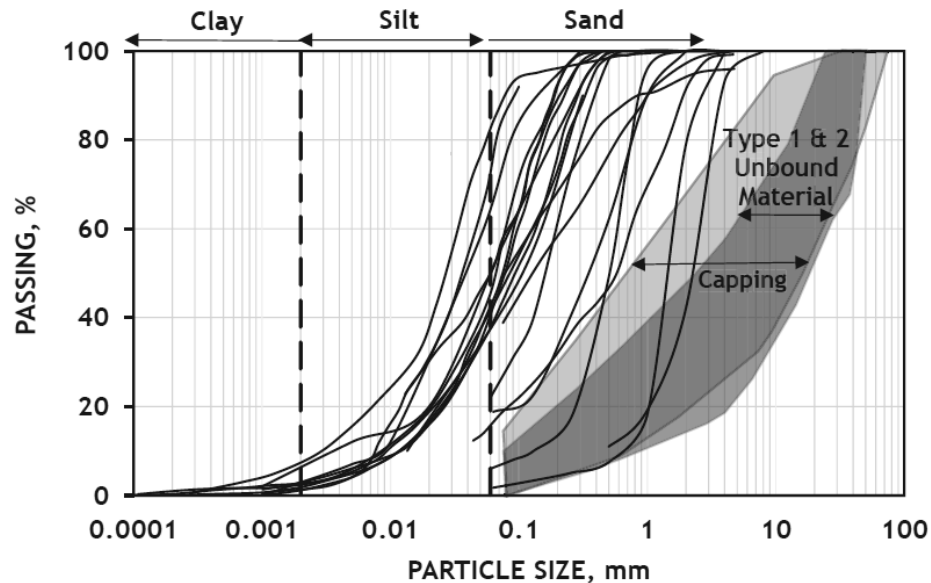
reemplazo parcial en capas de base granular, obteniendo mejoras en el comportamiento mecánico de este tipo de materiales.

De acuerdo con la Figura 2.

Curvas granulométricas típicas para cenizas de lodos residuales comparadas con los límites granulométricos para capas no ligadas y material de cobertura según normativa de Reino Unido., la distribución granulométrica de las cenizas provenientes de la incineración de lodos residuales muestra un predominio de las fracciones de limo y arena fina, tamaños que, por sí mismos no pueden ser tenidos en cuenta para su uso como subbase granular (capa no ligada), teniendo en cuenta que la normativa de Reino Unido “Specification for Highway Works (SHW) Series 800” contempla límites granulométricos estrictos para estas aplicaciones. A pesar de ello, este material podría ayudar a mejorar la granulometría de capas de subbase al usarse como relleno, reduciendo significativamente los espesores de diseño requeridos.

Figura 2.

Curvas granulométricas típicas para cenizas de lodos residuales comparadas con los límites granulométricos para capas no ligadas y material de cobertura según normativa de Reino Unido.



Fuente: Dhir, Ghataora & Lynn, 2017.

De acuerdo con la Tabla 1 la aplicación de estas cenizas en mezclas de base granular, se encontró que su adición en un 15% condujo a mejoras en la densidad seca máxima a humedades de compactación estándar y a incrementos en su capacidad de carga, este comportamiento fue atribuido a la acción de relleno que las cenizas proporcionaron sobre el material de estudio, el efecto fue más evidente cuando se emplearon cenizas previamente pulverizadas.

Tabla 1*Efectos de la adición de cenizas de lodo residual en mezclas de base granular*

Mezcla	SSA [%]	Propiedades de compactación		CBR [%]
		W_{opt} [%]	$\rho_{dm\acute{a}x}$ [g/cm ³]	
Control	0	12.2	1.81	54
SSA (w = 135%)	15	16.4	1.83	107
	30	-	-	43
SSA pulverizada (w = 65%)	15	17.0	1.92	208
	30	18.7	1.85	143
SSA pulverizada (w = 135%)	15	19.9	1.90	-
	30	24.2	1.71	-

Nota. Adaptado de Dhir, Ghataora & Lynn, 2017.

SSA, ceniza de lodo residual (sewage sludge ash); w, contenido de humedad; W_{opt} , humedad óptima; $\rho_{dm\acute{a}x}$, densidad seca máxima.

2. La revista especializada “Materials Today: Proceedings” relaciona la información del artículo de investigación “Reuse of sewage sludge and waste glass in the production of lightweight aggregates” escrito por Bouachera et al., en el cual se justifica la utilización de lodos residuales con residuos de vidrio y arcillas locales de Marruecos en la producción de agregados ligeros.

De acuerdo con la Tabla 2, se planteó evaluar el comportamiento de los agregados compuestos por porcentajes variables de los tres materiales principales (arcillas de la región de Safi (Marruecos), residuos de vidrio y lodos residuales de la PTAR Ben Guerir de Marruecos).

Tabla 2*Descripción de las formulaciones de los agregados elaborados*

Formulación	Temperatura de cocción [°C]	Arcillas de Safi [%]	Lodo residual [%]	Residuos de vidrio [%]
T1	700	70	30	0
T4	1030	40	30	30
T5	900	80	20	0
T6	900	40	30	30

Nota. Adaptado de Bouachera et al., 2021.

* No se contemplan las formulaciones sin lodos residuales en su composición (T2 y T3).

Los resultados obtenidos, consignados en la Tabla 3, muestran una relación inversamente proporcional entre la densidad bulk y la proporción de lodo residual en el agregado formado (ver Figura 3.

Relación entre la proporción de lodo residual empleado y la densidad bulk obtenida en las muestras.). Además de que incrementos en la porosidad de las muestras, contribuyen con el decrecimiento en la resistencia a la compresión de estas, este comportamiento no aplica para la formulación T5, posiblemente explicado por el predominio de arcillas sobre el lodo residual en su composición.

Tabla 3*Propiedades físicas y mecánicas de los agregados elaborados*

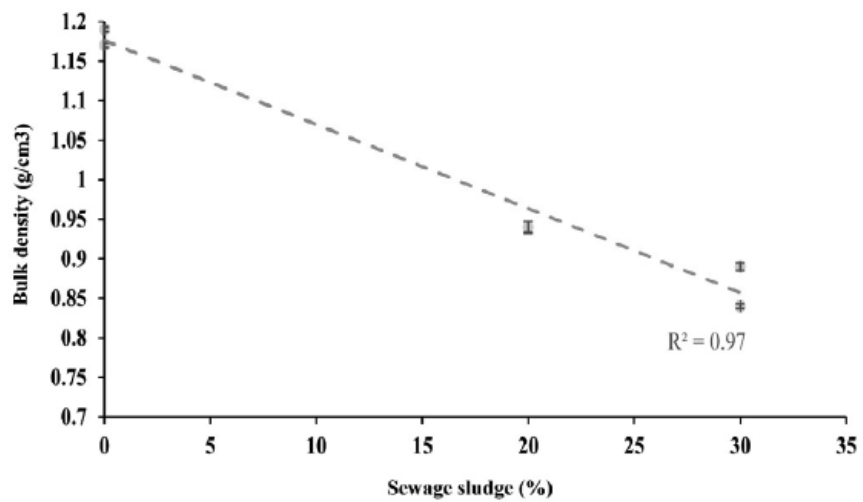
Formulación	Porosidad [%]	Absorción de agua [%]	Densidad bulk [g/cm ³]	Resistencia a la compresión [MPa]
T1	37.6	42.4	0.89	1.35
T4	28.1	33.2	0.84	2.51
T5	36.4	38.9	0.94	2.86
T6	33.3	37.0	0.90	1.56

Nota. Adaptado de Bouachera et al., 2021.

* No se contemplan las formulaciones sin lodos residuales en su composición (T2 y T3).

Figura 3.

Relación entre la proporción de lodo residual empleado y la densidad bulk obtenida en las muestras.



Fuente: Bouachera et al., 2021.

Teniendo en cuenta la densidad bulk y la resistencia a la compresión simple obtenidas, las formulaciones empleadas clasifican como agregados de peso ligero. Sin embargo, hacen falta más investigaciones para asegurar que este tipo de materiales pueden ser empleados en la construcción de carreteras.

Justificación

El presente trabajo tiene como enfoque redescubrir el potencial de los lodos residuales en aplicaciones a la construcción de vías terciarias en Colombia, mediante su reutilización en la mezcla con bases y subbases granulares.

El interés de la investigación parte de la observación de casos exitosos a nivel mundial en el uso de estos lodos residuales en procesos de mejoramiento de materiales para estructuras de pavimento evidenciada en diversos artículos científicos.

Por tanto, se prevé proporcionar alternativas a la forma tradicional en la que se conciben las estructuras de pavimento que conforman la red nacional terciaria, mediante el uso de residuos provenientes del tratamiento de lodos que contribuyen a la reducción de la tasa de ocupación de rellenos sanitarios y evitan su disposición en cuerpos de agua o su almacenamiento por grandes períodos de tiempo.

En definitiva, se busca servir de apoyo a los estudios identificados que justifican el empleo de lodos residuales en el sector de la construcción de carreteras mediante la búsqueda de artículos de investigación.

Capítulo 2. Marco referencial

Marco teórico

Aguas residuales.

Son aguas residuales las generadas a partir de actividades humanas cotidianas. Estas actividades incluyen el aseo, la preparación de alimentos, el funcionamiento de toillettes y el saneamiento básico en general. Con el fin de asegurar un tratamiento adecuado (sea este de carácter convencional o descentralizado) se hace indispensable conocer a fondo las características fisicoquímicas y microbiológicas que estas adquieren como resultado de contaminación cruzada con aguas residuales provenientes de diferentes fuentes (Romero, 2004).

Es de gran importancia dedicar sistemas robustos para el tratamiento de este tipo de aguas por las problemáticas directas que se generan hacia el medio ambiente y, por consiguiente, a las propias actividades humanas como resultado de la práctica de tratamientos indebidos o insuficientes. Algunas de estas problemáticas incluyen la contaminación de las fuentes hídricas con materia orgánica, nutrientes y microorganismos; el principal efecto de la contaminación radica en el agotamiento del *oxígeno disuelto* OD, el cual deriva en fenómenos de eutrofización que contribuyen en gran medida al aumento de la tasa de mortalidad en especies de peces y vegetación y por consiguiente, en problemas de salud pública que se generan a partir de la ingesta de agua o especies contaminadas, además de la alteración en los ecosistemas.

Fuentes de aguas residuales.

El origen de las aguas residuales y su causalidad varía en función del uso previo dado al agua potable o segura, aunque también en la forma en que el agua se incorpora a la red de alcantarillado sanitario. En este sentido son fuentes generadoras de aguas residuales las residencias, los edificios comerciales e institucionales, entre otros; también se incorporan a la red de alcantarillado sanitario aguas de infiltración, aguas provenientes de conexiones erradas, las aguas combinadas entre las cuales se encuentran las aguas lluvias captadas en períodos secos, mientras que en períodos lluviosos se ejecuta una desviación de caudales de exceso y parte de las descargas industriales las cuales se incorporan previa separación y pretratamiento efectuado individualmente por cada ente generador (industrias, fábricas o factorías industrializadas). A este conjunto se le denomina aguas residuales y se les da tratamiento en una planta de tratamiento de aguas residuales PTAR.

Caracterización de las aguas residuales.

La composición de las aguas residuales depende en gran medida de su fuente generadora, entre las cuales se encuentran las residencias o fábricas. Para las aguas que se consideran grises esta composición varía en función de la actividad doméstica que se desarrolla en la vivienda.

De manera general, las aguas consideradas grises contienen menores concentraciones de materia orgánica y nutrientes como el fósforo P, nitrógeno N, fosfato PO_4 o nitrato NO_3 respecto a las aguas residuales debido a que la contaminación cruzada con heces, orina o papel de baño no es tomada en cuenta para su clasificación como tal (Eriksson et al., 2002).

Tabla 4*Características de las aguas grises*

	Tipo de agua gris			
	Ducha/bañera	Baño	Lavandería	Cocina
<i>Propiedades físicas</i>				
Temperatura [°C]	29	-	32	27
Turbiedad [UNT]	92	60-240	-	-
SST ^a	120	-	280	720
<i>Propiedades químicas</i>				
pH	7.6	6.4-8.1	-	-
Dureza [CaCO ₃]	-	-	-	-
Alcalinidad [CaCO ₃]	-	24-43	-	-
COT ^b	100	-	880	-
DBO ₅ ^c	170	76-200	380	1450
<i>Nutrientes</i>				
P Total	2	0.11-0.18	57	74
N Total	17	-	21	74
NO ₃ -N	0.4	-	0.6	0.3
PO ₄ -P	1	-	15	31
<i>Propiedades microbiológicas</i>				
Coliformes totales	70 - 8200	500 - 2.4x10 ⁷	85 - 890000	-

Nota. Adaptado de Eriksson et al., 2002.

^a Sólidos Suspendidos Totales; ^b Carbono Orgánico Total; ^c Demanda Bioquímica de Oxígeno.

El registro de la caracterización de las aguas residuales se ha llevado históricamente con las aguas residuales domésticas ARD, que tienen la mayor representación en cuanto al tipo de aguas residuales captadas y transportadas mediante el sistema de alcantarillado que tenga lugar en la población objetivo.

Algunas de las características más importantes en las aguas residuales domésticas son:

Tabla 5*Caracterización típica de las aguas residuales sin tratamiento previo*

Componente	Rango concentración	Concentración típica
<i>Propiedades físicas</i>		
SST [mg/L]	155 – 330	250
<i>Propiedades químicas</i>		
pH	6.0 – 9.0	6.5
DBO ₅ [mg/L]	155 – 286	250
<i>Nutrientes</i>		
NH ₄ -N [mg/L]	4 – 13	10
NO ₃ -N [mg/L]	<1	<1
N Total [mg/L]	26 – 75	60
P Total [mg/L]	6 – 12	10
<i>Propiedades microbiológicas</i>		
Coliformes totales [UFC/100mL] ^a	10 ⁸ – 10 ¹⁰	10 ⁹
Coliformes fecales [UFC/100mL]	10 ⁶ - 10 ⁸	10 ⁷

Nota. Adaptado de Gross, 2005.^a Unidades Formadoras de Colonias por 100 mL.***Clasificación de las aguas residuales.***

A pesar de que en el contexto nacional se evidencia un uso extendido de sistemas combinados de alcantarillado, resulta conveniente establecer una clasificación concreta de las aguas residuales que se transportan por este medio hacia las PTAR, las cuales deberán garantizar condiciones mínimas de seguridad en el aspecto fisicoquímico y microbiológico de las aguas que serán devueltas a las fuentes hídricas, además de separar y dar disposición a los lodos obtenidos a partir de los procesos de sedimentación primaria y secundaria.

Aguas residuales domésticas. Son las aguas de origen residencial a las cuales se les ha dado un uso específico en actividades del hogar, entre las cuales se encuentra el lavado de ropas o la descarga de inodoros. En el sentido estricto de la palabra, se pueden considerar como aguas domésticas a las aguas provenientes de instituciones como escuelas, universidades, hoteles, cárceles, etc.

Las eficiencias de remoción de DBO_5 , nutrientes y sólidos suspendidos totales SST dependen ampliamente del mecanismo utilizado para efectuar el tratamiento que se realiza sobre las aguas residuales domésticas. El desempeño del tipo de tratamiento empleado para tratar las ARD_s viene dado en función de rangos promedio de remoción de estos parámetros, guardando independencia de la modalidad utilizada (tratamientos centralizados y no centralizados):

Tabla 6*Desempeño en eficiencias de remoción para el tratamiento de ARDs*

Tratamiento	Referencia	Eficiencias de remoción (%)				
		SST	DBO	N	P	Coliformes
Tratamiento primario avanzado	<i>Torres et al., 2005</i> <i>Tsukamoto, 2002</i>	73 - 84	46 - 70	<30	75 - 90	80 - 90
Reactor RAFA	<i>Torres, 2001</i>	60 - 80	60 - 70	10 - 25	10 - 20	60 - 90
Lodo activado convencional	<i>Von Sperling, 1996</i>	80 - 90	85 - 93	30 - 40	30 - 45	60 - 90
Filtro biológico	<i>Von Sperling, 1996</i>	85 - 95	85 - 93	30 - 40	30 - 45	60 - 90
Tanque séptico	<i>Batalha, 1989</i>	50 - 70	40 - 62	< 10	< 10	< 60
Tanque séptico – filtro anaerobio – humedal de flujo subsuperficial	<i>Madera et al., 2005</i>	81 - 88	71 - 82	15	15	74 - 96

Nota. Adaptado de Silva, Torres & Madera, 2008.

RAFA (Reactor anaerobio de flujo ascendente); DBO, demanda bioquímica de oxígeno; N, nitrógeno; P, fósforo.

Aguas residuales industriales. Son consideradas como aguas residuales industriales aquellas cuyo origen esté dado por actividades comerciales, de manufactura o prestación de servicios especiales como la lavandería o la confección de textiles. En algunos casos, las aguas industriales son tratadas de manera separada y exclusiva antes de ser dispuestas hacia la red de alcantarillado municipal por medio de plantas de tratamiento incorporadas en la industria o fábrica, esto depende de la envergadura de la empresa u organización que genere este tipo de aguas y la regulación distrital, municipal o nacional al respecto.

Aguas residuales urbanas. Las aguas residuales urbanas obtienen su nombre debido a que, como producto de la precipitación, arrastran sólidos contaminantes de los techos y vías. Estas aguas de escorrentía posteriormente son recolectadas en alcantarillas dispuestas en vías públicas y canales a cielo abierto (conocidos como caños).

Para ejecutar la recolección de las aguas residuales se pueden disponer de redes de alcantarillado separadas tanto para aguas residuales urbanas como para aguas residuales comerciales, domésticas e industriales. Otra opción radica en disponer de redes de *alcantarillado combinado*, cuya operación toma parte en el funcionamiento de las plantas de tratamiento (Romero, 2004).

Tratamiento de las aguas residuales.

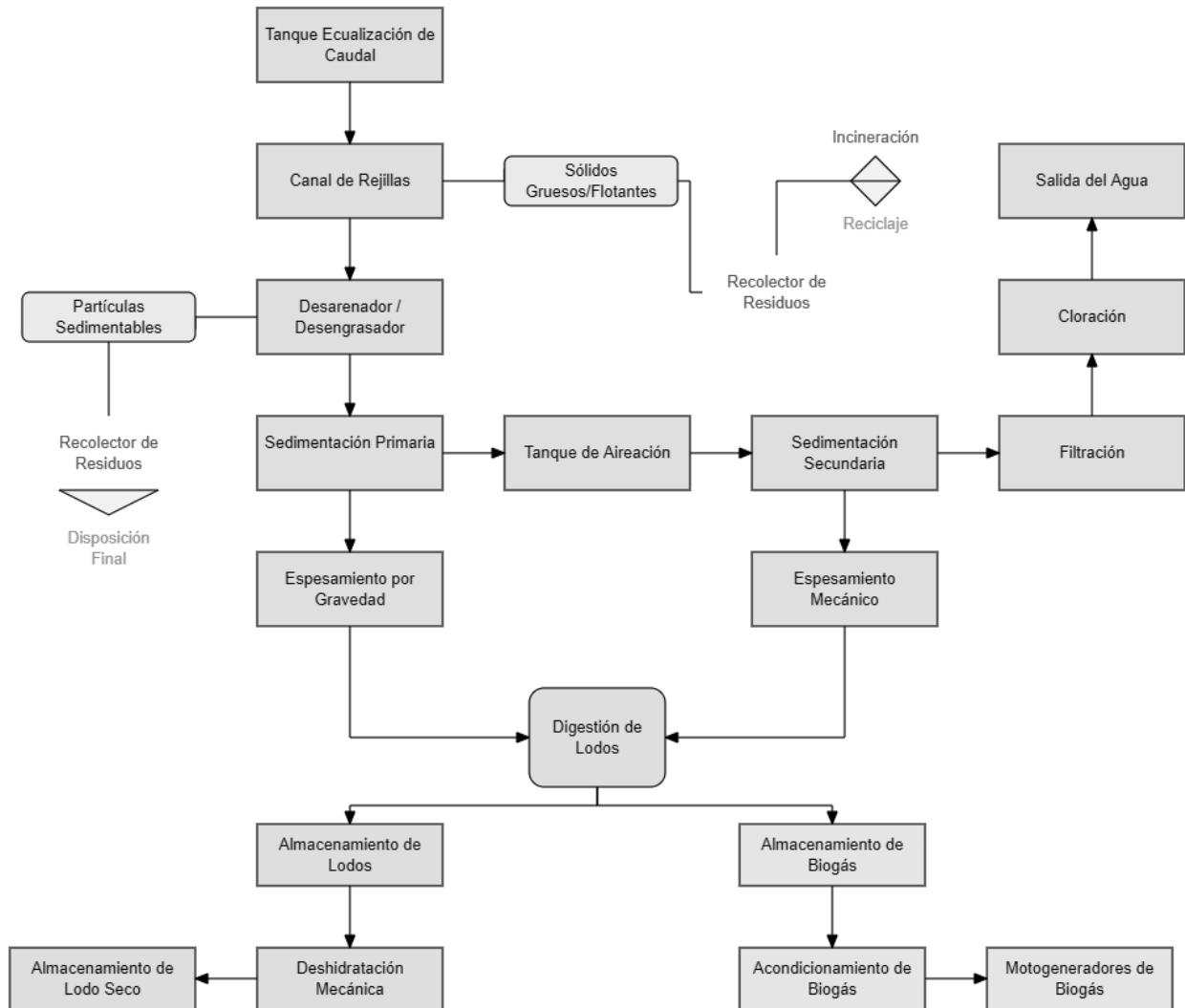
El proceso de tratamiento de las aguas residuales parte de la entrada de aguas sin tratamiento previo a la PTAR; una vez allí, se efectúan controles mediante el monitoreo de diversos parámetros de calidad del agua tales como DBO₅, DQO, OD, etc. Para

posteriormente efectuar un conjunto de operaciones unitarias que entre sí conforman grupos de procesos que incorporan tratamiento físico, químico y/o biológico (Muñoz, 2008). Finalmente se retorna a su curso natural un efluente tratado que cumple con los límites máximos permisibles LMP_s establecidos por el ente regulador de cada país en función de eficiencias de remoción de materia orgánica, nutrientes y microorganismos.

A pesar de la recurrencia de sistemas de tratamiento centralizados a nivel mundial, el contexto rural colombiano amerita la implementación de sistemas descentralizados que garanticen un tratamiento óptimo a las aguas residuales de comunidades con menores capacidades económicas, menores caudales de aguas servidas y menores áreas disponibles para la construcción de sistemas robustos de tratamiento. Es por esta razón que se deben incorporar a la discusión del tratamiento de aguas residuales mecanismos como letrinas, campos de infiltración o tanques sépticos.

Figura 4.

Esquema típico de una planta de tratamiento de aguas residuales.



Fuente: Elaboración propia a partir del esquema básico de la PTAR de Bello, Antioquia.

Las plantas de tratamiento convencionales cuentan con diversas líneas de tratamiento (línea de aguas, línea de lodos y línea de gases) en función del sistema de tratamiento más avanzado que se efectuó en estas (primario, secundario o terciario).

En las PTAR se pueden agrupar los procesos unitarios de tratamiento en diversos subconjuntos, dentro de los cuales se encuentran:

Pretratamiento. El objetivo principal que se tiene en la fase de pretratamiento es el de eliminar del influente la mayor cantidad de materia gruesa que pueda afectar al funcionamiento de la infraestructura en procesos subsecuentes (tuberías, bombas y equipos en general) y, por consiguiente, a su rendimiento, lo que disminuye la calidad del efluente que pasará a los sedimentadores primarios (Muñoz, 2008).

El conjunto de operaciones unitarias que conforman la fase de pretratamiento está conformado por rejillas o grupos de rejillas y desarenadores que pueden estar complementados con sistemas de remoción de grasas, esto depende de la calidad del influente o de los procesos primarios subsecuentes disponibles en la PTAR. En algunos casos, la remoción de grasas y aceites presentes en el agua residual se efectúa en los sedimentadores primarios mediante el mecanismo de flotación.

Figura 5.

Rejillas empleadas en fases de pretratamiento.

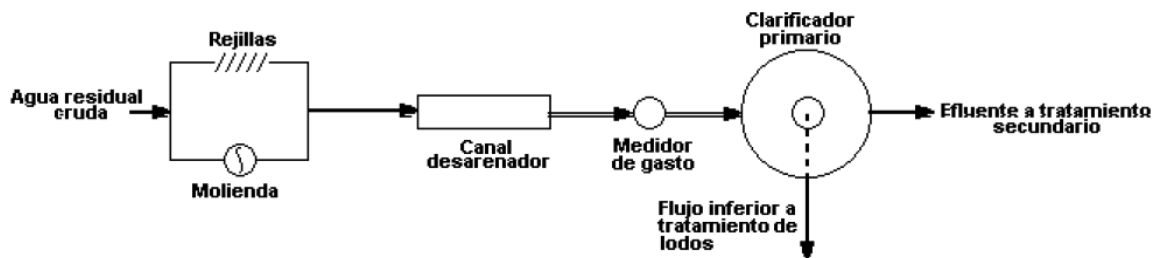


Fuente: Temmisa, s.f.

Tratamientos primarios. Inmediatamente después de la fase de pretratamiento, el agua residual requiere de un tratamiento fisicoquímico que sea capaz de sustraer por sedimentación los sólidos suspendidos orgánicos con los que esta cuenta. Para lograr esto, se realiza una decantación de los sólidos suspendidos en un tanque de sección circular o rectangular denominado *sedimentador primario*. El proceso llevado a cabo en los sedimentadores primarios de una PTAR permite extraer mediante colectores mecánicos entre el 40 y el 65% de estos sólidos que por diferencia de densidad se ubican en el fondo del sedimentador en forma de *lodos primarios* (Valdez & Vázquez, 2003).

Figura 6.

Sistema de tratamiento primario típico.



Fuente: Valdez y Vázquez, 2003.

Si bien la naturaleza típica de los sólidos orgánicos suspendidos en el agua no amerita la utilización de coagulantes químicos que favorezcan la floculación de estas partículas en el tratamiento primario, el uso de este tipo de agentes podría verse justificado por la caracterización previa que se haga del agua residual en tratamiento.

En caso de ser necesario, las grasas o aceites que puedan venir mezclados con el agua residual se pueden remover por flotación en los sedimentadores o clarificadores primarios.

Tratamientos secundarios. Teniendo en cuenta la regulación colombiana al respecto, los tratamientos secundarios para aguas residuales se caracterizan por eficiencias mínimas de remoción de DBO₅ del 65%, DQO de 55% y SST de 60%.

De esta manera, el propósito final de un tratamiento secundario convencional es el de oxidar la demanda bioquímica de oxígeno que sobrepasa los tratamientos primarios y contribuir a una mejor eliminación de los sólidos suspendidos en el agua residual (Davis, 2010).

Dentro del contexto nacional se contemplan los siguientes mecanismos para efectuar el tratamiento secundario de las aguas residuales:

1. Reactor anaerobio de flujo ascendente RAFA.
2. Lagunas facultativas.
3. Lagunas aireadas.
4. Reactores anaerobios RAP.
5. Filtros anaerobios.
6. Sistemas de lodos activados.
7. Filtros percoladores de alta tasa.

La justificación en la adopción de uno de estos mecanismos en la infraestructura de cualquier PTAR se basa principalmente en disponibilidades tecnológicas, de área y de personal. Lo anterior basado en la necesidad que se tenga para el tratamiento de acuerdo con la caracterización previa de las aguas residuales.

Tratamientos terciarios. La necesidad de implementar en una PTAR algún tipo de infraestructura adicional que permita ir más allá de las eficiencias de remoción alcanzadas con un tratamiento secundario se basa en la identificación de algunas de las siguientes problemáticas (Davis, 2010):

1. Incrementos significativos de la carga orgánica debidos a incrementos demográficos no previstos.
2. La necesidad de mejorar la remoción de sólidos suspendidos para efectuar una mejor desinfección en procesos posteriores.
3. La necesidad de eliminar de manera más eficiente nutrientes que favorezcan la eutrofización de cuerpos de agua.
4. La necesidad de eliminar componentes que impiden la recuperación natural de los cuerpos de agua en los cuales se dispone el efluente tratado.

A pesar de lo establecido, la normativa nacional no contempla la necesidad de llegar a altas eficiencias en la remoción de nutrientes, es por esta razón que en Colombia no hay plantas de tratamiento de aguas residuales municipales que ejecuten tratamientos terciarios. Sin embargo, se identifican algunos mecanismos aplicados con finalidades diferentes a las del tratamiento de aguas residuales. Tal es el caso del Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo, ubicado en el departamento de Cundinamarca, el cual realiza tratamiento de lixiviados con la ayuda de un sistema de membranas de nanofiltración, clasificado dentro de los mecanismos de tratamiento terciario.

Lodos residuales.

Los lodos que se generan a partir del tratamiento de aguas residuales en PTAR son el producto de la concentración, floculación y sedimentación de los sólidos suspendidos

y disueltos contenidos en el influente de tratamiento, dentro de su composición encontramos altos contenidos de materia orgánica, agentes microbiológicos (microorganismos), nutrientes y metales pesados (Amador, Veliz & Bataller, 2015).

A pesar de una presencia significativa de proteínas, nutrientes y grasas en algunos casos, el agua es el componente principal en su composición. De esta forma los lodos residuales deben tratarse dentro de las PTAR para reducir su contenido de agua mediante procesos de recirculación en sistemas de lodos activados convencionales o modificados (oxidación avanzada o Bardenpho 5 etapas), aunque también a través de tratamientos físico – químicos, microbiológicos y deshidratación, generando de esta forma lodos estabilizados y biosólidos derivados de este tipo de tratamiento.

Caracterización de lodos residuales. De acuerdo con el proceso de tratamiento realizado a los lodos residuales, se evidencian variaciones en su composición y en su contenido de metales pesados, nutrientes y sólidos suspendidos volátiles (García, 2006).

Los lodos primarios son los lodos provenientes del tratamiento más básico que se ejecuta en la PTAR, el cual contempla el paso de las aguas residuales por rejillas y canales desarenadores para concluir con una sedimentación primaria que se ejecuta en sedimentadores o clarificadores de sección circular o cuadrada dónde se separa el lodo de las aguas residuales, este lodo se conduce hacia la línea de lodos que maneje la PTAR.

Los lodos secundarios proceden del tratamiento biológico realizado en reactores, este proceso se ejecuta en las aguas clarificadas en sedimentadores primarios, a

continuación, se conducen a un segundo sedimentador o clarificador, en donde se destina nuevamente el lodo residual obtenido a la línea de lodos de la planta.

La clasificación de los lodos generados en una PTAR varía de acuerdo con la composición de las aguas residuales que los originan y la etapa o el proceso de tratamiento en la cual se separa y extrae hacia la respectiva línea de lodos. Con base en lo anterior pueden incluirse en los lodos primarios los provenientes de desarenadores, rejillas y clarificadores primarios; en los lodos secundarios los generados a partir de tratamiento biológicos como la digestión y clarificación secundaria; y dentro de los lodos terciarios los producidos en plantas de ablandamiento previo tratamiento con agentes floculantes (Romero, 2004).

Algunos de los componentes que caracterizan a los lodos residuales en función del tratamiento que se les proporciona son (García, 2006):

Tabla 7*Composición típica de los lodos residuales*

Parámetros	<i>Lodos primarios</i>	<i>Lodos secundarios</i>	<i>Lodos digeridos</i>
pH	5.5 - 6.5	6.5 - 7.5	6.8 - 7.6
Contenido de agua [%]	92 - 96	97.5 - 98	94 - 97
SSV [%]	70 - 80	80 - 90	55 - 65
Grasas [%]	12 - 14	3 - 5	4 - 12
Proteínas [%]	8 - 10	6 - 8	5 - 8
Nitrógeno [%]	2 - 5	1 - 6	3 - 7
Fósforo [%]	0.5 - 1.5	1.5 - 2.5	0.5 - 1.5
Bacterias patógenas [NMP/100mL]	103 - 105	100 - 1000	10 - 100
Metales pesados (Cu, Pb, Zn, entre otros) [%]	0.2 - 2	0.2 - 2	0.2 - 2

Nota. Adaptado de Hernández, 1992.

Tratamiento de lodos residuales. El tratamiento de los lodos residuales generados a partir de una población se tiene como uno de los factores fundamentales para la correcta gestión y funcionamiento de una PTAR, en este sentido se hace indispensable estabilizarlos para otorgar seguridad al momento en que estos sean dispuestos o utilizados con fines constructivos o urbanísticos (Amador, Veliz & Bataller, 2015).

Tratamientos como el espesamiento, la estabilización compuesta por digestión aerobia o anaerobia, la deshidratación, el secado, la desinfección con agentes químicos y el almacenamiento o disposición final hacen parte del conjunto de procesos que se llevan a cabo en la línea de lodos de una PTAR convencional. La inclusión de los tratamientos antes mencionados debe estar justificada con estudios de laboratorio en

los que se demuestre que las características de los lodos producidos ameritan tal tratamiento.

Tabla 8

Tipos de tratamientos para lodos residuales

Tratamiento	Definición	Efecto en los lodos
Sedimentación	Separación de gran parte de los sólidos suspendidos en el agua residual efectuada bajo acción de la gravedad	Concentra y consolida el lodo como tal.
Digestión	Estabilización biológica del lodo dada por la acción de microorganismos que consumen la materia orgánica presente en este.	Reduce la carga microbiológica biodegradable y los patógenos.
Acondicionamiento	Coagulación de los sólidos remanentes para facilitar el secado de los lodos.	Facilita la aglomeración de los sólidos.
Deshidratación	Eliminación del agua remanente en los lodos.	Facilita el manejo y disposición de los lodos.
Compostaje	Estabilización biológica aeróbica y termofílica.	Disminuye la actividad biológica.

Nota. Adaptado de Amador, Veliz & Bataller, 2015.

Disposición final de lodos residuales. Posterior a su almacenamiento, la literatura contempla principalmente dos grandes métodos para disponer el lodo residual tratado. Partiendo del hecho de que los lodos residuales son un subproducto rico en nutrientes, y su contenido de materia orgánica no alcanza a ser eliminado por completo en los procesos de tratamiento, alternativas como la disposición en el suelo o en rellenos de lodos cumplen con la fase final a la cual las plantas de tratamiento apuntan en su funcionamiento (Romero, 2004).

La disposición de los lodos en el suelo se justifica ante la creciente regulación respecto de la disposición de estos en el mar. Por otra parte, alternativas como la

incineración o colocación en rellenos aptos adolece de altos costos en materia de transporte y tecnología. Por estas razones, la disposición sobre un suelo apto para aprovechar los componentes del lodo, además de contribuir con la economía circular y el cuidado medioambiental, constituye en sí un gran atractivo en los sectores de la agricultura y ganadería. Algunas de las metodologías más empleadas en el aprovechamiento de los lodos recurren al esparcimiento, inyección o riego directamente sobre suelos alterados o destinados a la agricultura (Romero, 2004).

En lo que respecta a la disposición en vertederos o rellenos especializados, se evidencian algunas desventajas medioambientales, aunque esta será una opción válida en los casos que se requiera. Algunos de los inconvenientes que presentan los vertederos o rellenos se basan en la exigencia que requiere su diseño y construcción, además de la ineludible producción de lixiviados y potencial contaminación de fuentes de agua subterráneas, por no mencionar la necesidad de inversiones significativas en la adquisición y acondicionamiento de grandes extensiones de terreno (Ayala, 2020).

Biosólidos.

Los biosólidos resultan del tratamiento efectuado a lodos residuales generados en una PTAR. Su composición refleja un porcentaje en peso de sólidos que oscila entre 0.2% a 0.25%. Estos procesos comprenden la digestión aeróbica o anaeróbica, estabilización alcalina, secado térmico, oxidación o desinfección ácida (Collivignarelli et al., 2019).

Los biosólidos son compuestos con un alto potencial de aprovechamiento en la recuperación y tratamiento de suelos degradados, en la revegetalización del paisajismo urbano y en el sector de la construcción como material de insumo en la conformación

de elementos constructivos o materiales granulares (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2014).

En los biosólidos se hacen distinciones con respecto a su calidad en lo que respecta a las concentraciones de microorganismos presentes en ellos, con el objetivo de limitar la potencial exposición a la comunidad. De acuerdo con la *Environmental Protection Agency [US EPA]* los biosólidos se clasifican en:

Biosólidos clase A. Son los biosólidos de mejor calidad por cuanto han pasado por procesos rigurosos de desinfección que garanticen valores menores a los máximos permisibles por *US EPA*; estos biosólidos pueden ser valorados como no infecciosos.

Sus aplicaciones se extienden a cualquier uso justificado con previo examen de concentraciones de coliformes fecales y salmonella (Araque, 2006).

Tabla 9

Concentraciones máximas permitidas por US EPA para biosólidos clase A

Parámetro	Norma EPA 40 CFR 503
Coliformes fecales [UFC/g] Base Seca	< 1.0×10^3
Salmonella [NMP/4g] Base Seca	< 3.0
Enterovirus [PFP/4g] Base Seca	< 1.0
Huevos de helminto [HV/4g] Base Seca	< 1

Nota. Adaptado de Araque Manrique, 2006.

UFC. Unidades formadoras de colonia. **NMP.** Número más probable. **PFP.** Partículas formadoras de placa. **HV.** Huevo viable.

Biosólidos clase B. La principal característica que diferencia los biosólidos clase A de la clase B es el hecho de que los parámetros microbiológicos establecidos en la tabla 9 pierden relevancia salvo por los coliformes fecales, cuya concentración deberá ser menor a 2.0×10^6 UFC/g en base seca. Sus aplicaciones se limitan a terrenos agrícolas y no agrícolas con su respectiva justificación y siempre necesitando un monitoreo regular durante edades tempranas.

Uso de biosólidos en la construcción de carreteras. Se han efectuado estudios de viabilidad en cuanto a la aplicación de biosólidos en la conformación de bases granulares y como material de relleno en terraplenes de carreteras como material sustitutivo de algunas materias primas. De la misma manera, investigaciones acerca de las propiedades mecánicas de estos materiales reflejan comportamientos aceptables ante esfuerzos de corte, capacidades de compactación y el comportamiento elastoplástico característico de los materiales de construcción (Collivignarelli et al., 2019).

Estas propiedades mecánicas se ven incrementadas en gran medida empleando procesos de estabilización de los biosólidos mediante adiciones de cemento, cal o emulsiones asfálticas (Lucena, et al., 2014).

Control, seguimiento y monitoreo en PTAR.

Paralelamente a la operación de cada uno de los procesos unitarios en las PTAR, por lo general se realizan actividades de monitoreo y caracterización al interior de la línea de aguas o de lodos. Estas actividades registran variables como caudales, dosis,

niveles, presiones, temperaturas, tiempos entre otras; una caracterización básica de los subproductos obtenidos debería analizar las siguientes variables asociadas:

- a) Agua tratada. Alcalinidad, conductividad, DBO5, DQO, pH, SST, SSV.
- b) Lodo primario. pH, SST.
- c) Lodo espesado. pH, ST, SV.
- d) Lodo digerido. Alcalinidad, pH, ST, SV, entre otros.
- e) Lodo para deshidratar. pH, ST, SV.
- f) Biosólido. Densidad, humedad, sequedad.
- g) Aguas filtradas de deshidratación. SST.

Marco legal

Con la finalidad de evaluar la viabilidad de los materiales presentados en los estudios de apoyo para conformar materiales granulares y disponerlos en las estructuras de pavimento en Colombia, se hará referencia a lo contenido en el capítulo 3 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, publicadas por el Instituto Nacional de Vías [INVIAS] en lo concerniente a subbases y bases.

En primera instancia se clasifican las bases y subbases granulares a partir del nivel de tránsito esperado en la carretera a construir:

Tabla 10*Tipos de base o subbase granular*

Clase de base o subbase granular	Nivel de tránsito	Ejes equivalentes 8.2 Ton
Clase C	NT1	< 500.000
Clase B	NT2	500.000 – 5.000.000
Clase A	NT3	> 5.000.000

Nota. Adaptado de INVIAS, Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, Art.320.

Teniendo en cuenta la información de la tabla 10, el enfoque estará dirigido a la aplicación de lodos residuales de PTAR en bases y subbases granulares de Clase C.

Tabla 11*Requisitos de los agregados para subbases granulares*

Característica	Norma ensayo	Subbase granular		
		Clase C	Clase B	Clase A
<i>Dureza</i>				
Desgaste en máquina de los Ángeles, máx. [%]	E-218	50	50	50
Degradación por abrasión en Micro-Deval, máx. [%]	E-238	-	35	30
<i>Durabilidad</i>				
Pérdida de solidez en sulfatos, máx. [%]				
Sulfato de sodio	E-220	12	12	12
Sulfato de magnesio		18	18	18
<i>Limpieza</i>				
Límite líquido, máx. [%]	E-125	25	25	25
Índice de plasticidad, máx. [%]	E-125 y E-126	6	6	6
Equivalente de arena, mín. [%]	E-133	25	25	25
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máx. [%]	E-211	2	2	2
<i>Resistencia del material</i>				
CBR [%]	E-148	30	30	40

Nota. Adaptado de INVIAS, Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, Art.320.

Tabla 12*Requisitos de los agregados para bases granulares*

Característica	Norma ensayo	Subbase granular		
		Clase C	Clase B	Clase A
<i>Dureza</i>				
Desgaste en máquina de los Ángeles, máx. [%]				
500 revoluciones	E-218	40	40	35
100 revoluciones		8	8	7
Degradación por abrasión en Micro-Deval, máx. [%]	E-238	-	30	25
Evaluación de resistencia mecánica por método 10% finos				
Valor en seco, mín. [kN]	E-224	-	70	90
Relación húmedo/seco, mín. [%]		-	75	75
<i>Durabilidad</i>				
Pérdida de solidez en sulfatos, máx. [%]				
Sulfato de sodio	E-220	12	12	12
Sulfato de magnesio		18	18	18
<i>Limpieza</i>				
Límite líquido, máx. [%]	E-125	25	-	-
Índice de plasticidad, máx. [%]	E-125 y E-126	3	0	0
Equivalente de arena, mín. [%]	E-133	30	30	30
Valor de azul de metileno, máx.	E-235	10	10	10
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable, máx. [%]	E-211	2	2	2
<i>Geometría de partículas</i>				
Índices de alargamiento y aplanamiento, máx. [%]	E-230	35	35	35
Caras fracturadas, mín. [%]				
Una cara	E-227	50	70	100
Dos caras		-	50	70
Angularidad de la fracción fina, mín. [%]	E-239	-	35	35
<i>Resistencia del material</i>				
CBR [%]	E-148	≥ 80	≥ 80	≥ 95

Nota. Adaptado de INVIAS, Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, Art.320.

Marco conceptual

a) Agregado

También llamados *agregados pétreos*, es un material conformado por arenas, gravas o fragmentos de rocas provenientes de procesos de erosión o trituración con la granulometría apropiada para su uso en los firmes de las carreteras, comúnmente se mezclan con aglomerantes de activación hidráulica para dar continuidad y homogeneidad a las capas de material subyacente a la capa asfáltica.

b) Base granular

Superficie de suelo preparada sobre la que se construye un cimiento o pavimento.

c) Biosólido

Subproducto obtenido a partir de la estabilización y tratamiento de los lodos generados a través del tratamiento de las aguas residuales municipales. Su uso se encuentra regulado teniendo en cuenta su composición y caracterización fisicoquímica y microbiológica (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2014).

d) Cal

Sustancia alcalina que al adicionar agua se hidrata o apaga y que al mezclarse con arena forma mortero.

e) Consistencia

Propiedad que determina la firmeza con la que se unen los materiales de un suelo, así como su resistencia ante la deformación.

f) Curado

Mantener el hormigón o el mortero a una temperatura y humedad adecuadas para asegurar su hidratación y endurecimiento óptimos.

g) Demanda bioquímica de oxígeno DBO5

Indicador que mide el contenido de materia orgánica biodegradable como resultado de la cantidad de oxígeno empleada por los microorganismos para degradar la materia orgánica carbonácea y nitrogenada pasados 5 días a una temperatura de 20 °C.

h) Demanda química de oxígeno DQO

Indicador que permite determinar la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente la materia orgánica presente en el agua residual.

i) Densidad aparente

Relación entre el volumen y la masa seca, incluyendo los vacíos que contenga la muestra.

j) Densidad bulk

Relación entre la masa de agregado en bruto y el volumen de las partículas de agregado y los vacíos.

k) Distribución granulométrica

Es el análisis estadístico de la distribución de tamaños de las partículas que componen una muestra de agregado. Esta muestra debe ser representativa de su lugar de procedencia.

l) Ensayo de CBR

De las siglas en ingles «California Bearing Ratio» es un ensayo para evaluar la calidad de un material de suelo con base en su resistencia, medida a partir de un material patrón.

m) Ensayo Proctor

Prueba de laboratorio que determina la relación entre el peso unitario seco y el contenido de humedad de un suelo compactado.

n) Escala de Mohs

Escala que determina la dureza de un material comprendida entre el talco y el diamante.

o) Lixiviado

Líquido residual, generalmente tóxico, proveniente de la descomposición de los residuos orgánicos que se filtra por percolación.

p) Lodo

Producto generado en el tratamiento de las aguas residuales municipales. Su característica principal es el alto contenido de agua que poseen; pueden clasificarse en lodos primarios, secundarios y terciarios en función del nivel de tratamiento al cual hayan sido sometidos.

q) Metales pesados

Elementos tóxicos con pesos moleculares altos entre los que se encuentran Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mo, Ni, Pb, Se y Zn.

r) Permeabilidad

Capacidad que presenta un material de permitir el paso de un fluido a través de este.

s) Porosidad

Relación entre el volumen de vacíos de un material y su volumen.

t) Pretratamiento

Conjunto de procesos unitarios realizados en una PTAR antes de efectuar los tratamientos primarios.

u) Resistencia a la compresión

Esfuerzo máximo resultante de la capacidad que presenta un material para soportar una carga por unidad de área.

v) Sedimentación

Proceso mediante el cual se clarifican las aguas residuales y se separan tanto los sólidos suspendidos como parte de la materia orgánica contenida bajo el concepto de precipitación por la acción gravitatoria.

w) Sinterizar

Proceso mediante el cual se obtienen piezas de gran resistencia y dureza calentando, sin llegar a la fusión, conglomerados de material.

x) Subbase granular

Material granular que se coloca normalmente sobre la subrasante para formar una capa de apoyo para pavimentos y fundaciones.

y) Vertedero

Área destinada a la disposición final de basuras y elementos sin valor que requieren ser desechados. Comúnmente asociado al término relleno sanitario.

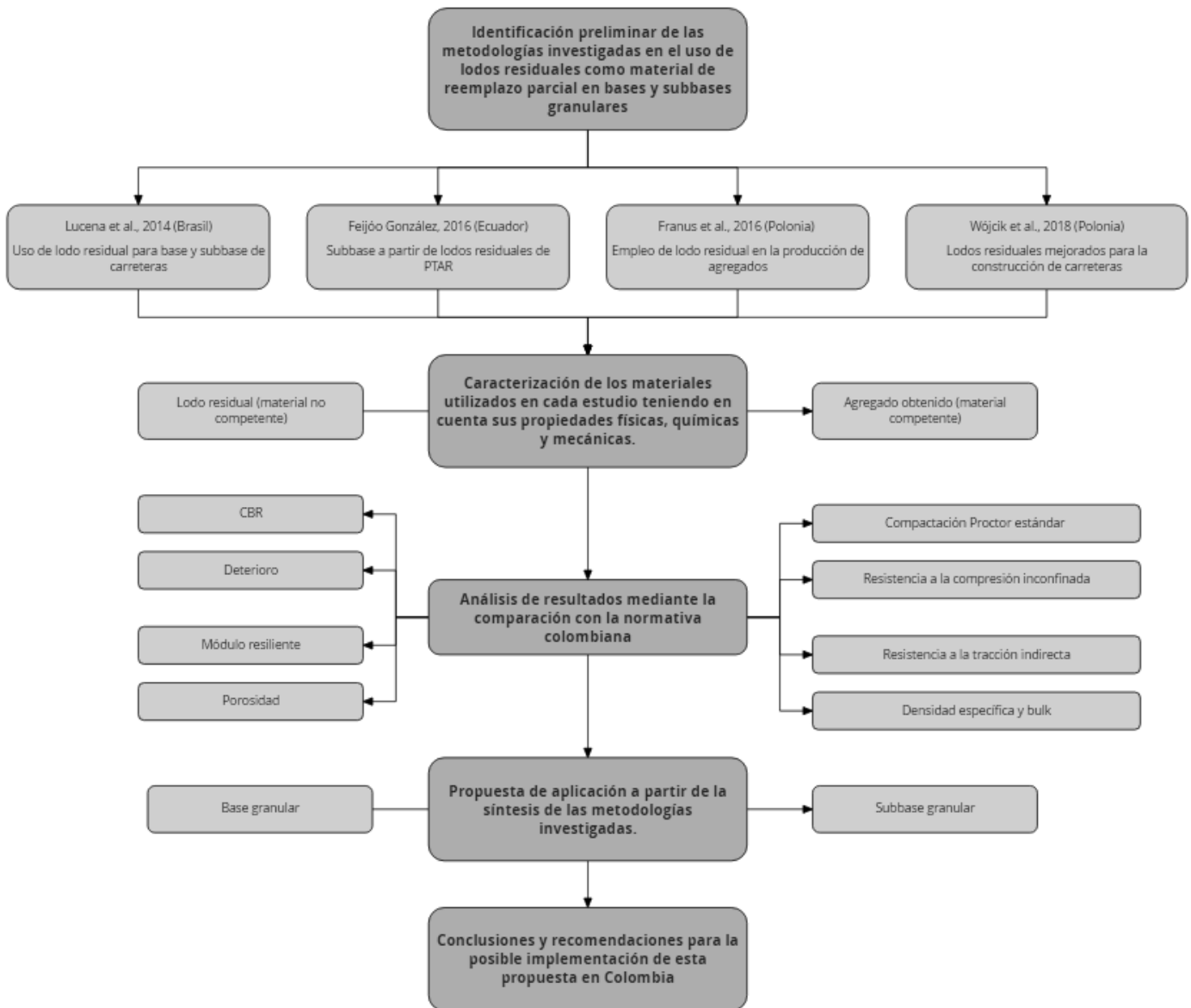
Capítulo 3. Metodología

El diseño de la investigación será no experimental de naturaleza transversal.

Analizará el comportamiento que tienen los lodos residuales cuando son empleados como material de reemplazo parcial en bases y subbases granulares para las vías terciarias de Colombia. Para este efecto se vale de una recolección de datos efectuada en un tiempo único bajo un enfoque cuantitativo (Hernández, Fernández & Baptista, 2003).

Figura 7.

Diseño metodológico.



Fuente: Propia.

El proceso metodológico a seguir comprende la identificación general de cada uno de los estudios investigados, posteriormente, se busca presentar en su contexto los lodos residuales utilizados en la fabricación de los agregados destinados a la construcción de carreteras. Después, se relacionan los resultados en cuanto a propiedades físicas resultantes y características mecánicas relevantes para hacer un análisis crítico respecto de las similitudes, diferencias y recomendaciones sobre la posible adopción de estas metodologías investigativas en la mejora de la infraestructura vial del sector rural en Colombia.

La investigación pretende proporcionar una propuesta constructiva para base y subbase granular aplicable al país por medio de comparaciones rigurosas con la normativa vigente y aclarando las recomendaciones para tener en cuenta durante las fases de conformación de los agregados y constructiva.

Uso de lodo residual para base y subbase de carreteras en Brasil

Identificación preliminar - Caso 1

La investigación efectuada en Brasil estudia la posibilidad de emplear un 10% en relación por peso de lodo residual proveniente de PTAR como material de sustitución parcial en capas de base para pavimentos.

Este estudio empleó técnicas de estabilización y solidificación del lodo residual con la finalidad de facilitar la disposición final de los residuos contaminantes y mejorar la calidad del producto final, es decir, la carretera. Adicionalmente, se evaluó el comportamiento mecánico y estructural del material resultante mediante ensayos de

compactación, ensayos de deterioro con tráfico simulado, ensayos de CBR y de resistencia a la compresión inconfina (Lucena et al., 2014).

Caracterización de los materiales utilizados - Caso 1

Esta investigación buscó justificar la adición de proporciones de lodo residual a muestras de suelo de Brasil con la finalidad de conformar un material de base granular aceptable para propósitos constructivos de estructuras de pavimento.

El lodo residual empleado para estos propósitos provino de la PTAR de Botafogo, ubicada en la ciudad costera de Recife en Brasil, este lodo ha pasado el tratamiento primario, por lo cual clasifica como un lodo primario. Las muestras de suelo fueron extraídas de una región de la ciudad de Alhambra, ubicada en el estado de Paraíba conocida como Hélio Reservoir.

Tanto para las muestras de lodo como de suelo, se efectuó una recolección en bolsas de polietileno posteriormente secadas al aire. Al ser necesaria una estabilización de la mezcla lodo-suelo, se efectuaron los ensayos con variaciones en cuanto a la dosis del agente estabilizante (1%, 2%, 3% y 4%), entre los que se encuentran cal hidratada *CH-1*, cemento Portland *CPIIF-32* y emulsión asfáltica catiónica *RL-1C*.

Tabla 13*Propiedades de los materiales empleados*

Propiedades	Valor	
	Suelo	Lodo residual
<i>Propiedades físicas</i>		
Contenido de agua natural [%]	16	53
Límite líquido [%]	23	NL
Límite plástico [%]	17	NP
Índice de plasticidad [%]	6	-
Gravedad específica	2.60	2.05
<i>Composición de partículas</i>		
Arena [%]	91	93
Limo [%]	7	2
Arcilla [%]	2	1

Nota. Adaptado de Lucena et al., 2014.

A partir de la información presentada en la Tabla 13 se puede inferir que el producto final cumplió con las exigencias granulométricas de un material típico de base granular. Una vez caracterizados preliminarmente los materiales a ensayar, se efectuó un análisis del contexto en el cual fueron ensayadas las muestras en cada uno de los parámetros relevantes para determinar su utilidad como material de base para carreteras.

Ensayo de compactación. Con respecto a la compactación los resultados a analizar estuvieron dados por una densidad máxima seca γ_d obtenida a una humedad óptima w_{op} . Estos se obtuvieron de las curvas de compactación que se presentarán en la sección de resultados y análisis. Sobre las muestras estabilizadas se ejecutó el ensayo Proctor Estándar con un tiempo de aireación de 1h para continuar con la determinación de la relación de soporte CBR.

Una vez culminados los ensayos de compactación y CBR las muestras se dejaron en cura húmeda por siete (7) días antes de ser sumergidas por cuatro (4) días; previo a la realización de los demás ensayos, se permitió a las muestras drenar el agua excedente durante quince (15) minutos.

Ensayo de resistencia a la compresión inconfiada. Para cada muestra a ensayar se realizó previamente una compactación en un molde cilíndrico con 50 mm de diámetro y una altura de 100 mm a la densidad máxima seca obtenida a la humedad óptima. Las condiciones para ejecutar este ensayo requirieron dividir los especímenes preparados en tres grupos:

- a) Curados en bolsa plástica durante 7 días.
- b) Curados en seco durante 7 días.
- c) Curados en bolsa plástica durante 28 días.

Ensayo de resistencia a la tracción indirecta. El ensayo de resistencia a la tracción indirecta fue efectuado bajo los criterios descritos en la norma brasilera *ME 136 – Pavimentación asfáltica, mezclas asfálticas, determinación de la resistencia a tracción por compresión diametral* emitida por el Departamento Nacional de Infraestructura de Transporte de este país.

Ensayo de módulo resiliente. Para ejecutar el ensayo de módulo resiliente fue empleado un cilindro bipartito con las muestras de 200 mm de altura y 100 mm de diámetro preparadas en cinco (5) capas y sometidas bajo un sistema de carga hidráulico. La forma en que se mide el módulo resiliente es bajo la aplicación de distintos esfuerzos desviadores a niveles de confinamiento variables y con constante variación de esfuerzos normales y cortantes en 180 ciclos. Para conseguir esto, previamente se aplican 200 ciclos de carga para acondicionar las muestras y eliminar de esta manera la parte inicial de la deformación permanente en ellas.

Ensayo de deterioro. Los ensayos de evaluación del deterioro de las muestras empleando tráfico simulado se realizaron sobre muestras de suelo, lodo y suelo-lodo con el aditivo que obtuvo mejores resultados en los ensayos mecánicos de resistencia a la compresión inconfiada, resistencia a la tracción indirecta y módulo resiliente.

Tabla 14*Normativa local aplicable a los ensayos mecánicos*

Ensayo	Normativa brasilera
Compactación	ME 162/94
CBR	ME 049
Resistencia a la compresión inconfiada	NBR 12025
Resistencia a la tracción indirecta	ME 136
Módulo resiliente	DNIT ME 134
Deterioro	NBR 14841

Nota. Elaboración propia a partir de Lucena et al., 2014.

Resultados - Caso 1

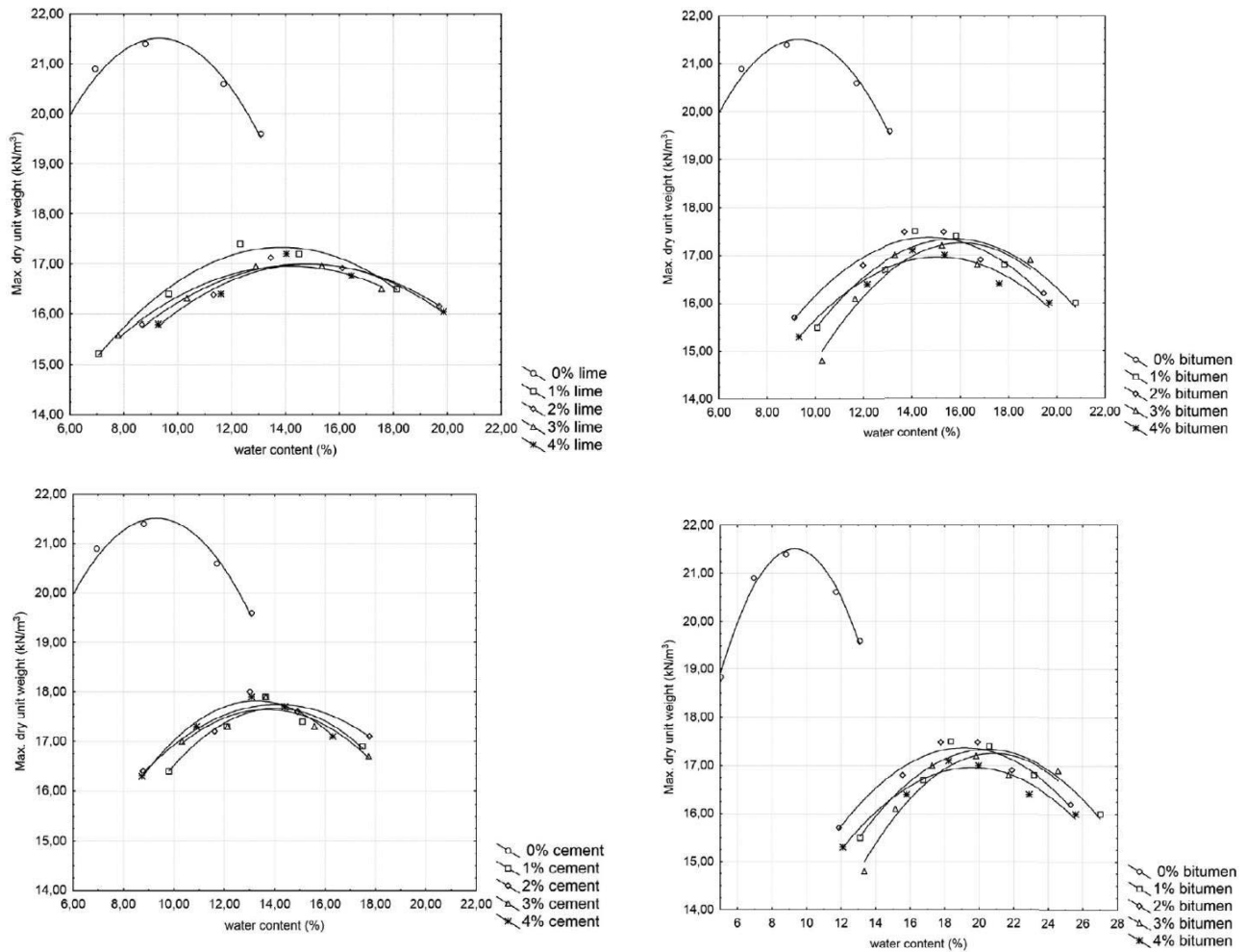
Pasada la etapa de muestreo, los especímenes fueron conducidos progresivamente por cada ensayo para determinar si su uso en la construcción de carreteras está o no justificado. Con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas del material resultante e incrementar su rigidez se emplearon diversas técnicas de estabilización/solidificación, estas tienen el potencial añadido para reusar los desechos debido a que retienen los metales contaminantes en una matriz sólida. De esta manera, fue añadido a la mezcla de suelo-lodo, cal, cemento y emulsión asfáltica en bajas proporciones para evaluar el efecto mecánico que cada aditivo proporciona a la mezcla (1%, 2%, 3% y 4% en relación por peso de la mezcla suelo-lodo).

Con respecto a la adición de emulsión asfáltica se presentaron dos casos. El primero (Fuente: Lucena et al., 2014. gráfico superior derecho), en el cual la humedad en la mezcla únicamente consideró el agua añadida a la mezcla suelo-lodo. Mientras que en la segunda opción (Fuente: Lucena et al., 2014. gráfico inferior derecho), la humedad incluye tanto el agua añadida a la mezcla suelo-lodo como la emulsión asfáltica en sí.

Ensayo de compactación y CBR. Teniendo en cuenta la caracterización del material y su adición de cal, cemento o emulsión asfáltica según el caso, se graficó el comportamiento de cada muestra en el ensayo de compactación Proctor estándar; para todos los casos se evidencia una disminución radical del peso unitario seco máximo $\gamma_{dm\acute{a}x}$ una vez tomada en cuenta la acción que ejerce el aditivo sobre las mezclas y, teniendo en cuenta la estandarización del ensayo de compactación, los resultados sugieren la necesidad de cambiar las condiciones de humedad del material resultante para de esta manera garantizar el buen comportamiento del aditivo y, garantizar que el peso unitario seco máximo sea el adecuado.

Figura 8.

Curvas de compactación obtenidas para las mezclas suelo-lodo-aditivo.

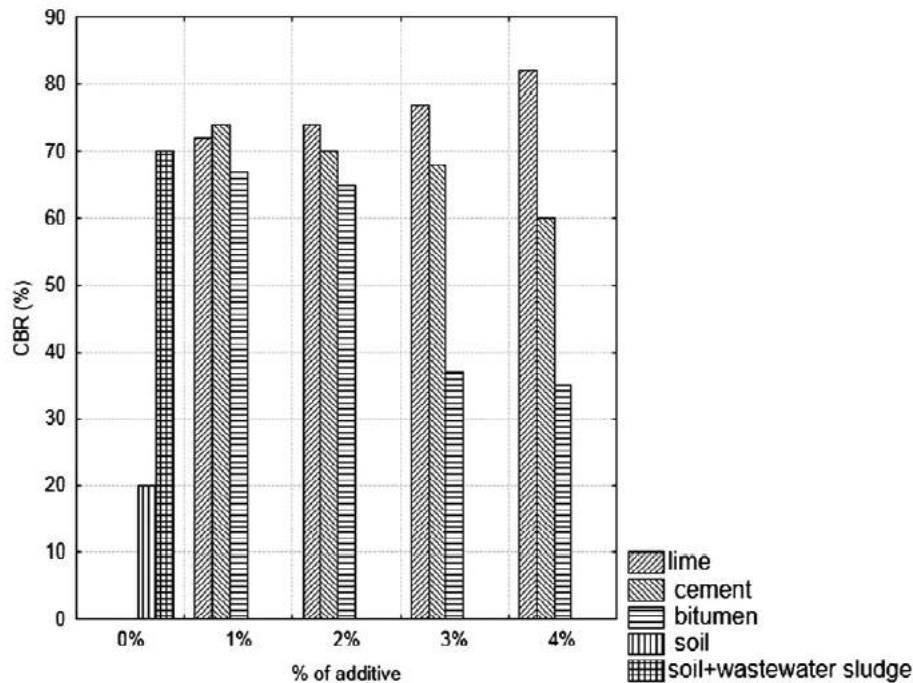


Fuente: Lucena et al., 2014.

De manera general, se puede afirmar que existe una relación directamente proporcional entre la dosificación de aditivo y la disminución del peso unitario seco máximo, así como con el aumento de la humedad óptima para las muestras ensayadas. Esto puede ser debido a la propia presencia del aditivo, que podría llegar a otorgar mayor rigidez a las capas granulares, con la consecuencia negativa del aumento en su fragilidad ante grandes cargas.

Figura 9.

Variación del CBR en función de la dosificación en los aditivos.



Fuente: Lucena et al., 2014.

De acuerdo con la Figura 9.

Variación del CBR en función de la dosificación en los aditivos., se evidencian incrementos significativos del CBR una vez mezclado el suelo con el lodo residual y con los aditivos en sus distintas dosificaciones.

Para el caso en el que se emplea el cemento como aditivo se genera una tendencia decreciente a partir de la dosificación del 2%, esto puede ser debido a que el lodo residual contiene sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ o sulfato de hierro $FeSO_4$ en su composición, como consecuencia de la adición de coagulantes al agua residual para facilitar la creación de *flocs* de mayor tamaño y favorecer la sedimentación. Estos compuestos, al mezclarse con el cemento, pueden reaccionar con los hidróxidos

resultantes de la hidratación del cemento, creando de esta manera compuestos responsables del decrecimiento en su resistencia.

Tabla 15

Resultados obtenidos del ensayo de CBR en las muestras preparadas y comparación con la normativa colombiana vigente

Material	CBR [%]				
	% de Adición				
	0%	1%	2%	3%	4%
Suelo	20	-	-	-	-
Suelo-lodo	70	-	-	-	-
Suelo-lodo cal	-	72	74	76	82
Suelo-lodo cemento	-	74	70	68	60
Suelo-lodo emulsión	-	67	65	38	35
Normativa INVIAS	Base granular	Clase A	Clase B	Clase C	
		>95	>80	>80	
	Subbase granular	Clase A	Clase B	Clase C	
		>40	>30	>30	

Nota. Adaptado de Lucena et al., 2014.

Cada una de las muestras ensayadas, a excepción del suelo bruto, cumplieron con los requerimientos nacionales de CBR para su uso en subbases granulares. Con relación a su uso para bases granulares, la única muestra que cumple respecto a la normativa aplicable es la muestra de suelo-lodo adicionada con 4% de cal, con posible uso como base granular de clase B o C, aunque para estas aplicaciones se recomienda evaluar económicamente esta propuesta en comparación a la alternativa convencional.

Ensayo de resistencia a la compresión inconfiada. Para determinar la resistencia a la compresión inconfiada fueron ensayadas tres (3) muestras por cada dosificación de aditivo de la siguiente manera:

- a) Tres muestras ensayadas después de una cura seca durante 7 días.
- b) Tres muestras ensayadas tras cura húmeda durante 7 días.
- c) Tres muestras ensayadas tras cura húmeda durante 28 días.

Tabla 16

Resistencia a la compresión inconfiada para muestras de suelo-lodo residual-aditivo

Aditivo	Resistencia a la compresión inconfiada [kPa]								
	Cal			Cemento			Emulsión asfáltica		
	Cura seca 7 días	Cura húmeda 7 días	Cura húmeda 28 días	Cura seca 7 días	Cura húmeda 7 días	Cura húmeda 28 días	Cura seca 7 días	Cura húmeda 7 días	Cura húmeda 28 días
1	540	102	600	930	164	730	1309	800	1112
2	590	109	610	950	172	800	1250	703	1052
3	624	109	460	1027	219	900	1150	656	1030
4	730	110	740	1028	283	960	1145	567	980

Nota. Tomado de Lucena et al., 2014.

Para evaluar la importancia que tiene la inclusión de aditivos en la mezcla, partimos de la resistencia a la compresión inconfiada del suelo sin ningún otro componente (113 kPa) y de la mezcla de suelo-lodo residual (147 kPa). A partir de estos datos se evidencia el papel fundamental que cumplen los aditivos en cuanto al incremento de la resistencia a pesar de que el estado inconfiado no es representación fidedigna del estado en el que se encontrará el material resultante una vez dispuesto sobre la carretera.

El aspecto más importante en cuanto a la selección de la dosificación de aditivo y el aditivo en sí, dejando de lado la propia resistencia, es el aspecto económico; debido a que muy posiblemente no se justifique económicamente la adición en grandes proporciones de cemento o emulsión asfáltica, sin mencionar las consecuencias mecánicas y estructurales que el abuso de estos aditivos puedan causar, como, por ejemplo, rigidez con tendencia a la falla frágil.

En función de lo expuesto, se resalta el buen comportamiento que tuvieron las muestras en general tras pasar por la cura seca y la gran diferencia que se evidencia cuando es comparada con la cura húmeda de 7 días, fenómeno que puede explicarse debido a la posible succión parcial que podría darse en las muestras como consecuencia del ambiente húmedo. Además de que los materiales de base y subbase granular generalmente estarán trabajando bajo condiciones insaturadas.

La adición de 1% de emulsión asfáltica es la que mejor comportamiento registra en cuanto a la resistencia a la compresión confinada. Sin embargo, los ensayos de CBR dan cuenta de la necesidad de eliminar la utilización de este aditivo en caso de que la aplicación del material sea para base granular; es por esta razón que podría tenerse en cuenta la alternativa de emplear cal en altas dosificaciones bajo cura seca para garantizar las condiciones de CBR requeridas para bases granulares de la mano con valores aceptables de resistencia a la compresión. Aunque para su aplicación en subbases granulares, la adición del 1% de emulsión asfáltica podría otorgar más confianza, el análisis económico dictará de cualquier manera, la alternativa más viable.

Ensayo de resistencia a la tracción indirecta. Para los resultados presentados respecto a la resistencia a la tracción indirecta se evidencia que no hay valores que representen un estado de cura húmeda posterior a los 7 días, esto es debido a que las muestras no mostraron la resistencia suficiente como para ser medida por el equipo empleado. Esto se explica por el hecho de que altos tiempos de curado derivan en reacciones puzolánicas y este comportamiento no favorece a la resistencia a la tracción del material.

Tabla 17

Resistencia a la tracción indirecta para muestras de suelo-lodo residual-aditivo

Aditivo [%]	Resistencia a la tracción indirecta [MPa]					
	Cal		Cemento		Emulsión asfáltica	
	Cura 7 días	Cura 28 días	Cura seca 7 días	Cura húmeda 7 días	Cura seca 7 días	Cura húmeda 7 días
1	0.115	0.050	0.096	0.063	0.179	0.118
2	0.102	0.074	0.105	0.106	0.147	0.105
3	0.130	0.049	0.126	0.125	0.158	0.104
4	0.185	0.080	0.126	0.153	0.110	0.080

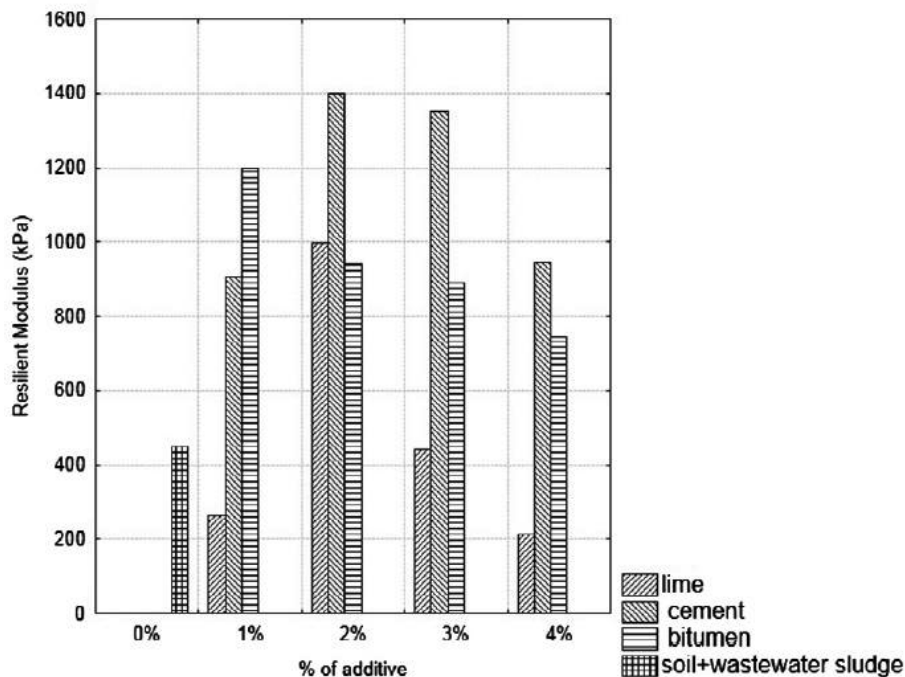
Nota. Tomado de Lucena et al., 2014.

El mejor comportamiento bajo tracción fue obtenido con una dosificación de 4% de cal tras cura seca por 7 días. No obstante, un valor muy similar fue obtenido con un 1% de emulsión asfáltica tras el mismo proceso de curado. Esto refuerza la hipótesis de que estas dosificaciones podrían resultar en el material granular más competente para bases o subbases granulares.

Ensayo de módulo resiliente. Para determinar el módulo resiliente de las muestras ensayadas fueron utilizados los últimos esfuerzos resultantes del ensayo dinámico triaxial. Siendo estos $\sigma_3 = 0.137$ MPa y $\sigma_d = 0.412$ MPa. Es importante mencionar el hecho de que no se obtuvieron resultados para muestras de suelo sin ningún tipo de adición debido a que estas muestras no soportaron los preparativos necesarios para llevar a cabo el ensayo.

Figura 10.

Módulo resiliente para las mezclas de suelo-lodo residual-aditivos.



Fuente: Lucena et al., 2014.

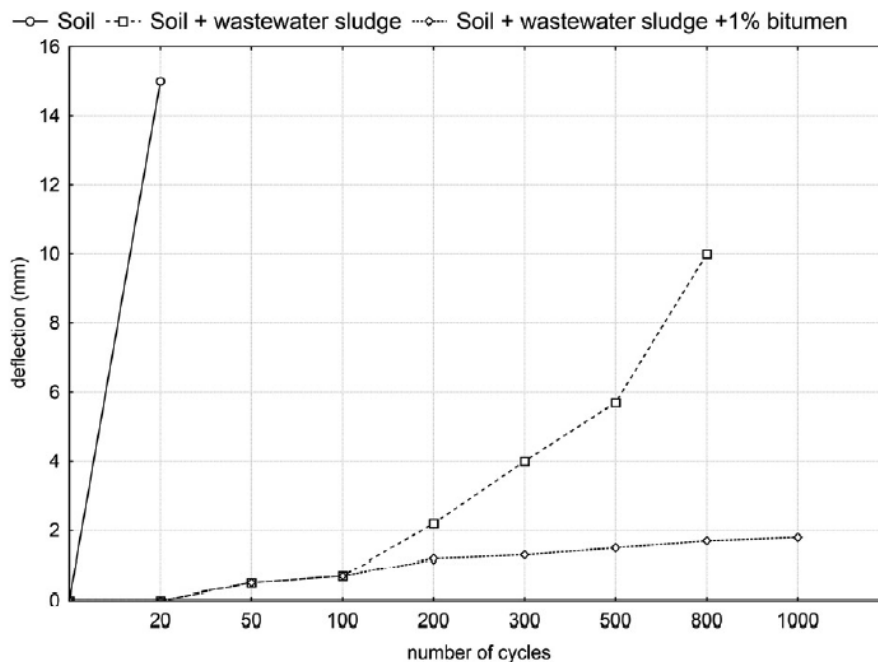
La adición de cemento en un 2% registró el mejor valor para el módulo resiliente, aunque justificarse en este hecho para sugerir su utilización en campo puede ser descuidado y peligroso. En comparación, se sigue registrando una tendencia aceptable para la adición de emulsión asfáltica en un 1% y cal en bajas dosis, es indispensable

comparar estos resultados con el módulo resiliente de materiales convencionales empleados en bases o subbases granulares para tomar decisiones al respecto.

Ensayo de deterioro. Para el ensayo de deterioro se empleó la muestra de material que mejor comportamiento mecánico obtuvo durante el paso de los anteriores ensayos, esto con el objetivo de determinar el aditivo indicado y su mejor dosificación para ser aplicable a capas granulares de estructuras de pavimento, siendo este el bitumen o emulsión asfáltica en un 1%.

Figura 11.

Resultados del ensayo de rueda cargada (LWT) en las muestras seleccionadas.



Fuente: Lucena et al., 2014.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se evidencia el mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo adicionado con lodo residual únicamente, aunque esta configuración no fue capaz de superar los 1000 ciclos de prueba en el ensayo de deterioro con tráfico simulado.

La ejecución de este ensayo ratifica la hipótesis que posiciona a la emulsión asfáltica con dosificación de 1% como la mejor alternativa para mejorar los comportamientos mecánicos de bases o subbases granulares compuestas por suelo y lodo residual por motivo de que supera los 1000 ciclos de prueba en el ensayo de deterioro con una deflexión máxima de 1.8 mm. Esto representa, en una capa de 15 cm de espesor, un ahuellamiento resultante de 7.5 mm, valor aceptable para pavimentos; más aún, teniendo en cuenta que este material subyace a la base granular, capa de afirmado y posiblemente a la carpeta asfáltica, se ratifica como competente para la conformación de bases y subbases granulares.

Subbase granular a partir de lodos residuales de PTAR en Ecuador

Identificación preliminar - Caso 2

El estudio de tipo experimental efectuado en Ecuador respecto de la utilización de lodos residuales de PTAR y arcillas expansivas para la obtención de una subbase granular detalla el hecho de que por sí solos, los lodos residuales y las arcillas no pueden calificar como una subbase por el hecho de que, si bien, granulométricamente pueden ser aceptados como una subbase clase 3, una vez efectuados los ensayos de compactación Proctor Estándar y CBR, la calidad del material resultante difiere en gran medida de las especificaciones mínimas para una subbase granular y, en consecuencia, se sugiere realizar mezclas con combinación de agregados finos y gruesos para garantizar un comportamiento regular en lo referente a CBR y compactación, esto debido a que, por sí mismos, se pueden clasificar como un

mejoramiento, más no como una subbase granular competente (Feijóo González, 2016).

Tabla 18

Clasificación de subbases según granulometría

Tamiz	% en peso que pasa a través del tamiz		
	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Descripción	Formada por agregados gruesos mezclados con arena o material triturado.	Formada por agregados gruesos obtenidos mediante cribado y mezclados con arena o material finamente triturado.	Formada por agregados gruesos obtenidos mediante cribado y mezclados con arena o material finamente triturado.
3" - 76.2 [mm]	--	--	100
2" - 50.4 [mm]	--	100	--
1½" - 38.1 [mm]	100	70 - 100	--
Nº4 - 4.75 [mm]	30 - 70	30 - 70	30 - 70
Nº40 - 0.425 [mm]	10 - 35	15 - 40	--
Nº200 - 0.075 [mm]	0 - 15	0 - 20	0 - 20

Nota. Adaptado de Coronel y Falconí, 2006.

Caracterización de los materiales utilizados - Caso 2

La propuesta desarrollada en Ecuador para el aprovechamiento de lodos residuales en adición a arcillas para conformar un material destinado como subbase granular para carreteras de bajo nivel de tránsito empleó procesos de secado de “efecto invernadero” que adecuaba una cámara de secado artesanal de este tipo para eliminar el contenido de agua natural presente en los materiales recién extraídos (lodo residual) (Díaz, 2016).

La arcilla empleada en la investigación de carácter experimental fue extraída de la zona noroeste de la ciudad de Guayaquil en Ecuador, mientras que el lodo residual

deshidratado provino de la PTAR de la urbanización La Joya, en Guayaquil; este material presentó una humedad del 30% al momento de su extracción, posteriormente fueron incorporados entre sí con la ayuda de una mezcladora mecánica en proporción 90% arcilla 10% lodo residual con adiciones esporádicas de agua en el proceso de mezcla.

Una vez conformado el material homogéneo, fue llevado a cocción durante 48 horas bajo el método de la cocción indirecta dentro de un horno artesanal empleado para la producción de ladrillos a una temperatura que oscila los 900 °C. Pasado el tiempo de cocción se ejecutaron ensayos de clasificación granulométrica, relación CBR, límites de Atterberg y ensayos de compactación Proctor Estándar.

Tabla 19

Propiedades del material empleado en la investigación

Propiedades	Valor
Humedad promedio [%]	2.79 – 3.24
Índice de plasticidad	NP
<i>Composición de partículas</i>	
Grava [%]	44
Arena [%]	55
Limo/Arcilla [%]	1

Nota. Elaboración propia a partir de Feijóo González, 2016.

El material sinterizado carece de comportamiento plástico debido a la ínfima cantidad de finos que posee como consecuencia del proceso de cocción, esto presupone dificultades en cuanto al desempeño del material en ensayos de compactación.

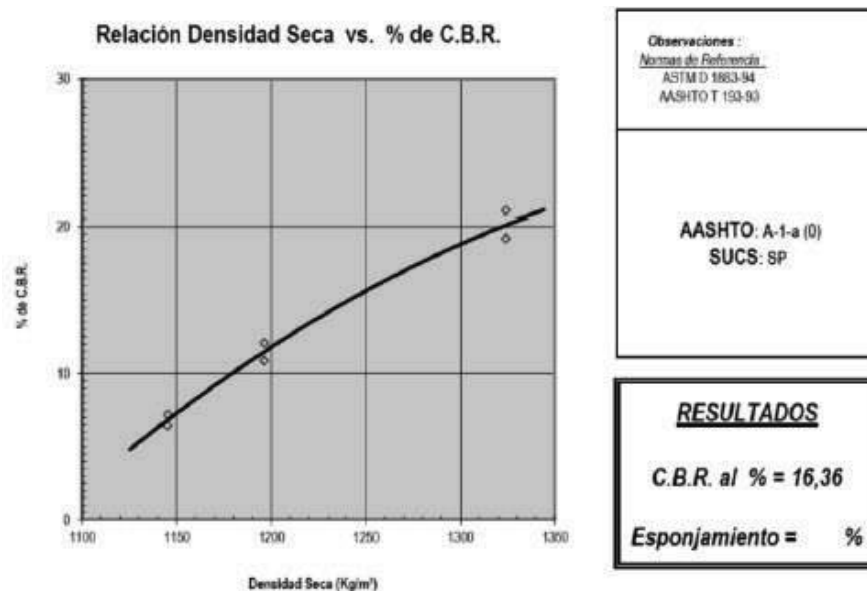
Resultados - Caso 2

Más allá del ensayo de compactación Proctor Estándar llevado a cabo sobre el material, se empleó el método del terraplén de prueba para determinar la densidad del material en campo. Este terraplén contó con 2.50 m de ancho y 4.00 m de largo en los cuales se dispusieron dos capas del material a ensayar con espesor de 10 cm cada una para posteriormente pasar un compactador de rodillo con peso aproximado de 1.5 Ton.

En cuanto a la relación de soporte del material ensayado, se obtuvo un valor de CBR de 16.36%, este valor se ubica por debajo del requerimiento mínimo para subbases granulares de clase C de acuerdo con las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras para Colombia. Una posible explicación a estos resultados tiene que ver indudablemente con el suelo que se tomó como base para añadir el lodo residual (previamente deshidratado) y ejecutar los ensayos.

Figura 12.

Relación densidad seca y CBR obtenida para la muestra ensayada.

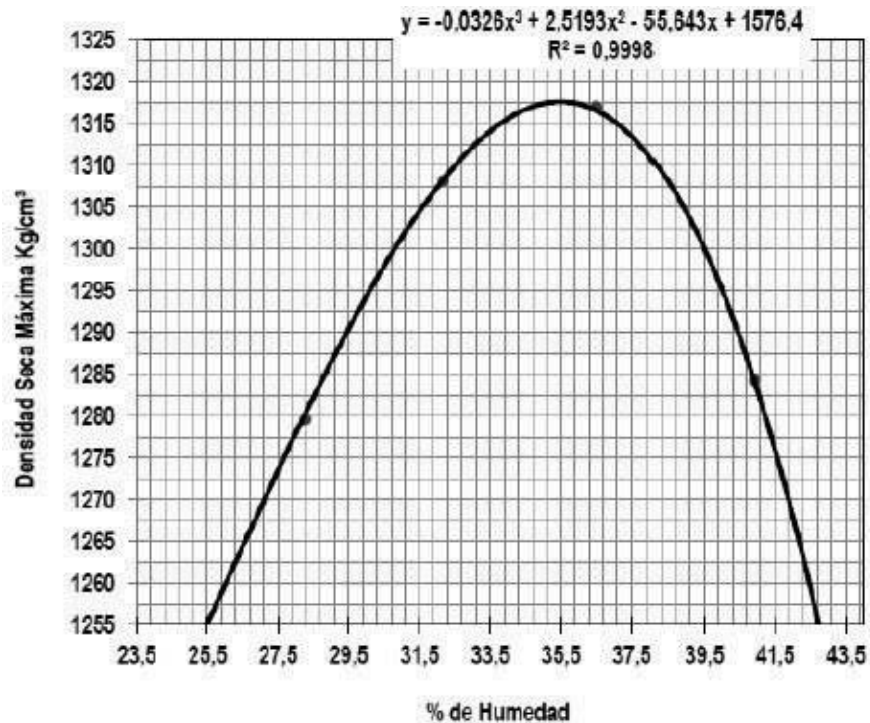


Fuente: Feijóo González, 2016.

El ensayo de compactación Proctor Estándar se ejecutó conforme las especificaciones contempladas en la normativa ecuatoriana, obteniendo de esta manera un peso unitario seco máximo $\gamma_{dm\acute{a}x} = 1308 \text{ Kg/cm}^3$ y una humedad óptima $w_{opt} = 35\%$.

Figura 13.

Gráfico del ensayo de compactación en el material ensayado.



Fuente: Feijóo González, 2016.

De acuerdo con la forma del gráfico de compactación obtenido, el comportamiento puede asemejarse al de un suelo predominantemente cohesivo. En caso de asemejarse con el comportamiento de un suelo friccional, la gráfica sería mucho más distendida y mucho menos pronunciada. Este resultado puede haberse dado por la naturaleza arcillosa del suelo, así como de las altas humedades de compactación. Es recomendable realizar mayores investigaciones incorporando suelos friccionales como materia predominante, junto con un lodo residual con mayores contenidos de humedad

para garantizar las condiciones requeridas de resistencia al corte, compresibilidad y permeabilidad del material resultante.

Con base en los resultados obtenidos, no es posible emplear esta metodología como modelo a seguir para la fabricación de materiales competentes para estructuras de pavimento terciarias o secundarias en el país.

Empleo de lodo residual en la producción de agregado en Polonia

Identificación preliminar - Caso 3

En el campo de la producción de agregados, también se ha estudiado ampliamente la posibilidad de crear un material cerámico sinterizado a partir de agregados finos y lodos residuales; en este estudio realizado en Polonia, se sinterizaron estos materiales a temperaturas de 1100 °C y 1150 °C obteniendo resistencias a la compresión variables entre 4.64 MPa y 0.79 MPa dependiendo de su composición y proceso de sinterización, estos materiales cumplen los requerimientos básicos para agregados y se pueden tener en cuenta para conformar estructuras de agregados con potencial de disposición en carreteras, además de proporcionar soluciones a la problemática de la disposición final de lodos residuales provenientes de PTAR, generando un material amigable medioambientalmente (Franus, Barnat-Hunek & Wdowin, 2016).

Caracterización de los materiales utilizados - Caso 3

La producción de agregados empleando lodos residuales liderada por Polonia incorporó arcillas provenientes del depósito “Budy Mszczonowskie” junto con lodos residuales producidos en la PTAR municipal “Hajdów” ubicada en la región de Lublin. Esta planta de tratamiento tiene la particularidad de que parte de sus procesos se

realizan sobre aguas residuales industriales con un alcance mecánico-biológico de remoción. Los lodos residuales fueron tomados de la zona de deshidratación mecánica por las considerables reducciones de volumen que se tienen en esta etapa.

Tabla 20

Caracterización fisicoquímica del lodo residual proveniente de la PTAR Hajdów

Parámetro	Valor promedio
<i>Propiedades físicas</i>	
Contenido de humedad [%]	80.43
Sequedad [%]	19.57
Densidad [g/mL]	0.795
pH	7.68
<i>Propiedades químicas</i>	
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	750
DQO [mg/L]	136.423

Nota. Adaptado de Franus, Barnat-Hunek & Wdowin, 2016.

Este estudio incorporó análisis termogravimétricos, mineralógicos y microestructurales que tienen como finalidad determinar con buena precisión la composición química de los materiales empleados mediante equipos especializados de espectroscopía y espectrometría. Sin embargo, se dará especial relevancia al proceso de sinterización del agregado, así como a las propiedades físicas y mecánicas medidas una vez sinterizado entre las cuales tenemos densidad aparente de partículas, densidad seca de partículas, capacidad de absorción de agua, densidad bulk, relación de vacíos y resistencia a la compresión.

Preparación de los agregados de peso ligero. La metodología empleada consiguió manufacturar dos clases de agregados de peso ligero diferenciadas principalmente en las temperaturas y tiempos de sinterización de los materiales (arcillas y lodos residuales). Para conseguir esto, en primer lugar, la arcilla y el lodo residual fueron secados a 105°C y estandarizados a un tamaño de grano < 0.5mm. A continuación, se conformó el material agregado mediante la mezcla de una proporción en peso de lodo residual por cada nueve proporciones en peso de arcilla, una vez mezclados se adicionaron 40 mL de agua ideales para formar gránulos con diámetros promedio de 16 mm.

El material granular obtenido pasó nuevamente por un proceso de secado en tres etapas: 40 °C, 60 °C y 110°C durante dos (2) horas para concluir con la sinterización en horno durante treinta (30) minutos, a partir de este punto se pueden distinguir dos materiales:

1. Agregado No. 1 (A1), sinterizado a 1100 °C.
2. Agregado No. 2 (A2), sinterizado a 1150 °C.

Resultados - Caso 3

A partir de los ensayos realizados a cada una de las muestras se obtuvieron marcadas diferencias en lo que respecta a porosidad, densidad aparente, densidad bulk y resistencia a la compresión. Lo anterior es aún más sorprendente teniendo en cuenta que el único factor diferente entre ambos tipos de agregados fue la temperatura de cocción en horno, diferenciándose por 50 °C.

Ambas opciones se pueden considerar viables ya que su densidad es menor a 1.20 g/cm³ de acuerdo con la norma europea UNE-EN-13055-1.

Tabla 21*Propiedades físicas y mecánicas de agregados sinterizados*

Parámetros	Valor	
	A1 (1100°C)	A2 (1150°C)
Densidad bulk ρ_b [g/cm ³]	0.685	0.414
Densidad aparente de partículas ρ_a [g/cm ³]	1.05	0.87
Densidad seca ρ_d [g/cm ³]	2.69	2.59
Capacidad de absorción de agua [%]	14.4	16.2
Porcentaje de vacíos [%]	74	84
Porosidad [%]	60	66
Resistencia a la compresión [MPa]	4.64	0.79

Nota. Adaptado de Franus, Barnat-Hunek & Wdowin, 2016.

Es posible establecer una relación entre la densidad aparente, la porosidad y la resistencia a la compresión de las muestras analizadas. Como consecuencia de una mayor temperatura de cocción, el agregado de peso ligero número 2 (A2) presentó una mayor porosidad, esto es debido al proceso de liberación de gases provenientes del lodo residual empleado para su manufactura, esta liberación de gases dio paso a la formación de más poros en la estructura del agregado, lo cual disminuyó considerablemente la densidad de partículas, además de que este incremento en la porosidad facilita la capacidad de absorción del agua y asimismo desfavorece la resistencia del material ante fuerzas de compresión. En otras palabras, se puede afirmar que una mayor temperatura de cocción resulta en una mayor tasa de destrucción de materia orgánica, lo cual aumenta la porosidad y consigo, el desencadenante comportamiento mecánico del agregado.

Lodos residuales mejorados para la construcción de carreteras en Polonia

Identificación preliminar - Caso 4

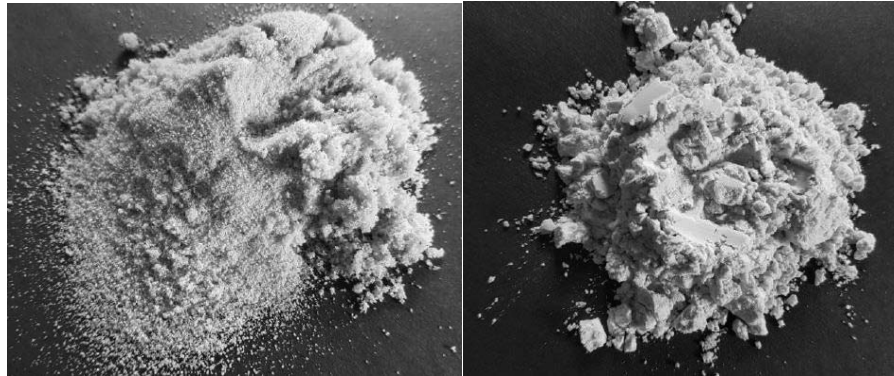
A partir de las investigaciones previamente expuestas se puede afirmar que el lodo residual tiene la capacidad de ser utilizado como material no convencional en la construcción de las carreteras, en relación a lo anterior, en Polonia se ejecutó otro estudio en el cual se realizaron ensayos de laboratorio a mezclas de lodo residual deshidratado con humedad de 62% adicionado con polvo de vidrio y arena de cuarzo, se midió su resistencia a la compresión y dureza junto con sus características fisicoquímicas generales. Estos resultados fueron comparados con materiales similares empleados en el sector de la construcción de carreteras y confirma la posibilidad de emplear el lodo residual en ciertas fracciones para garantizar una utilidad funcional en la ingeniería civil (Wójcik, Bąk & Stachowicz, 2018).

Caracterización de los materiales utilizados - Caso 4

En la búsqueda de un nuevo material capaz de incorporarse en estructuras de pavimento, fue empleado lodo residual derivado del proceso de digestión aeróbica realizado en la PTAR Sędziszów Małopolski de Polonia, el cual evidencia un comportamiento ácido como se evidencia en la Tabla 22. Este lodo residual fue incorporado a una mezcla de vidrio residual con densidad de 2.5 g/cm^3 y arena de cuarzo producto de la descomposición de rocas tipo granito caracterizada por tener una densidad de 2.65 g/cm^3 previamente lavado, calcinado y tamizado.

Figura 14.

Arena de cuarzo y vidrio residual empleados en la manufactura de un material no convencional para formar parte de capas granulares para carreteras.



Fuente: Wójcik, Bąk & Stachowicz, 2018.

Tabla 22

Propiedades del lodo residual empleado

Parámetro	Valor
<i>Propiedades físicas</i>	
pH	6.24
Masa seca [g/dm ³]	380.0
Hidratación [%]	62.0
<i>Composición química</i>	
Nitrógeno [%]	4.92
Calcio [%]	5.78
Magnesio [%]	1.05
Fósforo [%]	1.87

Nota. Adaptado de Wójcik, Bąk & Stachowicz, 2018.

Tabla 23*Composición química del polvo de vidrio residual*

Componente	Valor
SiO ₂ [%]	70.0 – 73.0
Al ₂ O ₃ [%]	0.5 - 2.0
CaO [%]	7.0 – 11.0
MgO [%]	3.0 – 5.0
Na ₂ O + K ₂ O [%]	13.0 – 15.0
Fe ₂ O ₃ [%]	< 0.1
TiO ₂ [%]	< 0.1

Nota. Adaptado de Wójcik, Bąk & Stachowicz, 2018.

La gran ventaja que ofrece emplear arena de cuarzo para manufacturar este nuevo material granular es su capacidad para fundirse a altas temperaturas gracias a su composición química (Tabla 24), lo cual mejora notablemente el desempeño del nuevo material en el sector de la construcción de carreteras.

Tabla 24*Composición química de la arena de cuarzo*

Componente	Valor
SiO ₂ [%]	99.3
Fe ₂ O ₃ [%]	0.2
TiO ₂ [%]	0.1
Al ₂ O ₃ [%]	0.4

Nota. Adaptado de Wójcik, Bąk & Stachowicz, 2018.

Para conformar las muestras que serían llevadas a ensayo, se adoptó una proporción de lodo residual, arena de cuarzo y polvo de vidrio de 1.0:0.5:0.5. Los materiales dispuestos en esta proporción fueron incorporados entre sí por medio de un mezclador mecánico durante tres (3) minutos para ser moldeados en forma de cilindros

con diámetro de 25 mm y altura de 50 mm que serían sinterizados en horno a una temperatura de 1100 °C.

Resultados - Caso 4

En las propiedades físicas se puede notar gran similitud con materiales usados en el sector de la construcción de carreteras en cuanto a su densidad específica. Estos materiales comúnmente empleados cuentan con un valor promedio de densidad específica de 2.8 g/cm³, valor muy similar al determinado por medio del ensayo del picnómetro para el material no convencional sinterizado en el laboratorio.

Tabla 25

Propiedades determinadas en el material fabricado

Parámetro	Valor
Densidad específica [g/cm ³]	2.84
Densidad bulk [g/cm ³]	1.30
Porosidad [%]	54.22

Nota. Adaptado de Wójcik, Bąk & Stachowicz, 2018.

La dureza del material manufacturado fue evaluada mediante la escala de Mohs dada su alta porosidad. Con respecto a esto, se obtuvo un valor de 3.5 en la escala de Mohs (Una dureza comprendida entre la calcita y la fluorita), es decir, que este material se puede rayar fácilmente con un cuchillo de acero, este valor de dureza es similar al que presenta la dolomita, material con uso amplio en el sector de la construcción de carreteras como agregado natural.

Tabla 26*Resistencia a la compresión para diferentes muestras del material fabricado*

Número de muestra	Carga última [N]	Resistencia a la compresión [MPa]
1	1251.67	2.55
2	1410.54	2.87
3	1646.75	3.35

Nota. Adaptado de Wójcik, Bąk & Stachowicz, 2018.

En cuanto a la determinación de la viabilidad de un material como insumo en el sector de la construcción de carreteras, es de gran importancia evaluar la resistencia a la compresión que este presenta, el valor promedio de resistencia a la compresión obtenido por medio de tres muestras similares del mismo material sometidas a ensayo y llevadas al fallo arrojó un resultado de 2.92 MPa.

Tomando como referencia la normativa Polaca al respecto (WT-42010), la composición química, las propiedades fisicoquímicas y el comportamiento mecánico del material obtenido, por medio de la sinterización de lodos residuales de PTAR adicionados con polvo de vidrio residual y arena de cuarzo sugieren que este puede usarse en la construcción de carreteras como material apto para una o varias capas en una estructura de pavimento.

Capítulo 4. Propuesta de aplicación en Colombia

Tratamiento de aguas residuales y caracterización de subproductos en Colombia

Una vez conocido los diferentes procesos a los cuales son sometidos de manera general los lodos residuales de PTAR para su uso como materiales capaces de conformar capas en una estructura de pavimento, se busca dar contexto sobre situación reciente en Colombia respecto del tratamiento de las aguas residuales y, en consecuencia, de las propiedades y el potencial que presentan los lodos obtenidos de los procesos de sedimentación primaria y secundaria que han sido sometidos a estabilización mediante digestión anaerobia, deshidratación parcial, secado y almacenamiento, para su uso en la construcción y el mejoramiento de la red vial nacional terciaria.

Tabla 27

Composición de los biosólidos obtenidos en la PTAR El Salitre (Bogotá)

Parámetro	Valor promedio
<i>Parámetros fisicoquímicos</i>	
pH	6.7
Sequedad [%]	33
Humedad [%]	67
<i>Nutrientes</i>	
N Total [mg/Kg]	29
P Total [mg/Kg]	9.2
<i>Metales pesados</i>	
Cr [mg/Kg]	60
Pb [mg/Kg]	114
Ni [mg/Kg]	36.1

Nota. Adaptado de González, Guzmán & Mayorga, 2019.

En este sentido, es importante relacionar la calidad de los subproductos que se generan en dos de las PTAR más ambiciosas en cuanto a caudal tratado y tecnologías de remoción utilizadas. Tanto de la PTAR Salitre, ubicada en Bogotá, como la PTAR San Fernando, ubicada en Itagüí, se pueden obtener insumos con alto potencial de aprovechamiento en la construcción de carreteras, previos estudios de laboratorio, tratamiento y adecuación para desempeñar un papel estructural, de la mano con agregados convencionales.

Tabla 28

Composición de los biosólidos obtenidos en la PTAR San Fernando (Itagüí)

Parámetro	Valor promedio
<i>Parámetros fisicoquímicos</i>	
pH	7.2
Sequedad [%]	32
Humedad [%]	68
<i>Nutrientes</i>	
N Total [%]	2.8
P Total [%]	2.1
<i>Metales pesados</i>	
Cr [mg/Kg]	2613.6
Pb [mg/Kg]	170.95
Ni [mg/Kg]	86.73

Nota. Adaptado de González, Guzmán & Mayorga, 2019.

Es un hecho que nuestro país cuenta con gran variedad de fuentes de las cuales se puede obtener el lodo residual y los biosólidos necesarios para concretar estudios y ensayos para ser empleados en el sector de la construcción de carreteras. Según el Sistema Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios - *SUI*, el reporte de

plantas de tratamiento de aguas residuales con alcance mínimo a tratamientos secundarios para el agua residual entre los años 2015 y 2019 se extiende a más de veinte (20) plantas distribuidas en toda la extensión del territorio nacional, desde las cuales se hace posible la recolección de muestras para ejecutar evaluaciones rigurosas del posible desempeño de estos subproductos como materiales de reemplazo parcial en bases o subbases granulares para carreteras terciarias. Algunos de los municipios con mayor potencial al respecto son Antioquia, Atlántico, Boyacá, Cundinamarca y Valle del Cauca; sectores que cuentan con una vasta extensión rural con rutas de difícil acceso en los cuales se hace necesaria una mejor infraestructura vial para de esta manera, contribuir con el crecimiento económico, social y cultural de las poblaciones locales.

Tabla 29*Sistemas de tratamiento de aguas residuales con procesos secundarios en Colombia*

Departamento	Municipio	Empresa	Nombre Sistema
Antioquia	Bello	Aguas Nacionales EPM S.A. E.S.P.	PTAR Aguas Claras
Antioquia	Donmatias	SERVIDONMATIAS E.S.P. S.A.S.	PTAR Donmatias
Antioquia	Itagüí	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.	San Fernando
Atlántico	Baranoa	Sociedad de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Barranquilla S.A. E.S.P.	EDAR Baranoa
Atlántico	Barranquilla	Sociedad de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Barranquilla S.A. E.S.P.	EDAR El Pueblo
Atlántico	Puerto Colombia	Sociedad de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Barranquilla S.A. E.S.P.	EDAR Puerto Colombia
Bogotá D.C.	Bogotá D.C.	Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá E.S.P.	PTAR El Salitre
Bogotá D.C.	Bogotá D.C.	Interaseo Soluciones Ambientales S.A.S. E.S.P.	PTAR
Boyacá	Chiquinquirá	Empresa Industrial y Comercial de Servicios Públicos de Chiquinquirá	SBR
Boyacá	Tunja	Veolia Aguas de Tunja S.A. E.S.P.	PTAR Tunja
Cundinamarca	Madrid	Aguas de la Prosperidad S.A.S. E.S.P.	PTARD ALP
Cundinamarca	Tocancipá	Empresa de Servicios Públicos de Tocancipá S.A. E.S.P.	Verganzo
Magdalena	Santa Marta	Proactiva Santa Marta S.A. E.S.P.	Emisario Submarino de Santa Marta
Quindío	Armenia	Empresas Públicas de Armenia	PTAR La Marina
Santander	Piedecuesta	Empresa Municipal de Servicios Públicos Domiciliarios de Piedecuesta E.S.P.	PTAR El Santuario
Valle del Cauca	Jamundí	Ozono Empresa de Servicios Públicos S.A.S. E.S.P.	PTAR Ciudad Country
Valle del Cauca	Tuluá	Centroaguas S.A. E.S.P.	PTAR Tuluá

Nota. Elaboración propia a partir del reporte de sistemas de tratamiento de aguas residuales ofrecido por el Sistema Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios SUI.

Comparación de subproductos

Más allá del proceso utilizado para conformar un material granular competente para disponer como base o subbase de cualquier vía terciaria en el país, es indispensable

comprender que no todos los materiales se comportarán de la misma manera ante estos procesos, es así como surge la necesidad de evaluar que tan parecidos son los lodos que se obtienen en las principales PTAR de Colombia con relación a los lodos empleados en cada metodología objeto de estudio. Para este efecto, se propone comparar cada lodo residual caracterizado previamente con la composición típica de los lodos que se obtienen de dos de las principales PTAR del país, basándose principalmente en el pH, la humedad, así como el nitrógeno y fósforo total contenido en estos lodos.

Tabla 30

Caracterización de los lodos residuales a comparar

Parámetro	Lodo Caracterizado				Lodo de Referencia	
	PTAR	Urb. La	PTAR	PTAR	PTAR EI	PTAR San
	Botafogo	Joya	Hajdów	Sędziszów Małopolski	Salitre	Fernando
	Lucena et al., Brasil	Feijoo, Ecuador	Franus et al., Polonia	Wójcik et al., Polonia	González et al., Colombia	
pH	*	*	7.68	6.24	6.70	7.20
Humedad [%]	53	30	80.43	62	67	68
Sequedad [%]	47	70	19.57	38	33	32
N Total [%]	*	*	*	4.92	2.9	2.8
P Total [%]	*	*	*	1.87	0.92	2.1

Nota. Elaboración propia a partir de los datos obtenidos por cada autor.

* Dato no proporcionado por el autor.

A partir de estos datos, es posible determinar el porcentaje de similitud entre estos subproductos, asignando a cada parámetro una ponderación equivalente al nivel de influencia que cada uno tiene sobre el lodo residual. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la comparación entre cada lodo residual en estudio y el lodo

obtenido de manera típica en las Plantas de Tratamiento El Salitre y San Fernando ubicadas en Bogotá e Itagüí respectivamente.

Tabla 31

Comparación de los lodos estudiados con los lodos obtenidos en Colombia

Lodo Estudiado	Lodo de Referencia	Porcentaje de Similitud
PTAR Botafogo, Brasil		71.9
Urbanización La Joya, Ecuador	PTAR El Salitre,	11.9*
PTAR Hajdów, Polonia	Bogotá	67.3
PTAR Sędziszów Małopolski, Polonia		75.9
PTAR Botafogo, Brasil		69.9
Urbanización La Joya, Ecuador	PTAR San Fernando,	9.5*
PTAR Hajdów, Polonia	Itagüí	71.6
PTAR Sędziszów Małopolski, Polonia		80.8

Nota. Elaboración propia a partir de los datos obtenidos por cada autor (Véase anexo 1).

* Se evidencia una diferencia radical entre los subproductos, la metodología no se considera viable.

A partir de la comparación entre los lodos residuales provenientes de la PTAR Sędziszów Małopolski de Polonia y los biosólidos obtenidos en las principales plantas de tratamiento de aguas residuales del país, es posible identificar una gran similitud en lo que respecta a la concentración de nutrientes y contenido de humedad, lo cual sugiere una posible aplicación de estas metodologías para conformar materiales competentes en la sección de la ingeniería enfocada a la construcción de carreteras, y especialmente en la red nacional terciaria, dependiendo de las características mecánicas que se midan en los materiales resultantes, para lo cual, indudablemente se hace necesaria más investigación formal al respecto, incorporando materiales autóctonos.

Con relación a los materiales obtenidos en Brasil, es necesario aclarar que el contenido de humedad no es un parámetro suficiente para sugerir éxito en la aplicación de la metodología propuesta por Lucena a los materiales disponibles en Colombia. Es por esta razón que se sugiere realizar más investigación en cuanto a una caracterización más detallada de los nutrientes y metales pesados que se encuentran en los lodos obtenidos en la PTAR Botafogo de la ciudad de Recife.

El caso que se presenta con el lodo residual proveniente de la PTAR de la urbanización la Joya en Guayaquil, Ecuador, refleja diferencias considerables debidas al proceso de deshidratación al cual fue sometido este lodo. Al caracterizar el lodo previamente deshidratado, se altera la reproducibilidad de esta metodología en Colombia; no es posible realizar una mezcla de materiales con humedades tan reducidas, especialmente con el lodo residual, cuya característica principal es su elevado contenido de agua. Emplear este tipo de material en la conformación de un material granular competente afecta en gran medida a su capacidad estructural, es por esta razón que tanto los materiales utilizados como la metodología final no serán considerados como alternativas viables en este estudio y no serán tenidos en cuenta para los análisis posteriores.

Propuesta de aplicación

Tabla 32

Cuadro resumen de las metodologías investigadas para base y subbase granular

Autor	País	Aplicación	Composición del Material
Lucena et al.	Brasil	BG	80% Suelo; 20% Lodo residual con adición de 3% en peso de cal apagada.
		SBG	80% Suelo; 20% Lodo residual con adición de 1% en peso de emulsión asfáltica.
Feijoo G.	Ecuador	SBG	El material obtenido no se considera competente para su aplicación.
Franus et al.	Polonia	BG y SBG	90% Suelo arcilloso; 10% Lodo residual; 40mL de agua por cada 100g de mezcla suelo-lodo.
Wójcik et al.	Polonia	BG y SBG	Relación 1.0 Lodo residual 0.5 arena de cuarzo y 0.5 polvo de vidrio.

Nota. Elaboración propia a partir de los datos obtenidos por cada autor.

La tabla 32 consigna el resultado final en cuanto a composición del material aplicado a base o subbase granular para las vías terciarias de Colombia. Es importante aclarar que el éxito de cada metodología radica en el éxito individual de tres factores principales:

1. La similitud entre materiales, para este efecto el lodo residual, el suelo y los aditivos empleados por cada metodología.
2. La reproducibilidad acertada de los procesos efectuados en cada metodología, teniendo en cuenta la dosificación de los materiales, la tecnología utilizada y la rigurosidad empleada.
3. La conservación y cuidado del producto final.

Tabla 33*Resumen de la composición del material obtenido aplicando las metodologías en Colombia*

Autor	País	Aplicación	Extracción de lodo residual	Composición del Material
Lucena et al.	Brasil	BG	PTAR EI	85.62% Suelo; 14.38% Lodo residual con
			Salitre	adición de 3% en peso de cal apagada.
		SBG	PTAR San Fernando	86.02% Suelo; 13.98% Lodo residual con
			PTAR EI	adición de 3% en peso de cal apagada.
Franus et al.	Polonia	BG y SBG	PTAR EI	85.62% Suelo; 14.38% Lodo residual con
			Salitre	adición de 1% en peso de emulsión asfáltica.
Wójcik et al.	Polonia	BG y SBG	PTAR San Fernando	86.02% Suelo; 13.98% Lodo residual con
			PTAR San Fernando	adición de 1% en peso de emulsión asfáltica
Wójcik et al.	Polonia	BG y SBG	PTAR EI	93.27% Suelo arcilloso; 6.73% Lodo residual; 40mL de agua por cada 100g de mezcla suelo-lodo.
			Salitre	92.84% Suelo arcilloso; 7.16% Lodo residual; 40mL de agua por cada 100g de mezcla suelo-lodo.
Wójcik et al.	Polonia	BG y SBG	PTAR San Fernando	Relación 1.0 Lodo residual 0.5 arena de cuarzo y 0.5 polvo de vidrio.
			PTAR San Fernando	

Nota. Elaboración propia a partir de los datos obtenidos por cada autor.

Gracias a que el lodo residual es el componente principal sobre el cual se basa cada estudio, su proporción fue modificada en función del porcentaje de similitud encontrado comparando los lodos empleados en cada uno de los estudios con los lodos típicos obtenidos de las PTAR El Salitre y San Fernando. De esta manera se puede presentar una aproximación conservadora en cuanto a la composición que debería tener un material granular que vaya a ser empleado como capa de base o subbase granular para vías terciarias en Colombia que emplee una combinación de materiales extraídos en lugares aledaños a la zona de intervención. Es importante aclarar que más allá de emplear materiales con características y composiciones similares, el éxito final depende también de la rigurosidad en los procesos de sinterización, mezcla, conformación final y demás aspectos aplicables a cada metodología.

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- Hay suficiente experiencia a nivel mundial en el uso de lodos residuales como material de reemplazo parcial para la conformación de bases y subbases granulares de carreteras.
- Los materiales que se pueden obtener en el país se correlacionan de buena manera en el aspecto fisicoquímico con los empleados en cada estudio. Esto representa un buen punto de partida para la obtención de resultados satisfactorios en la posible aplicación de estas metodologías en el país.
- Los resultados obtenidos a partir del análisis de las propiedades mecánicas en cada estudio sugieren un buen comportamiento con base en la normativa local de cada país y, además, con la normativa colombiana.
- La alternativa de emplear lodos residuales provenientes de PTAR como material de reemplazo parcial para la conformación de bases y subbases granulares destinadas a vías terciarias en Colombia demuestra ser viable desde el punto de vista ingenieril.
- Las metodologías de fabricación de materiales granulares aplicadas en Brasil y Polonia se pueden considerar como una alternativa viable para aplicar en Colombia teniendo en cuenta la utilización de lodos residuales obtenidos de las plantas de tratamiento de aguas residuales El Salitre y San Fernando de Bogotá e Itagüí respectivamente.

Recomendaciones

De acuerdo con la investigación realizada, es viable la implementación de lodos residuales como material parcial de reemplazo en bases y subbases granulares. Sin embargo, los ensayos de compactación, densidad, CBR y demás relacionados no constituyen de por sí los requerimientos mínimos para su aplicación como tal en Colombia, es por esto por lo que es indispensable realizar investigación y ensayos que puedan concluir completamente la viabilidad de este tipo de materiales, generados en nuestras PTAR en la construcción de carreteras. Como se evidencia en el marco normativo, la exigencia que se tiene respecto de estos materiales granulares excede a los estudios presentados, por tanto, se recomienda documentar los ensayos posteriores que se realicen sobre conformaciones similares de proporción en peso por material granular adicionado con lodo residual, y con aditivos como cal, cemento o similares en caso de estar justificados mecánica, estructural, económica y medioambientalmente.

La motivación principal de los estudios presentados refleja el interés por empelar subproductos tenidos como “desechos” para valorizarlos y mezclarlos con áridos ligeros y materiales adicionales para producir materiales de alta demanda en el sector de la construcción de carreteras como bases y subbases granulares; en este contexto, Colombia es uno de los países que más provecho pueden obtener de la aplicación de estos estudios para reducir los costos constructivos, otorgando de manera simultánea soluciones a la problemática creciente de la disposición de lodos y biosólidos producidos en las plantas de tratamiento de agua residuales municipales en el país por los metales pesados, microorganismos patógenos y contaminantes orgánicos

inherentes a estos subproductos y contribuyendo de esta manera a la mejora de los índices de competitividad en Latinoamérica.

Más allá de establecer relaciones entre las propiedades físicas y mecánicas de los materiales obtenidos, se necesita expandir esta investigación hacia la determinación de relaciones de soporte de los materiales y consigo, la ejecución de ensayos de granulometría, límites de Atterberg y compactación Proctor, además de la realización de los diferentes ensayos de dureza, desgaste por abrasión, durabilidad y resistencia para confirmar su uso potencial como agregados de fabricación artificial para ser dispuestos como bases o subbases granulares.

Se justifica el empleo de lodos residuales como material de reemplazo parcial para la fabricación de materiales de BG y SBG con aplicación a las vías terciarias del país partiendo de los siguiente supuestos:

- Destinar recursos a la investigación previa en laboratorio con el interés de corroborar experimentalmente los resultados que se muestran en la literatura, así como también evaluar la viabilidad de estas aplicaciones desde el punto de vista técnico, en comparación con la normativa local y desde el punto de vista económico.
- Ampliar la inversión destinada a la caracterización completa de los lodos residuales generados en las PTAR cercanas a las carreteras a construir, además de promover la utilización de materiales granulares disponibles en las zonas de intervención para de esta manera generar ahorro por concepto de transporte de materiales.

Bibliografía

- Amador, A., Veliz, E., & Bataller, M. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 46(1-10),. ISSN: 1015-8553. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=1816/181642434003>.
- Araque Manrique, M. D. P. (2006). Evaluación de los tratamientos térmico y alcalino en la desinfección del lodo generado en la PTAR El Salitre (Master's thesis, Maestría en Ingeniería Civil).
- Ayala Garibay, E. A. (2020). Aprovechamiento de lodos residuales provenientes de las PTAR para la reducción del impacto ambiental.
- Batalha, B. 1989. Fossa séptica. Série de manuais. Companhia de tecnologia de saneamento ambiental, Governo do Estado de Sao Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, Brasil. pp. 2-4.
- Bouachera, R., Kasimi, R., Ibnoussina, M., Hakkou, R., & Taha, Y. (2021). Reuse of sewage sludge and waste glass in the production of lightweight aggregates. *Materials Today: Proceedings*, 37, 3866-3870.
- Collivignarelli, M. C., Canato, M., Abba, A., & Miino, M. C. (2019). Biosolids: what are the different types of reuse? *Journal of Cleaner Production*, 238, 117844.
- Coronel, A., & Falconí, J. (2006). Estudios y diseños de alternativas para la rehabilitación del tramo de vía: lago – intersección con vía principal ESPOL. Solución y reubicación de la tubería de agua existente. Guayaquil, EC, Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Davis, M. L. (2010). *Water and wastewater engineering: design principles and practice*. McGraw-Hill Education.

Dhir, R., Ghataora, G., & Lynn, C. (2017). Road Pavements. Sustainable Construction Materials. Woodhead Publishing, 209-223. DOI: 10.1016/B978-0-08-100987-1.00008-1.

Díaz, M. (2016). Proceso de secado de lodos y fangos contaminantes utilizando efecto invernadero. Guayaquil: UCSG.

Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M., & Ledin, A. (2002). Characteristics of grey wastewater. Urban water, 4(1), 85-104.

Feijóo González, A. E. (2016). Fabricación de sub-base para vías utilizando lodos remanentes de plantas de tratamiento de aguas residuales. Guayaquil, EC, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

Franus, M., Barnat-Hunek, D., & Wdowin, M. (2016). Utilization of sewage sludge in the manufacture of lightweight aggregate. Environmental monitoring and assessment, 188(1), 10.

García, O. N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. Caos conciencia, 1(1), 51-58.

González, M. A. R., Guzmán, J. M. G., & Mayorga, D. A. C. (2019). AVANCES EN EL SANEAMIENTO Y LA GESTIÓN DE BIOSÓLIDOS EN COLOMBIA. FACCEA, 9(2), 113-126.

Gross, M. A. (2005). Wastewater Characterization. University curriculum development for decentralized wastewater management.

Hernández, M. A. (1992), Depuración de aguas residuales. Servicio de publicaciones de la escuela de ingenieros de caminos de Madrid, España, p. 713.

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2003). Tipos de investigación. México: Editorial Mc Graw Hill.

Highways England, 2009. Manual of Contract Documents for Highway Works, Volume 1, Specification for Highway Works Series 800 Road Pavements – (11/04) Unbound, Cement and Other Hydraulically Bound Mixtures.

Ingunza, M. D. P. D., Júnior, O. F. D. S., & Medeiros, S. A. (2013). Sewage sludge as raw material in asphalt mixtures. In *Advanced Materials Research* (Vol. 664, pp. 638-643). Trans Tech Publications Ltd.

Lucena, L. C. D. F. L., Juca, J. F. T., Soares, J. B., & Marinho Filho, P. G. T. (2014). Use of wastewater sludge for base and subbase of road pavements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 33, 210-219.

Madera, C., J.P. Silva y R. Peña. 2005. Sistemas combinados para el tratamiento de aguas residuales basados en tanques sépticos- filtro anaerobio y humedales subsuperficiales. *Revista Ingeniería y Competitividad* 7(2), 5-10.

Muñoz Cruz, A. (2008). Caracterización y tratamiento de aguas residuales.

Romero Rojas, J. A. (2004). Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño. Bogotá, CO, Escuela Colombiana de Ingenieros.

Silva, J., Torres, P., & Madera, C. (2008). Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 26(2), 347-359.

Smol, M., Kulczycka, J., Henclik, A., Gorazda, K., & Wzorek, Z. (2015). The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 95, 45-54.

Temmisa: Control y Saneamiento de Agua (s.f.). Rejillas manuales y automáticas.
Recuperado de: <http://www.temmisa.com.mx/167285331>.

Torres P. 2001. Tratamiento de esgoto sanitario em sistema combinado anaeróbio (UASB-RSB). Tesis doctoral. Escola de Engenharia de Sao Carlos, Universidade de Sao Paulo, Sao Carlos (Brasil).

Torres, P., A. Pérez, J. Escobar, L. Barrios y C. Acosta. 2005. Optimización del tratamiento químico de las aguas residuales de la ciudad de Cali con diagramas de coagulación-floculación. *Revista Epíclidos* 4(1), 113-125.

Tsukamoto, R. 2002. Tratamiento primario avanzado: el paradigma moderno del tratamiento de aguas residuales sanitarias. Acodal, Cali.

U.S. Environmental Protection Agency, 2008. Municipal Solid Waste in The United States: 2007 Facts and Figures. EPA530-R-08-010. November.

Valdez, E., & Vázquez, A. (2003). Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. Fundación ICA, AC México DF México.

Von Sperling, M. 1996. Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Departamento de engenharia sanitária e ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

Wójcik, M., Bąk, Ł., & Stachowicz, F. (2018). Unconventional materials from sewage sludge with a potential application in a road construction. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 12(4).

Anexos

Anexo 1. Determinación de la similitud entre lodos residuales

Para determinar el porcentaje de similitud que existe entre cada lodo residual presentado en cada una de las cuatro metodologías estudiadas y los lodos residuales obtenidos en Colombia en la PTAR El Salitre de Bogotá y San Fernando de Itagüí, se tuvieron en cuenta las siguientes formulaciones:

$$\% \text{Diferencia} = \frac{|P_R - P_E|}{|P_E|} * 100$$

Donde:

P_R: Parámetro de referencia (Correspondiente a la PTAR Salitre o San Fernando).

P_E: Parámetro en estudio (Correspondiente a cada metodología).

Para determinar el nivel de influencia que cada parámetro tiene sobre el resultado final se empleó un ponderado, con un valor igual para cada parámetro en estudio.

A continuación, se determina el porcentaje de diferencia ponderado, que es el producto entre el porcentaje de diferencia y el ponderado:

$$\% \text{Diferencia Ponderado} = \% \text{Diferencia} * \text{Ponderado}$$

Para finalizar, el porcentaje de similitud se obtiene restando del 100% la suma de todos los porcentajes de diferencia ponderados obtenidos por cada parámetro en estudio:

$$\% \text{Similitud} = \left| 100 - \sum \% \text{Diferencia Ponderado} \right|$$

Los resultados obtenidos fueron los siguientes: