

IDENTIFICACIÓN DEL POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO DE LODOS INDUSTRIALES Y MUNICIPALES

>>>>>> EN LA FABRICACIÓN DE PEGANTE CERÁMICO PARA PISOS



Guissela Andrea Rebolledo Lozano

**IDENTIFICACIÓN DEL POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO DE LODOS
INDUSTRIALES Y MUNICIPALES EN LA FABRICACIÓN DE PEGANTE
CERÁMICO GRIS PARA PISOS**

GUISSELA ANDREA REBOLLEDO LOZANO

**Trabajo de grado para optar por el título de Magister en Ingeniería Sanitaria y
Ambiental**



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL
AMBIENTE
POSGRADO EN INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2018**

**IDENTIFICACIÓN DEL POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO DE LODOS
INDUSTRIALES Y MUNICIPALES EN LA FABRICACIÓN DE PEGANTE
CERÁMICO GRIS PARA PISOS**

GUISSELA ANDREA REBOLLEDO LOZANO
Código: 1503997

INES RESTREPO TARQUINO, MSc, PhD
Directora

Grupo de Investigación

SANEAMIENTO AMBIENTAL

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL
AMBIENTE
POSGRADO EN INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2018

NOTA DE APROBACIÓN

FIRMA DIRECTORA

FIRMA JURADO 1

FIRMA JURADO 2

DEDICATORIA

Esto es para ustedes y por ustedes:

A Dios, a la Virgencita y a mis Angelitos que día a día me inspiraron, me iluminaron y me llenaron de fuerzas para continuar y no desfallecer en este camino de formación.

A mi mamita Beatriz que desde el cielo siempre siento su apoyo, compañía y sabiduría.

A mis Padres, Hermano y Abuelito que son mi fuente eterna de inspiración y gracias a ellos puedo hacer posible lo que pensaba inalcanzable.

A mi gran amor Orlando, te dedico este logro que juntos construimos y aprendimos. Me ayudaste a tener calma en los momentos más turbulentos, fuiste un gran detonante para continuar y superarme. Gracias por llenarme de tanto amor, comprensión, energía, e ilusión en toda esta etapa.

A la Profesora Inés Restrepo por su confianza, grandes enseñanzas y compromiso con mi proceso de investigadora.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por su cariño, acompañamiento y motivación en todos los momentos más importantes de mi vida.

A mi amor Orlando Idárraga que fue un gran impulsor de energía, amor y motivación cuando tanto lo necesitaba. Sin tu apoyo nada de esto habría sido posible.

A mi directora Inés Restrepo por su orientación, apoyo incondicional, paciencia y grandes enseñanzas de vida.

Al Instituto CINARA por abrirme las puertas y permitirme ampliar mi conocimiento y mi visión de vida.

A mis compañeros de proyecto Marcela, Felipe, Liliana y Steven por motivarme y apoyarme en momentos claves.

A la Gobernación del Valle del Cauca que, a través del Fondo de Ciencia, Tecnología e Innovación del Sistema General de Regalías, financia e impulsa el desarrollo de la ciencia, investigación e innovación en el Valle del Cauca.

A la empresa Maecol por ofrecerme su orientación, colaboración en todo el proceso investigativo.

A la Ingeniera Viviana Valencia por sus recomendaciones y consejos acertados.

Al Tecnoparque del Sena por brindarme las herramientas y conocimiento necesarios para efectuar la fase experimental.

Al Profesor Wilmar Alexander Torres por su orientación oportuna en la búsqueda de conocimientos en el área estadística.

Al laboratorio de Combustión Combustibles por brindarme el espacio para realizar las pruebas y toda la orientación del personal.

A todas las empresas vinculadas que permitieron conocer sus procesos e investigar sus residuos.

A mis compañeros de PISA por ser una red de apoyo muy importante en este proceso.

A la Universidad del Valle por darme la oportunidad de crecer integralmente como profesional y persona.

A todas las personas que de una u otra manera aportaron a mi proceso de formación e investigación un granito de arena para cumplir con esta gran meta.

ABREVIATURAS

PTAR	Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales
STARI	Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
COT	Carbono Orgánico Total
CINARA	Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	14
ABSTRACT	15
1 INTRODUCCIÓN.....	16
2 JUSTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
3 ESTADO DEL ARTE	20
3.1 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	20
3.1.1 Generación de lodos residuales.	20
3.1.2 Tratamiento convencional de lodos residuales.	22
3.2 MORTERO	24
3.2.1 Adhesivos para la colocación de cerámicas.	24
3.2.2 Adherencia.	27
3.3 INVESTIGACIONES SOBRE REUTILIZACIÓN DE LODOS	28
3.4 ANTECEDENTES DE MANEJO DE LODOS EN CALI	32
4 OBJETIVOS	36
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	36
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	36
5 METODOLOGÍA.....	37
5.1 SELECCIÓN DE LODOS	37
5.2 CARACTERIZACIÓN DE LODOS INDUSTRIALES Y DOMÉSTICOS	38
5.3 FASE EXPERIMENTAL.....	41
5.4 ANÁLISIS DE COSTOS DE LOS PRODUCTOS OBTENIDOS	50
5.5 EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL IMPACTO AMBIENTAL.....	51
5.6 PROCESAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	53
6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
6.1 EMPRESAS SELECCIONADAS	54
6.2 CARACTERIZACIÓN DE LODOS	55
6.2.1 Caracterización de interés sanitario.	57
6.2.2 Caracterización mineralógica y química.....	60
6.2.3 Evaluación de los sistemas de acondicionamiento para lodos.....	65
6.3 FASE EXPERIMENTAL.....	68

6.3.1	Pruebas preliminares.....	68
6.3.2	Pruebas de calidad de los adhesivos cementicios.	70
6.4	ANÁLISIS DE COSTOS, FINANCIEROS Y ECONÓMICOS DE LOS PRODUCTOS OBTENIDOS.....	73
6.4.1	Análisis de costos.....	77
6.4.2	Evaluación financiera.....	78
6.4.3	Evaluación económica.....	82
6.5	EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL IMPACTO AMBIENTAL.....	85
7	CONCLUSIONES.....	95
8	RECOMENDACIONES.....	97
9	REFERENCIAS.....	98
10	ANEXOS.....	105

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Tabla de composición física y química típica del lodo residual	21
Tabla 2. Especificaciones para adhesivos cementicios.....	25
Tabla 3. Especificaciones para adhesivos en dispersión.....	26
Tabla 4. Especificaciones para adhesivos de resinas reactivas	27
Tabla 5. Estudios más representativos sobre el uso de lodos de la PTAR-Cañaveralejo en compostaje	32
Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.	40
Tabla 7. Mezcla de morteros para evaluación de resistencia a compresión.....	42
Tabla 8. Tratamientos del diseño experimental	46
Tabla 9. Empresas seleccionadas y vinculadas al proyecto.....	544
Tabla 10. Información sobre el manejo de los lodos en las empresas	55
Tabla 11. Análisis fisicoquímicos realizados a lodos industriales y municipal.....	58
Tabla 12. Compilado de resultados obtenidos de materia orgánica	61
Tabla 13. Composición química obtenida de los lodos industriales y municipal	61
Tabla 14. Resultado de análisis mineralógico de las muestras de lodo mediante DRX	64
Tabla 15. Diseño experimental para la estabilización de lodos	66
Tabla 16. Análisis de microorganismos de los tratamientos evaluados	67
Tabla 17. Dosificación de morteros para evaluación de resistencia a compresión	68
Tabla 18. Resistencia a compresión de morteros de cemento	69
Tabla 19. Efecto considerando la interacción entre los niveles de ambos factores para la resistencia a tracción después de Tiempo Abierto	71

Tabla 20. Efecto considerando la interacción entre los niveles de ambos factores para la resistencia a tracción después de inmersión en agua	72
Tabla 21. Indicadores para el Lodo de Control sobre la respuesta de la resistencia después de Tiempo Abierto.....	73
Tabla 22. Indicadores para el Lodo Control sobre la respuesta de la Resistencia a tracción despues de inmersión	73
Tabla 23. Información técnica de sistemas de producción de pegante para cerámica tradicional (E1) y pegante para cerámica con lodos (E2)	74
Tabla 24. Maquinaria requerida para la producción de pegante de cerámica tradicional (escenario 1)	75
Tabla 25. Maquinaria para producción de pegante de cerámica con lodo (escenario 2) ..	75
Tabla 26. Recurso humano operacional requerido para E1 y E2	77
Tabla 27. Costos unitarios discriminados para cada escenario	78
Tabla 28. Flujo neto de caja obtenido para el escenario 1	79
Tabla 29. Indicadores financieros obtenidos para E1	80
Tabla 30. Análisis de sensibilidad para E1 con decrecimiento de 15% en ventas.....	80
Tabla 31. Flujo neto de caja obtenido para E2	81
Tabla 32. Indicadores financieros obtenidos para E2.....	81
Tabla 33. Análisis de sensibilidad para E2 con decrecimiento de 14% en ventas.....	82
Tabla 34. Listado de RPC utilizados en la evaluación económica de alternativas	82
Tabla 35. Cálculo de externalidades	83
Tabla 36. Flujo neto de caja total para la evaluación económica de E1.....	83
Tabla 37. Indicadores económicos obtenidos en la evaluación económica para E1.....	83
Tabla 38. Flujo neto de caja total para la evaluación económica de E2.....	84
Tabla 39. Indicadores económicos obtenidos en la evaluación económica para E2.....	84
Tabla 40. Comparación de los resultados obtenidos en los escenarios 1 y 2	85

Tabla 41. Material requerido para la producción anual	86
Tabla 42. Requerimientos de maquinaria y equipos para el proceso productivo.....	87
Tabla 43. Factores de emisión empleados para el análisis	88
Tabla 44. Cálculos de emisiones de CO ₂ para el proceso productivo de E1	90
Tabla 45. Cálculos de emisiones de CO ₂ equivalentes asociados a la gestión y disposición final de los lodos industriales	91
Tabla 46. Cálculos de emisiones de CO ₂ para el proceso productivo de E1	92
Tabla 47. Emisiones totales para cada uno de los escenarios	93
Tabla 48. Emisiones de CO ₂ equivalente en diversos materiales de la industria de la construcción	94

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de los tipos de muestreos realizados	39
Figura 2. Esquema de proceso de cuarteo (Adaptada de SAMANCTA, 2015)	39
Figura 3. Metodología para la medición de resistencia a la compresión	43
Figura 4. Contenido del mortero de juntas	45
Figura 5. Esquematización del proceso de fabricación del mortero de juntas para baldosas	47
Figura 6. Metodología para fabricar bloques de cemento	48
Figura 7. Procedimiento para la medición de la resistencia adhesiva a la tracción de los pegantes	49
Figura 8. Procedimiento para la medición de tiempo abierto de los adhesivos para baldosas	50
Figura 9. Patrones de difracción de muestras de lodos industriales y municipal	63
Figura 10. Procedimiento para la estabilización térmica	66
Figura 11. Procedimiento para la estabilización álcali	67
Figura 12. Cilindro de morteros después de inmersión al agua	70
Figura 13. Diagrama de flujo del proceso de producción de pegante de cerámica E1 y E2	74
Figura 14. Diagrama de flujo para el proceso productivo del pegante para baldosas	85

RESUMEN

La creciente generación de lodos procedentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) se ha convertido en un gran desafío para los investigadores en las últimas décadas, puesto que a causa de sus características especiales se debe garantizar que haya una gestión integral para eliminar cualquier riesgo de producir impactos ambientales negativos. Por tanto, se busca que la gran generación de estos residuos sea incorporada a ciclos productivos para su valorización y disminución de los impactos ambientales negativos que se pueda generar por su inadecuada disposición.

La presente investigación evaluó la incorporación de lodos residuales industriales y municipales en la fabricación de pegante cerámico. Se evaluaron las diversas características de los lodos y se implementó un diseño experimental en colaboración con la empresa MAECOL para identificar la calidad de los pegantes. Se encontró que el lodo más adecuado para sustituir un porcentaje de los agregados convencionales del pegante cerámico es el producido por la empresa 2 del sector de metalmecánica, ya que se obtuvieron resistencias a la tracción mayores, siendo el mejor comportamiento cuando se reemplaza el 10% de este lodo (0.34 MPa). Cabe resaltar que cuando se utiliza en 20 y 30% disminuye la resistencia, sin embargo, todos los valores son aceptables. De igual manera al analizar conjuntamente las evaluaciones ambiental, económica y financiera se evidencia un gran potencial para seguir escalando este tipo de estrategias de cierre de ciclos, que antes no había sido considerada.

Palabras claves: aguas residuales, lodos, materiales de construcción, aprovechamiento

ABSTRACT

The growing generation of sludge from Wastewater Treatment Plants (WWTP) has become a great challenge for researchers in recent decades, since due to its special characteristics it must be guaranteed that there is a comprehensive management to eliminate any risk of producing negative environmental impacts. Therefore, it is intended that the large generation of these wastes be incorporated into productive cycles for their valorization and reduction of negative environmental impacts that may be generated by their inadequate disposal.

The present investigation evaluated the incorporation of industrial and municipal waste sludge in the manufacture of ceramic adhesive. The various characteristics of the sludge were evaluated and an experimental design was implemented in collaboration with the company MAECOL to identify the quality of the glue. It was found that the most suitable sludge to replace a percentage of the conventional aggregates of the ceramic adhesive is the one produced by the company 2 of the metalworking sector, since higher tensile strengths were obtained, being the best behavior when 10% is replaced of this mud (0.34 MPa). It should be noted that when it is used in 20 and 30% resistance decreases, however, all values are acceptable. Similarly, when analyzing the environmental, economic and financial assessments together, there is great potential to continue scaling up this type of cycle closure strategies, which had not previously been considered.

Key words: waste water, sludge, construction materials and reuse

1 INTRODUCCIÓN

La creciente cantidad de desechos producidos y el progresivo énfasis en actuar de acuerdo con el desarrollo sostenible orienta la investigación que se debe llevar a cabo en nuevos conceptos de gestión de residuos, que requieren que sean utilizados en diversas industrias como materias primas (Lynn *et al.*, 2016). En los procesos específicos de tratamiento de aguas se están produciendo continuamente un volumen considerable de subproductos de diferente naturaleza, entre los que se encuentran los lodos procedentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). Estos lodos se caracterizan por ser materiales semisólidos removidos del agua residual, constituidos por una mezcla heterogénea de microorganismos patógenos, materia orgánica no digerida, arenas, natas y otros materiales que pueden tener características peligrosas, los cuales se producen en mayor proporción durante los tratamientos primarios y secundarios de las PTAR, dado que en estos puntos hay mayor retención de sólidos sedimentables y materia orgánica (Oropeza, 2006). Sin embargo, la composición de estos lodos está directamente relacionada con los procesos de tratamiento aplicados y la calidad del afluente de la planta (Romero, 2002).

A medida que el número de PTAR ha aumentado, también se han incrementado sustancialmente la cantidad de lodos y el posible impacto negativo al medio ambiente y a la salud pública. Por ejemplo, en Estados Unidos en el 2009 se estimó una generación de 8,2 millones de toneladas (Jiang *et al.*, 2011), mientras que en la Unión Europea la producción de lodos se ha duplicado del año 1992 al 2010, específicamente en Bulgaria, República Checa, Estonia, Lituania, Letonia, Malta, Polonia, Rumania, Eslovaquia, Eslovenia, Chipre y Hungría, el aumento de la producción fue del 100% en 2010-2011 (2,5 millones de toneladas métricas de lodo en total) (Collivignarelli *et al.*, 2017; Grobelak *et al.*, 2016).

En el continente asiático, Japón, desde 1990 hasta 2004, tuvo un aumento en la producción de lodo hasta en un 170% y actualmente, se reporta una generación de más de 2,2 millones de toneladas de materia seca de sedimentos (Hong *et al.*, 2009). Mientras que, en China en el 2013, se produjeron 6,25 millones de toneladas de lodo, lo cual estuvo asociado con el desarrollo repentino de PTAR (Yang *et al.*, 2015); dicha situación demuestra una tasa de generación considerable a nivel mundial (Wang *et al.*, 2016). La producción de lodos es mucho más baja en países en vía de desarrollo que en los países desarrollados, puesto que existe una menor cantidad de PTAR por persona y se aplican diferentes métodos de gestión de lodos (Drechsel *et al.*, 2015).

El lodo, como subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, durante muchos años ha sido utilizado principalmente para el uso en la agricultura y relleno en el suelo (Fijalkowski *et al.*, 2017); no obstante, dichos usos han presentado algunas desventajas significativas que limitan en algunos casos su aplicación. Por esta razón, muchas

investigaciones se han enfocado en estudiar otras alternativas de tratamiento y aprovechamiento de los lodos con una tendencia a renunciar a las soluciones convencionales, debido a la disminución gradual de la capacidad de los rellenos sanitarios y prohibiciones de su almacenamiento (Swierczek *et al.*, 2018).

Por lo tanto, nuevos estudios buscan evaluar tecnologías de tratamiento que contribuyan con la minimización y mitigación de los drásticos impactos causados al medio ambiente. Entre ellos se encuentran mecanismos que buscan cerrar los ciclos de los residuos producidos, por medio de estrategias que permitan aprovechar y valorizar los residuos. En este caso que los lodos puedan reincorporarse a nuevos ciclos productivos donde se aproveche su potencial, garantizando un manejo ambientalmente adecuado, seguro y que estén acordes con la condición social de la comunidad y con los requerimientos básicos que el sistema necesita para que sean sostenibles en el tiempo.

Gran parte de las investigaciones centradas en la valorización se han enfocado en la utilización de estos lodos como materia prima para la producción de diversos materiales de construcción, los cuales han demostrado un gran potencial para sustituir materias primas, puesto que disminuyen los costos de los productos terminados como el cemento Portland, ladrillos de mampostería, material de relleno para carreteras y caminos, entre otros (Vinay & Shang-Lien, 2013).

En este trabajo de investigación se estudió la viabilidad de fabricar un nuevo material de construcción, pegante cerámico para baldosas de color gris, sustituyendo la materia prima convencional de relleno o volumen (marmolinas, arenas u otros) por lodos tratados generados en PTAR industriales y municipales. La investigación se realizó en el marco del proyecto ESTRATEGIAS PARA LA RECUPERACIÓN Y MANEJO INTEGRADO DEL RECURSO HÍDRICO EN LAS CUENCAS DEL CAUCA Y DAGUA EN EL VALLE DEL CAUCA, financiado por la Gobernación del Valle a través del Fondo de Ciencia, Tecnología e Innovación del Sistema General de Regalías y contó con la colaboración del Tecno parque del SENA y de la empresa MAECOL.

2 JUSTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La creciente generación de lodos procedentes de las PTAR se ha convertido en un gran desafío para los científicos, ingenieros y otros profesionales en las últimas décadas, puesto que a causa de sus características especiales se debe garantizar que haya una gestión integral para eliminar cualquier riesgo de producir impactos ambientales negativos. A nivel mundial, se ha tenido evidencias de una alta producción, en el 2008 en Estados Unidos se estaban produciendo cerca de 6,5 millones de toneladas al año (Shen *et al.*, 2015), mientras que, en Europa, en el 2009, tenían una generación de 10,2 millones de toneladas al año (Pavlík *et al.*, 2016) y una proyección de crecimiento al 2020 del 30%, es decir 12,9 millones de toneladas al año (Olkiewicz *et al.*, 2012). Por otra parte, en Colombia, Daguer (2003) reportó que en las principales PTAR de Colombia se generan 274 toneladas de biosólidos al día (94 toneladas base seca), en donde el 97% de esta producción es generada por tres plantas: El Salitre (Bogotá), Cañavalejo (Cali) y San Fernando (Medellín), evidenciando de esta manera que estos residuos se están generando en volúmenes muy grandes a escala nacional.

En el contexto local, las políticas de protección del recurso hídrico en Colombia han fomentado la construcción de PTAR tanto municipales como industriales. Aunque éstas logran controlar en gran medida los problemas de contaminación hídrica, también generan un alto volumen de subproductos que traen múltiples implicaciones al ambiente (Daguer, 2003). Junto con esta gran generación, otro problema que se ha evidenciado que el 30%-50% de los costos de tratamiento del agua residual están asociados a la gestión y el tratamiento de los lodos (Pavlík *et al.*, 2016; Romero, 2012). Es por ello que el tratamiento, la reutilización y eliminación de los lodos presentan uno de los problemas más complejos que enfrenta la ingeniería en el campo de tratamiento de aguas residuales, además de la posible generación de graves impactos en la salud humana y al ambiente por la inadecuada gestión de estos subproductos puede generar

Es por ello que investigar en el campo de valorización de los lodos cobra gran relevancia, dado que el exceso de lodo de aguas residuales producido en cualquier PTAR municipales o industriales se convierte en un problema grave. La implementación y el desarrollo de nuevas tecnologías relacionadas con la utilización de lodos actualmente se basan en tratarlo como un sustrato para reincorporarlo en nuevos procesos productivos (Swierczek *et al.*, 2018). Uno de los sectores productivos en los que se pueden utilizar los lodos es en la industria de la construcción, que desempeña un papel importante tanto en los países en vía de desarrollo como en los desarrollados. La acción proambiental y las prácticas de construcción sostenible, así como una creciente demanda de materiales para la construcción, son los factores que contribuyen al uso de subproductos en esta industria (Smol *et al.*, 2015; Supino *et al.*, 2016).

Por consiguiente, emplear lodos tratados en la producción de materiales de construcción ha mostrado ser una alternativa promisorio para aprovechar el gran potencial que tienen estos subproductos de las PTAR, suprimiendo algunas etapas costosas y con grandes gastos energéticos para su eliminación. Aún más promisorio, si se investigan otro tipo de productos innovadores empleando en sus materias primas lodos municipales e industriales, como lo es el mortero de juntas para baldosas cerámicas. Este material tiene un proceso productivo más sencillo que el que puede tener la fabricación del cemento Portland y son ampliamente utilizados, lo que implica una reducción de costos y menor cantidad de requerimientos tecnológicos para su producción.

Esta estrategia de valorización puede minimizar y/o mitigar los impactos negativos que se generan en la inadecuada gestión de estos lodos, convirtiendo estos residuos nocivos para el ambiente en un producto estable y seguro, lo que está acorde con las políticas de protección establecidas por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Salud y Autoridades Ambientales Regionales y Municipales. De igual manera permite las sinergias entre empresas privadas y la academia, con el fin de que optimicen procesos y se innove en la creación de materiales de construcción a partir del aprovechamiento de lodos poco investigados.

Es así como el trabajo de investigación se fundamentó en la identificación del potencial de aprovechamiento de la incorporación de lodos industriales y municipales en la fabricación de pegante cerámico gris para pisos.

3 ESTADO DEL ARTE

3.1 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El agua residual doméstica es esencialmente el agua empleada por la comunidad en una variedad de aplicaciones y contiene constituyentes que la hacen inadecuada para la mayoría de usos sin tratamiento. Además, aguas residuales sin tratar contienen numerosos microorganismos patógenos que habitan en el tracto intestinal humano. Adicionalmente, estas aguas poseen nutrientes, que pueden estimular el crecimiento de las plantas acuáticas y pueden contener compuestos tóxicos o compuestos que pueden ser potencialmente mutagénicos o cancerígenos (Metcalf & Eddy *et al.*, 2013).

El tratamiento de aguas residuales está constituido por un gran número de operaciones y procesos que permiten la depuración de sustancias contaminantes del agua. Este tratamiento se encuentra subdividido en diferentes tratamientos: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario o avanzado. El pretratamiento tiene como objeto remover del agua aquellos constituyentes que puedan causar dificultades de operación y mantenimiento en los procesos posteriores o que, en algunos casos, no pueden tratarse conjuntamente con los demás componentes del agua residual (Romero, 2002).

El tratamiento primario se refiere comúnmente a la remoción parcial de sólidos suspendidos, materia orgánica y organismos patógenos, mediante sedimentación u otro medio, y constituye un método de preparación del agua para el tratamiento secundario. Por lo general, el tratamiento primario remueve alrededor de 60% de los sólidos suspendidos del agua residual cruda y el 35% a 40% de la DBO₅. El tratamiento secundario convencional se usa principalmente para remoción de DBO₅ soluble y sólidos suspendidos e incluye, por ello, los procesos biológicos de lodos activados, filtros percoladores, sistema de lagunas y sedimentación. Por último, se encuentra el tratamiento terciario y avanzado, que supone generalmente la necesidad de remover nutrientes para prevenir la eutrofización de las fuentes receptoras o de mejorar la calidad del agua de un efluente secundario con el fin de adecuar el agua para su reúso (Romero, 2002).

3.1.1 Generación de lodos residuales

Los lodos residuales se caracterizan por ser materiales semisólidos removidos del agua, que generalmente se producen en mayor proporción esencialmente de los tratamientos primarios y secundarios de las PTAR, pues en estos puntos hay mayor retención de sólidos sedimentables y materia orgánica (Ramalho, 1996), los cuales detienen una gran mezcla heterogénea de microorganismos patógenos, materia orgánica no digerida, arenas, natas y otras materiales que pueden tener características peligrosas.

Los lodos de depuración primaria se generan a través de un proceso de tratamiento mecánico de las aguas residuales (cribado, desarenado y sedimentación), por lo general contienen de 93% a 99,5% de agua y un alto porcentaje de materia orgánica suspendida y disuelta. Los residuos de lodos activados o fangos secundarios, se generan durante el tratamiento biológico de las aguas residuales, y contiene principalmente células microbianas que son materiales complejos orgánicos poliméricos. La concentración total de sólidos en rangos de lodos secundarios fluctúa entre 0,8% y 1,2%, que también depende del tipo de proceso de tratamiento biológico empleado (Tezel *et al.*, 2014). Las características de estos lodos dependen principalmente del origen del agua residual, la edad del agua residual, el tipo de tratamiento que han aplicado y el tiempo de retención en las etapas de tratamiento, los valores típicos de la composición física y química se muestran en la Tabla 1. Sin embargo, la cantidad de lodo producido y sus características dependen también del tipo de proceso, por ejemplo, un lodo primario presenta mejores características de sedimentación que uno secundario, además que tendrá una mayor concentración de sólidos (Metcalf & Eddy *et al.*, 2013).

Tabla 1. Composición física y química típica del lodo residual

Concepto	Unidades	Lodo primario	Lodo primario digerido	Lodo secundario
Concentración de sólidos	%	5-9	2-5	0.8-1.2
Sólidos volátiles	% de ST ¹	60-80	30-60	59-88
Proteína	% de ST	20-30	15-20	32-41
Nitrógeno (N)	% de ST	1.5-4	1.6-3	2.4-5
Fósforo (P ₂ O ₅)	% de ST	0.8-2.8	1.5-4	2.8-11
Óxido de potasio (K ₂ O)	% de ST	0-1	0-3	0.5-0.7
Celulosa	% de ST	8-15	8-15	-
Hierro	% de ST	2-4	3-8	-
Óxido de silicio (SiO ₂)	% de ST	15-20	10-20	-
pH	u. pH	5-8	6.5-7.5	6.5-8
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /l	500-1,500	2,500-3,500	580-1,100
Ácidos orgánicos	mg HAc/l	200-2,000	100-600	1,100-1,700
Contenido energético	kJ ST/kg	23,000-29,000	9,000-14,000	19,000-23,000

Fuente: Metcalf & Eddy *et al.* (2013)

En principio, los lodos pueden ser clasificados en tres categorías: aprovechables, no aprovechables y peligrosos (Donado, 2013):

- **Lodos Aprovechables:** Son los lodos provenientes de un proceso de tratamiento que puede ser reutilizado directa o indirectamente en reciclaje, compostaje y generación de energía. La mayoría de los lodos provenientes de los procesos de tratamiento aerobios y anaerobios de las plantas de tratamiento de aguas residuales, una vez estabilizados, pueden ser utilizados como abonos, acondicionadores y restauradores de suelos.
- **Lodos no Aprovechables:** Son lodos que no tienen características aceptables para algún aprovechamiento, por ejemplo, tienen muy poca o nula carga orgánica o poder calorífico muy bajo, estos pueden ser desechados junto con los residuos sólidos de origen doméstico.
- **Lodos Peligrosos:** Son aquellos que contienen cargas contaminantes que no permiten su aprovechamiento porque pueden causar daño a la salud humana o al medio ambiente que deben ser dispuestos en sitios especiales con las medidas adecuadas de seguridad que garanticen su estabilidad.

3.1.2 Tratamiento convencional de lodos residuales

El tratamiento convencional de los lodos depende directamente de que deseé o que requiera hacer el generador con estos residuos, si por un lado desea eliminarlos completamente o por otro busca técnicas de aprovechamiento que le permitan reincorporar a nuevos ciclos productivos. Asimismo, este tipo de tratamiento escogido va a estar regido por la normatividad vigente del país donde se trabaje, dado que en algunos casos pueden admitir métodos de disposición final que en otros países están completamente prohibidos.

Según las experiencias en manejo y aprovechamiento de lodos de agua residual doméstica, puede ser necesario realizar una serie de etapas que busquen hacer un tratamiento previo o también llamado acondicionamiento a los lodos, con el fin de mejorar las condiciones de los lodos para optimizar los procesos en su manejo (Acevedo, 2016) y reducir la atracción de vectores, la producción de olores y los riesgos a la salud (Limón, 2013). Es importante tener en cuenta que para seleccionar y aplicar el tratamiento previo adecuado inicialmente se debe conocer la naturaleza de lodo, es decir identificar por medio de una caracterización cuáles son sus componentes principales para así mismo determinar que métodos serán más efectivos, eficientes y pertinentes. Entre estos se encuentran (Romero, 2002):

a. **Espesamiento:** Consiste en aumentar la concentración del lodo y reducir el volumen total. Entre las opciones se encuentra espesamiento por gravedad, flotación o aire disuelto. Las tecnologías utilizadas comúnmente son centrifugación, filtro de banda, tambor giratorio, de desarenado, sedimentación, espesadores mecánicos, flotación.

b. **Deshidratación:** Se refiere a los sistemas de desaguado de lodos que buscan reducir el contenido de agua del lodo a menos del 85%, con el fin de facilitar el manejo del lodo. Se puede llevar a cabo mediante filtro de vacío, centrifugación, filtro banda, filtro prensa, lechos de secado, rejillas vibratorias.

c. **Acondicionamiento:** Se realiza para obtener un lodo desaguado de buena concentración de sólidos. Entre los métodos se encuentra acondicionamiento con compuestos químicos y procesos térmicos (calor, o congelamiento).

d. **Estabilización:** Son los procesos físicos, químicos o biológicos a los que se someten los lodos para acondicionarlos para su aprovechamiento o disposición final para evitar o reducir sus efectos contaminantes al medio ambiente. Se puede llevar a cabo por medio de estabilización con cal, procesos térmicos, digestión anaerobia o aerobia, compostaje. La adición de cal permite eliminar olores y patógenos mediante la creación de un pH igual a 12, además la cal mejora las características de secado y sedimentación del lodo y reduce el poder fertilizante del lodo estabilizado en comparación con el lodo digerido anaeróbicamente.

e. **Reducción térmica:** Se puede llevar a cabo por medio de incineración (incinerador de pisos, de lecho fluidificado, co-incineración con residuos sólidos), pirolisis, oxidación y reactor vertical profundo.

f. **Digestión:** Se aplica con el propósito de producir un compuesto final más estable y eliminar cualquier microorganismo patógeno presente en el lodo crudo. Se puede llevar a cabo mediante digestión aerobia, digestión anaerobia y oxidación húmeda. La digestión anaerobia se usa principalmente para estabilizar lodos primarios y secundarios y el resultado es reducir el contenido volátil cerca del 50% y los sólidos a aproximadamente el 70% de su valor original.

g. **Desinfección:** La desinfección del lodo ha adquirido mucha importancia como proceso adicional debido a las restrictivas normas aplicables a la reutilización del lodo y a su aplicación al suelo. En la aplicación del lodo al suelo, la protección de la salud pública obliga a controlar el posible contacto con organismos patógenos. Existen muchos medios para conseguir la eliminación de los patógenos presentes en los lodos líquidos y deshidratados. Algunos procesos de estabilización, como la digestión anaerobia y digestión aerobia, no desinfectan el lodo, pero permiten reducir considerablemente la presencia de organismos patógenos. Los métodos más adecuados para la desinfección de líquidos procedentes, tanto de la digestión aerobia como de la anaerobia, son la pasteurización y el almacenamiento a largo plazo (Hammeken & Romero , 2005).

3.2 MORTERO

El mortero es una mezcla de aglomerantes inorgánicos (resina epóxica, yeso o cemento), áridos (arena, grava, marmolinas, etc), agua y eventualmente un material aditivo (expansores o microsílíce) y adicionante (cal o microsílíce) que con adición de agua reacciona y adquiere resistencia, que sirven para pegar elementos de construcción especializados tales como ladrillos, piedras, bloques de hormigón, baldosas. Adicionalmente se usa para rellenar los espacios que quedan entre los bloques y dependiendo de las mezclas que se realicen de cemento y arena (materiales más comunes) se pueden conseguir diferentes durezas. Los morteros pueden ser clasificados en función de diferentes variables: según el conglomerante o característica específica, según su uso o aplicación, según el método de fabricación y según la forma de suministro (Paéz & Aguilar, 2013).

No obstante, una de las clasificaciones más empleadas es en función de su uso o aplicación, la cual tiene tres categorías: la primera es el mortero de juntas empleado para unir monolíticamente unidades de albañilería de piedras, ladrillos o bloques de hormigón, la segunda corresponde al mortero de relleno utilizado para rellenar los huecos de las unidades de albañilería y por último el mortero de estuco, el cual es aplicado a una superficie para mejorar su terminación (Carmona, 2010).

3.2.1 Adhesivos para la colocación de cerámicas

Son materiales para la colocación de baldosas cerámicas que se fabrican industrialmente y se suministran en uno o varios componentes para su aplicación por el sistema de capa delgada. Tradicionalmente se conocían como cementos cola o morteros cola, sin embargo, se ha adoptado un término más específico a su función y pasan a denominarse Adhesivos para la Colocación de Baldosas Cerámicas, puesto que a los tradicionales con base cemento (morteros cola) se unen ahora los adhesivos de Dispersión (pastas adhesivas) y los adhesivos de resinas de reacción (Asociación Nacional de Fabricantes de Morteros Industriales, 2013).

Los adhesivos son clasificados en tres tipos adhesivos cementicios (C), adhesivos en dispersión (D) y adhesivos de resinas reactivas (R), y para cada uno de estos existen diversas clases relacionadas con las diferentes características adicionales y especiales de acuerdo con las clases designadas con las anteriores letras y los números descritos a continuación (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2014):

- 1: Adhesivo normal.
- 2: Adhesivo mejorado.
- F: Adhesivo cementicio con fraguado rápido.
- A: Adhesivo en dispersión con secado rápido.
- T: Adhesivo con resistencia al deslizamiento.

- E: Adhesivo con tiempo abierto extendido.
 S: Adhesivo cementicio con características especiales de deformabilidad.
 P: Adhesivo con adherencia a madera contrachapeada para uso en exteriores.
 H: Adhesivo con resistencia especial al calor.
 I: Adhesivo con resistencia especial a la inmersión en agua.

3.2.1.1 Especificaciones técnicas nacionales

Ahora bien, la Norma Técnica Colombiana NTC 6050-1 expedida en el año 2014 suscribe los requisitos que deben cumplir cada una de las propiedades de los adhesivos principales, que son:

- **Adhesivo cementicio (C):** Mezcla de conglomerantes hidráulicos, cargas minerales, y aditivos orgánicos, que solo tiene que mezclarse con agua justo antes de su uso. Este material debe cumplir con las características de los adhesivos C1 o C2, como se presenta en el Tabla 2, en caso de que el adhesivo tenga características especiales (C3) pueden cumplir con otras propiedades reportadas en la norma.

Tabla 2. Especificaciones para adhesivos cementicios

Clasificación	Propiedad	Requisito	Método de ensayo de la NTC 6050-2
C1 - Adhesivo cementicio normal en revestimientos con absorción >6% ^A (características fundamentales)	Resistencia adhesiva a la tracción	$\geq 0.8 \text{ N/mm}^2$	4.4.4.2
	Resistencia adhesiva a la tracción luego de inmersión en agua	$\geq 0.5 \text{ N/mm}^2$	4.4.4.3
	Resistencia adhesiva a la tracción luego de ciclos de hielo-deshielo ^B	$\geq 0.5 \text{ N/mm}^2$	4.4.4.5
	Tiempo abierto: Resistencia adhesiva a la tracción	$\geq 0.5 \text{ N/mm}^2$ luego de no menos de 20 min	4.1
C2- Adhesivos de desempeño mejorado para todo tipo de revestimiento en uso interior y exterior- (características adicionales)	Resistencia adhesiva a la tracción	$\geq 1.0 \text{ N/mm}^2$	4.4.4.2
	Resistencia adhesiva a la tracción luego de inmersión en agua	$\geq 0.5 \text{ N/mm}^2$	4.4.4.3
	Resistencia adhesiva a la tracción luego de envejecimiento al calor	$\geq 0.5 \text{ N/mm}^2$	4.4.4.4
	Resistencia adhesiva a la tracción luego de ciclos de hielo-deshielo ^B	$\geq 1.0 \text{ N/mm}^2$	4.4.4.5
	Tiempo abierto: Resistencia adhesiva a la tracción	$\geq 0.5 \text{ N/mm}^2$ luego de no menos de 20 min	4.1
^A Los valores de absorción se refieren a los obtenidos según el método de ensayo descrito en la NTC 4321-3			

Fuente: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2014)

- **Adhesivo en dispersión (D):** Mezcla de conglomerante(s) orgánico(s) en forma de polímero en dispersión acuosa, aditivos orgánicos y cargas minerales, que se presenta lista

para su uso. Todos los adhesivos de esta clase deben cumplir con las características fundamentales expuestas en el Tabla 3.

Tabla 3. Especificaciones para adhesivos en dispersión

Clasificación	Propiedad	Requisito	Método de ensayo en la NTC 6050-2
D1-Adhesivo normal para uso interior en revestimientos con absorción > 6 % ^A (características fundamentales)	Resistencia adhesiva en cortante	$\geq 1,0 \text{ N/mm}^2$	4.3.4
	Tiempo abierto: resistencia adhesiva a la tracción	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$ después de al menos 20 min	4.1
D2-Adhesivo mejorado para todo tipo de revestimiento en uso interior y exterior (características adicionales)	Resistencia adhesiva en cortante	$\geq 1,0 \text{ N/mm}^2$	4.3.4
	Resistencia adhesiva en cortante luego de 21 días de curado al aire, 7 días de inmersión en agua	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$	4.3.5
	Resistencia adhesiva en cortante a temperatura elevada	$\geq 1,0 \text{ N/mm}^2$	4.3.7
	Tiempo abierto: resistencia adhesiva a la tracción	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$ después de al menos 20 min	4.1
^A Los valores de absorción se refieren a los obtenidos según el método de ensayo descrito en la NTC 4321-3			

Fuente: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2014)

- **Adhesivo de resinas reactivas (R):** Mezcla de resinas sintéticas, aditivos orgánicos y cargas minerales cuyo endurecimiento resulta de una reacción química. Están disponibles en forma de uno o más componentes. Para el caso de esta clase de adhesivo deben cumplir con las especificaciones descritas en la Tabla 4 Con relación a las características de resistencia química, no hay indicación del valor límite para el agente químico.

Tabla 4. Especificaciones para adhesivos de resinas reactivas

Clasificación	Propiedad	Requisito	Método de ensayo en la NTC 6050-2
R1-Adhesivos normales (Características fundamentales)	Resistencia adhesiva en cortante	$\geq 2,0 \text{ N/mm}^2$	4.3.4
	Resistencia adhesiva en cortante luego de inmersión en agua	$\geq 2,0 \text{ N/mm}^2$	4.3.5
	Tiempo abierto: Resistencia adhesiva a tracción	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$, después de al menos 20 min	4.1
R2-Adhesivos mejorados (Características adicionales)	Resistencia adhesiva en cortante	$\geq 2,0 \text{ N/mm}^2$	4.3.4
	Resistencia adhesiva en cortante luego de inmersión en agua	$\geq 2,0 \text{ N/mm}^2$	4.3.5
	Tiempo abierto: Resistencia adhesiva a tracción	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$, después de al menos 20 min	4.1
	Resistencia adhesiva en cortante, luego de choque térmico	$\geq 2,0 \text{ N/mm}^2$	4.3.8

Fuente: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2014)

3.2.2 Adherencia

La adherencia es el conjunto de fuerzas de relación que se establecen en la unión entre dos superficies, de igual o distinta naturaleza, cuando entran en contacto. La adherencia de los adhesivos para colocación de baldosas cerámicas es la capacidad que tiene el material de agarre para fijar la pieza cerámica a un determinado soporte, fuerza máxima por unidad de superficie que puede ser medida por la resistencia a la tracción o a la cizalladura. Existen dos tipos de adherencia en los que se fundamenta el concepto: adherencia mecánica y química (Asociación Nacional de Fabricantes de Morteros Industriales, 2013).

La adhesión mecánica se fundamenta en la trabazón entre sólidos. Normalmente, uno de los materiales se aplica en estado plástico sobre la superficie del otro, la cual debe ofrecer suficientes posibilidades de anclaje. Los materiales porosos presentan, en general, una buena superficie para favorecer la adhesión mecánica, viéndose facilitada en algunos casos con relieves o resaltes. Con la penetración del adhesivo en los poros e intersticios del soporte y de la pieza, se crean unos puntos de anclaje que producen una adherencia entre ellos. Mientras que la adherencia química hace referencia a la unión química y/o electrostática entre grupos activos de los adhesivos y el soporte o pieza, se realiza por mero contacto entre las dos partes. En los adhesivos cementosos siempre se tiene adherencia mecánica y dependiendo del tipo de adhesivo (de las prestaciones que exijamos, dependientes del uso) se incorporan mayor o menor cantidad de resinas que son las que nos aportan adherencia química, reforzando la adherencia mecánica (Asociación Nacional de Fabricantes de Morteros Industriales, 2013).

3.3 INVESTIGACIONES SOBRE REUTILIZACIÓN DE LODOS

Numerosos investigadores a nivel mundial han explorado diversos métodos que aprovechan el gran potencial de estos residuos para reincorporarlos en algunos casos a otras líneas de producción, tales como la incorporación en suelos, material de cobertura en rellenos sanitarios, digestión anaerobia para generación de energía y/o biodiesel, materia prima para la producción de pellets, cemento Portland y ladrillos de mampostería, material de relleno para la construcción de caminos y carreteras, entre otros.

Una de las técnicas más aplicadas actualmente y con menores costos, en algunos casos, es la incorporación en suelos para la recuperación de tierras en agricultura, compostaje, vermicompostaje y material de cobertura en rellenos sanitarios. Gracias a los diversos contenidos de materia orgánica y nutrientes, el lodo se emplea ampliamente como fertilizante para mejorar la calidad del suelo y la revegetación de los suelos afectados (Grobela *et al.*, 2016). Sin embargo, se ha encontrado en algunas investigaciones que los lodos que tienen cantidades significativas de productos químicos potencialmente dañinos se pueden filtrar en el suelo o en las aguas subterráneas (Suthar, 2010). Además, si no se tiene en cuenta el contenido de patógenos, concentración de metales pesados, la consistencia del lodo a aplicar y la clase del suelo donde se va a realizar esta práctica, puede afectarse significativamente la calidad del suelo y los productos agrícolas que se obtienen (Sroda *et al.*, 2015).

Un método de uso directo de los lodos de PTAR reportado es la adición de lodos en la fabricación de material de cobertura de rellenos sanitarios. Este material se elaboró mediante la deshidratación de lodos a través de un filtro prensa, donde se aplicaba adicionalmente hierro, aluminio y magnesio. Se encontró que, al comparar este material con la arcilla franca empleada en los vertederos de China, la permeabilidad aumenta después de dos meses de exposición al agua, donde los valores obtenidos cumplían con los estándares requeridos (Chen *et al.*, 2014).

Muchas investigaciones en los últimos años se han concentrado en evaluar el potencial de estos lodos en diversas clases de materiales de construcción, puesto que los lodos de PTAR pueden considerarse como una materia prima potencialmente atractiva para los materiales de construcción debido, entre otras cosas, a sus propiedades físico-químicas (Swierczek *et al.*, 2018). A continuación, se describen las investigaciones en torno a esta industria.

Un trabajo sustancial se ha llevado a cabo para la fabricación de productos valiosos por solidificación térmica de los materiales compuestos de lodos, particularmente en Japón, lodo seco o la ceniza de incinerador se utiliza como un material primario en la fabricación de materiales de construcción. El proceso de solidificación se produce a altas temperaturas, de hasta 1.000°C, mientras que el calor residual está disponible para el proceso de secado. Dependiendo de las modificaciones de procesos específicos y las condiciones de

funcionamiento aplicadas, se pueden hacer varios tipos de productos, tales como agregados artificiales ligeros, escorias, y ladrillos (Naamane *et al.*, 2016).

Asimismo, se ha encontrado que después de aplicar procesos térmicos a los biosólidos se pueden utilizar para hacer ladrillos similares en apariencia y propiedades físicas a los ladrillos de construcción estándar. Por ejemplo, en Japón han utilizado estas cenizas de los biosólidos para fabricar ladrillos desde hace más de una década. La primera planta de producción de ladrillos a partir de los lodos a gran escala se inició en 1991 en Tokio con una capacidad de producción de 5500 ladrillos por día utilizando 15000 kg de ceniza de lodo incinerados, en donde ha sido uno de los casos más importantes reportados, pues en muchas investigaciones no han escalado las tecnologías porque han tenido múltiples dificultades encontrando los puntos óptimos de operación del proceso de producción. Otro hallazgo importante fue que, a partir de pruebas de lixiviación realizadas a los ladrillos acabados, reportaron que no había lixiviación de metales pesados, incluso en entornos adversos con niveles de pH tan bajo como tres (Vinay & Shang-Lien, 2013).

En India se ha estudiado la incorporación de lodos secos de PTAR en la fabricación de ladrillos. Joshi *et al.* (2016) investigaron el uso de lodos secos para reemplazar el porcentaje de arena natural en ladrillos de hormigón y cemento. En este estudio se halló que los bloques con reemplazo parcial de arena en hasta un 10% cumplen con los requerimientos estándares. En el año 2018, Taur *et al.* estudiaron una mezcla de lodos secos con el concreto convencional. En esta investigación se evidenció que el bloque tenía una resistencia satisfactoria empleando un porcentaje de adición de lodo del 20% del lodo, además el bloque con adición de lodos disminuía la absorción de agua y el peso del bloque en comparación con el bloque convencional, lo cual indicia beneficios para la industria (Taur *et al.*, 2018).

En otro estudio en Grecia se encontró que es posible emplear los lodos domésticos en la producción de cemento blando o también llamado cemento Portland, pues los resultados de los análisis químicos realizados al material terminado mostraron que el límite seguro para el uso práctico de los lodos domésticos como sustituyentes de otras materias primas era del 10%, debido principalmente al contenido relativamente alto de cloruros y álcalis, lo cual podría variar con otra clase de lodos o se podría tratar con agua para disminuir el contenido de sales solubles (Pavlík *et al.*, 2016).

Del mismo modo, realizaron un análisis del ciclo de vida de todo el proceso de producción, en donde hallaron que empleando estos lodos había una disminución en el consumo de energía de casi un 10% por cada 10% de lodos empleados en la mezcla, asimismo que la emisión de gases de efecto invernadero durante el tratamiento térmico del lodo se encuentra casi veinte veces menor que en la producción de cemento Portland y en términos de costos este material revela beneficios económicos sustanciales relacionados con la

aplicación de estos lodos procedentes del tratamiento de las aguas residuales (Pavlík *et al.*, 2016).

Los lodos hidratados también han sido objeto de investigación, este tipo de lodos se usó en la producción de hormigones y morteros, con el fin de evaluar el reemplazo de agua convencional por diferentes porcentajes de lodos crudos altamente hidratados, previamente estabilizados con cal. Se demostró que el exceso de lodo puede reemplazar parcial o completamente el agua en el mortero de concreto, pero esta sustitución del agua por lodo, incluso en una cantidad del 10%, reduce la resistencia a la compresión de los materiales obtenidos (Roccaro *et al.*, 2015).

Otra investigación reemplazó el agua del concreto por lodos hidratados y el cemento portland por cenizas de la combustión de carbón. En este estudio se encontró que la fluidez de los morteros producidos sobre la base de lodos hidratados fue inferior a la de los que se mezclaron con agua, asimismo que la resistencia a la compresión de las muestras aumentó con la duración de su tiempo de curado, independientemente de la composición de la mezcla. Adicionalmente, se registró que el deterioro más notable de la calidad lo tuvo la muestra de mortero que contenía un 30% de cenizas y se preparó con lodo de aguas residuales (Hamood *et al.*, 2017).

En el estudio de Tanpure *et al.* (2017), se evaluó la producción de ladrillos utilizando como sustratos lodos de PTAR, arenas y cenizas volantes. La proporción de lodos empleados varió de 10% a 50%, mientras que el contenido de cenizas volantes fue constante en cada una de las muestras (12%). De manera similar a los resultados de las pruebas presentadas anteriormente, se mostró que a medida que aumenta el porcentaje de lodos de PTAR en la mezcla, también lo hace la absorción de agua. También se obtuvo que el valor de la resistencia a la compresión disminuía conforme a un mayor porcentaje de adición de lodos en la mezcla.

Las principales formas en las que se han utilizado estos lodos como materia prima son principalmente como relleno (López & Cruz, 2016), en donde se han podido encontrar buenos resultados como en el caso de la utilización de lodos de granito en mezclas bituminosas en caliente utilizadas para la construcción de vías, con una cantidad de relleno óptima de alrededor del 7,5%, presentando un aumento en la densidad y en la capacidad de dispersión de la capa (Hüseyin *et al.*, 2012), igualmente en el concreto auto compactado donde el reemplazo de caliza por lodos producidos en el pulido del mármol con una alta finura producen como resultado una fluidez satisfactoria, incrementándose la resistencia a la segregación y produciendo un aumento en la resistencia a la compresión de alrededor un 6,7% (Mohsen *et al.*, 2015). Otra implementación se trata cuando se activan los lodos químicamente por calor como en el caso de la activación del caolín para la obtención de puzolanas, se ha realizado una extensa investigación en el mundo científico de este caso encontrando que los lodos de la industria de papel tienen la misma actividad puzolánica

que el caolín natural y cercano al humo de sílice, además de estandarizar temperaturas y tiempos para la calcinación (Frías *et al.*, 2008; Frías *et al.*, 2010).

Otros materiales que se han evaluado en la industria de la construcción en los últimos años son agregados ligeros y morteros. En el trabajo de Hwang *et al.* (2017) se investigó la incorporación de lodos secos en un material controlado de baja resistencia (material líquido de cemento capaz de autocompactarse), que se utiliza para rellenar en lugares de difícil acceso. Las mezclas se analizaron después de 1, 3, 7 y 28 días en términos de su resistencia a la compresión. Se encontró que la adición de lodos de aguas residuales influyó negativamente en la trabajabilidad de la masa y extendió su tiempo de fraguado en comparación con mezclas sin emplear lodo. La muestra que contenía un 10% de lodo residual y un 9% de activador (presentado como Na_2O) en relación con los aglutinantes se caracterizó por los mejores parámetros de resistencia. Además, sus propiedades fisicoquímicas cumplían con los estándares del Departamento de Obras Públicas de Taiwán. Aunque la adición de lodos de aguas residuales influyó negativamente en la fluidez de la mezcla y extendió el tiempo de fraguado, contribuyó a aumentar su resistencia, lo que indica que el material obtenido es adecuado para uso en construcción pública (Hwang *et al.*, 2017).

Por otra parte, Amin *et al.* (2018) estudiaron la adición de lodos de PTAR en la producción de baldosas. Inicialmente el lodo se deshidrató, molió y se añadió a la mezcla básica; posteriormente, esta mezcla se humedeció con agua al 5% y se comprimió para obtener la forma deseada del producto. En esta experimentación, se varió la adición de lodos en la masa total desde 0% hasta el 35%, las baldosas secas se cocieron a temperaturas de 1.050 ° C a 1.150 ° C. Se obtuvo que la mezcla con lodos provocó la formación de poros abiertos como resultado de la oxidación de la materia orgánica, lo que, junto con el aumento del contenido de lodo en la mezcla, aumenta la capacidad de absorción de agua de los productos terminados. Adicionalmente, mencionaron que, para cumplir con la normatividad exigida para las baldosas, el contenido de lodos en las mezclas de baldosas no debe exceder el 15%, por lo cual los autores referenciaron que se pueden usar baldosas que contienen 5%, 7% y 10% de lodo, cocidas a 1.100 ° C, 1.150 ° C, 1.150 ° C, respectivamente.

Lo anterior muestra que la sustitución de materias primas para fabricar materiales de construcción es un mecanismo que puede ser viable, teniendo en cuenta diferentes factores químicos, ambientales, físicos, entre otros. Podría ser entonces una buena opción para la valorización de los lodos industriales y municipales generados en los municipios de Santiago de Cali y Yumbo, dado que en la PTAR- Cañaveralito se producen día a día mayor cantidad de lodos, de los cuales no todos se pueden transformarse en recuperador de suelos y en su gran mayoría están almacenados en las instalaciones de la PTAR.

3.4 ANTECEDENTES DE MANEJO DE LODOS EN CALI

En 1997, las Empresas Municipales de Cali (EMCALI) contrató la construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo (PTAR-C), la cual inició operación a finales del año 2002, con un caudal de diseño de 7.6 m³/s. La PTAR-C construida, cuenta con tratamiento primario avanzado para las aguas residuales con una línea de tratamiento de lodos por medio del espesamiento, digestión anaerobia, filtro prensa y finalmente disposición final (Empresas Municipales de Cali, 2012).

Las alternativas de aprovechamiento de los lodos no se concibieron desde el diseño de la planta y el tratamiento de lodos planteado no soportó la gran generación de lodos en los años siguientes, presentado diversos problemas con su manejo, causando graves inconvenientes por la falta de capacidad de almacenamiento en la planta y la generación de olores, entre otros. Es por ello que, durante muchos años, los lodos tuvieron que ser trasladados y dispuestos en un relleno sanitario (El Tiempo, 1995).

Posteriormente, en el año 2005, se iniciaron estudios con ayuda de la academia para identificar el potencial que tenían los lodos como materia prima para la fabricación de fertilizantes orgánicos a partir del proceso de compostaje. Se realizaron diferentes estudios en el que se establecieron las proporciones, componentes y viabilidad técnica para el proceso, los estudios más representativos se muestran en el Tabla 5.

Tabla 5. Estudios más representativos sobre el uso de lodos de la PTAR-Cañaveralejo en compostaje

Alternativa	Investigación	Resultado	Autor y fecha
Compostaje de biosólidos de PTAR de EMCALI	Se desarrolló una planta piloto de compostaje con un área de 468m ² , con tres zonas: mezcla y adecuación (20%), digestión (60%) y, enfriamiento y maduración (20%), con biosólidos de la PTAR-C de Cali, mezclados con tres materiales de soporte y enmienda (cachaza, residuos orgánicos de plaza de mercado, residuos de podas), buscando identificar cual mejoraba las propiedades del producto final.	Viabilidad del proceso de compostaje de biosólidos de la PTAR-C de Cali, incorporando materiales de soporte y de enmienda como residuos de poda y cachaza en porcentajes del 10 y 18% respectivamente.	(Torres <i>et al.</i> , 2005)

Compostaje de biosólidos de PTAR de EMCALI	Este estudio evaluó la estabilización alcalina de los biosólidos de la PTAR C (Cali, Colombia) para mejorar su calidad microbiológica, empleando dos tipos de cal (hidratada y viva) en dosis entre 8 y 25 % y dos tipos de ceniza con dosis entre 8 y 40 % en unidades experimentales de 0,2m con un tiempo de contacto de 13 días.	La aplicación de cal logró reducir los coliformes fecales, Salmonella sp y huevos de helmintos. El biosólido higienizado con cal presentó alto potencial de uso agrícola por su calidad microbiológica y por el contenido final de materia orgánica y nutrientes (N, P) que pueden beneficiar los suelos.	(Torres et al., 2009)
	Estudio para la viabilidad técnica de compostaje a partir de biosólido seco proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR- C Cali.	Según la norma NTC 5167, no se puede clasificar este compost como abono orgánico, dado que no cumple con las especificaciones requeridas para aplicarlo en suelos de actividad agrícola, ya que no cumple con los valores mínimos de riqueza que no son alcanzados por este producto.	(Quintana, 2012)
Uso lodos como co-ayudante en la combustión	Estudio de la co-combustión de lodos de la PTAR-C de la ciudad de Cali con carbones consumidos en el Valle del Cauca, Colombia.	Se estudió el comportamiento en combustión de diferentes carbones consumidos en el Valle del Cauca, los cuales son mezclados con lodos de la PTAR-C, se identificó que era posible adicionar una porción de hasta 8% lodos en peso como sustituyente de los carbones.	(Velasco et al., 2008)

Fuente: La autora (2018).

Estos estudios establecieron lineamientos para la producción de fertilizante orgánico a partir de los biosólidos de la PTAR- Cañaveralejo de EMCALI, y demostraron la viabilidad técnica de este proceso para aprovechar los lodos generados en dicha planta. De igual forma, han realizado estudios para identificar si es posible emplear estos lodos como materia prima para la alimentación de hornos o calderas mientras que desde el 2014, según comentó la funcionaria de EMCALI (2017), la empresa Argos en asocio con una firma de consultoría

española Aqualogy han estudiado el potencial de los lodos como material cementante. No obstante, hasta el momento no se han registrado escalamientos pilotos exitosos de estas tecnologías estudiadas, ni informes científicos que evidencien este estudio.

Después de 10 años de investigación, en el año 2011, EMCALI adquirió una tecnología alemana llamada Green House, la cual tenía el objetivo de retirar entre el 80 y 95% de la humedad de los lodos en un rango de 3 a 5 horas (Quintana, 2012). Esta tecnología contribuyó a gestionar los lodos de mejor manera y se optimizarán los costos asociados al transporte. Luego, en el año 2014, EMCALI implementó un sistema de compostaje a pequeña escala en donde emplean (hasta la actualidad) menos del 30% de los biosólidos generados en la planta, produciendo un abono orgánico llamado ABON-EM.

Actualmente la PTAR-C de EMCALI, en su proceso de tratamiento de aguas domésticas de la ciudad, genera un total de 120 Ton/día de lodos como subproducto del tratamiento, los cuales pasan por un proceso de digestión convirtiéndose en biosólido húmedo que es posteriormente deshidratado generando un total de 60 Ton/día con una humedad del 70% de biosólido (Quintana, 2012). Finalmente, se envía tan solo el 30% del biosólido deshidratado a un proceso de compostaje (cuando funciona sin contratiempos de equipos fuera de funcionamiento) mientras que el 70% restante es almacenado por un largo periodo y es entregado progresivamente, dependiendo de la demanda, a agricultores para fertilizar la caña de azúcar.

Cabe resaltar que la infraestructura para la elaboración del compost, no posee la capacidad necesaria para el procesamiento total del biosólido deshidratado; lo que ha generado inconvenientes en las áreas de almacenamiento, que han colmatado por la alta generación de lodos, desencadenando en problemas ambientales como generación de olores ofensivos, proliferación de vectores, requerimientos de la autoridad ambiental, entre otros. La infraestructura para el proceso de compostaje se diseñó para una producción máxima de 30 Ton/mes del fertilizante orgánico. El fertilizante orgánico que en la actualidad se produce EMCALI como resultado de dicho proceso recibe el nombre de ABON-EM y se encuentra certificado por el ICA con la Resolución N°002500 de 31 de mayo de 2013, como fertilizante orgánico, acondicionador de suelos y fertilizante orgánico mineral sólido (EMCALI, 2014). Sin embargo, este producto aún no se encuentra a la venta y no se ha establecido un precio base para su comercialización, además, según el último listado de fertilizantes autorizados por el ICA (ICA, 2016), este producto tiene licencia desde el 12 de Diciembre de 2013 y solo puede ser comercializado como acondicionador orgánico, restringiendo su uso y mercado. Es importante resaltar que ni el producto, ni el proceso poseen un estudio de mercado, por lo cual no se ha podido establecer claramente un precio para su comercialización, ni una inversión inicial para procesar la cantidad de biosólido generado en la planta y así cerrar el ciclo del tratamiento.

Por otra parte, en el 2015 se encontró una generación significativa de lodos en los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (STARI), los cuales son cerca de 16,63 Ton/mes y la disposición final que prevalecía entre las empresas vinculadas en el estudio era disponerlos en los rellenos sanitarios (Ñañez *et al.*, 2015). En el marco del presente proyecto, en el 2017, en las visitas realizadas a 11 empresas de sectores industriales de alimentos y bebidas, metalmecánica, papelería y textil, entre otros se encontró que la generación de lodos fluctúa entre 120 Ton/día y 0,2 Ton/día, mientras que la disposición final en su gran mayoría era contratar un gestor externo para que dispusiera este residuo en celdas de seguridad o relleno de terrenos.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Identificar el potencial de aprovechamiento de la incorporación de lodos industriales y municipales en la fabricación de pegante cerámico gris para pisos.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las características físicas, químicas y mineralógicas de los lodos seleccionados.
- Determinar la calidad de los productos obtenidos frente a los requisitos normativos nacionales vigentes.
- Realizar un análisis de costos de los materiales finales comparado con el pegante cerámico convencional.
- Estudiar el impacto ambiental preliminar que tendría el uso de lodos en la fabricación del pegante.

5 METODOLOGÍA

En el marco de la evaluación del potencial de aprovechamiento de la incorporación de lodos industriales y municipales en la fabricación de pegante cerámico se desarrollaron seis etapas de trabajo:

- I. Selección de lodos.
- II. Caracterización de los lodos.
- III. Fase experimental.
- IV. Análisis de costos de los pegantes obtenidos.
- V. Análisis preliminar del impacto ambiental.
- VI. Procesamiento de datos y análisis de resultados.

5.1 SELECCIÓN DE LODOS

Inicialmente para la selección de los lodos provenientes de PTAR industriales se analizaron las posibles empresas de las cuales se podrían tomar las muestras de lodos, partiendo de la base de datos del Instituto CINARA, específicamente el Grupo de Investigación de Saneamiento ambiental, quienes han desarrollado dos proyectos previos en este tema. La primera investigación se realizó en el año 2014 en donde se elaboró un flujo de residuos provenientes de tratamiento de aguas residuales del sector industrial del municipio de Cali zona urbana y periurbana, zona franca de Palmira y del municipio de Yumbo; en este identificaron el manejo de los lodos y las grasas de cerca de 30 empresas del sector. Mientras que en la segunda investigación recopilaron información sobre la gestión de lodos y grasas provenientes del tratamiento de aguas residuales del sector industrial.

Teniendo en cuenta la información secundaria de cada una de las industrias se realizó una preselección de 10 empresas, priorizando las industrias vinculadas en proyectos pasados que hayan tenido una participación exitosa y que pertenezcan a diferentes procesos productivos como alimenticios, papel y cartón, siderúrgica/metalúrgica, química y automotriz. Seguidamente se realizaron contactos con los profesionales de las empresas, se hicieron reuniones y visitas técnicas para identificar el proceso productivo del cual proviene el lodo, su naturaleza y el sistema de tratamiento existente.

Posterior a ello se analizaron las caracterizaciones de los lodos (suministradas por las empresas), el interés de la empresa, la tasa de generación de lodos, la peligrosidad del lodo

y la localización de la empresa, con el fin de seleccionar las empresas idóneas para continuar con el proceso de investigación.

Por otro lado para la selección de los lodos provenientes de PTAR de origen doméstico se eligió la PTAR-C operada por EMCALI, puesto que es la planta más importante de la ciudad pues trata la mayor cantidad de aguas residuales de la zona urbana de Cali, tiene una generación significativa de lodos con 120 Ton/día y diversas dificultades en la gestión de estos residuos (Empresas Municipales de Cali, 2012).

5.2 CARACTERIZACIÓN DE LODOS INDUSTRIALES Y DOMÉSTICOS

Esta fase de la investigación constituyó una parte muy importante, puesto que permitió identificar las principales características de los lodos que se van a valorizar, lo cual sirvió como insumo para conocer e identificar cuáles son los principales procesos a los que este lodo debe ser sometido para que puedan acondicionarse como materia prima del proceso de producción de pegante cerámico. Esta fase se fundamenta en dos actividades principales:

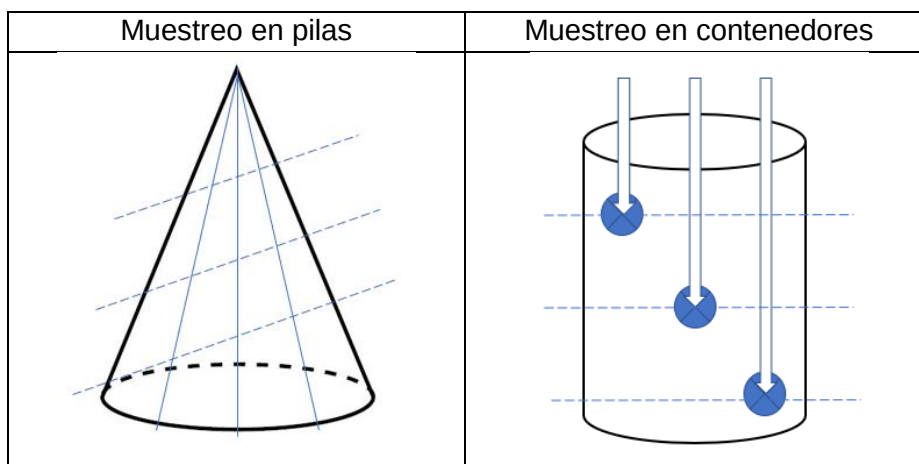
- **Toma de muestras de lodos:** Se identificó el método más indicado para tomar la muestra de los lodos industriales en cada una de las empresas, puesto que este proceso depende directamente de las características de almacenamiento encontradas en diversas visitas. Cabe resaltar que el plan de muestreo se diseñó teniendo en cuenta los criterios de la Norma Técnica Colombiana (NTC) 5667-13, la cual permitió garantizar que la muestra obtenida fuera representativa del total de lodos producidos en la industria.

Se definió que, para los lodos de origen municipal, la muestra fue extraída de la bodega de almacenamiento después del Greenhouse, donde el lodo tenía aproximadamente un 30% de contenido de humedad (Empresas Municipales de Cali, 2012). Con el fin de garantizar un bajo contenido de microorganismos y otras sustancias que afectarán la experimentación, también se tuvo en cuenta los criterios de la NTC 5667.

Las muestras fueron de tipo compuesto (varias submuestras mezcladas en proporciones conocidas) en cada una de las ocho empresas seleccionadas. Se establecieron dos tipos de toma de muestra de la norma NTC 5667-13 acordes a las condiciones de las empresas, la primera el muestreo de tortas de lodo de montones y pilas, dado que dos empresas y la PTAR-C tenía este tipo de almacenamiento en pilas. Mientras que el segundo es muestreo en recipientes de contenedores espesos, de las cuales seis empresas cumplían con este almacenamiento, las cuales se observan en la Figura 1.

En el muestreo por pilas se extrajeron diversas submuestras en los interceptos entre las líneas verticales y perpendiculares, y en el muestreo en contenedores se tomaron muestras a tres profundidades distintas como se esquematiza en la Figura 1.

Figura 1. Esquema de los tipos de muestreos realizados



Fuente: La autora (2018)

En el primer caso de toma de muestra de lodos con bajo contenido de humedad se realizó una reducción de las muestras por el método de cuarteo, en donde se obtuvieron dos kilogramos de la muestra total (método expuesto en la Figura 2). En el segundo caso las submuestras obtenidas fueron depositadas en un contenedor y homogenizadas por cinco minutos y posteriormente se extrajo la porción de muestra para obtener una muestra final de dos kilogramos. Posteriormente fueron empacadas y preservadas hasta llegar al laboratorio de aguas del Instituto CINARA.

Figura 2. Esquema de proceso de cuarteo



Fuente: Adaptado de SAMACTA (2015)

- **Caracterización:** Durante esta etapa se realizaron dos tipos de caracterizaciones, la primera para identificar los parámetros de interés sanitario y la segunda para analizar los parámetros físicos y mineralógicos de los lodos. La caracterización de interés sanitario

permitió identificar los principales contaminantes que pueden afectar al ambiente y a los seres humanos.

En este análisis se midieron 22 parámetros entre análisis fisicoquímicos y microbiológicos de los lodos (Tabla 6) en el Laboratorio de Aguas del Instituto CINARA. Estos análisis fueron el punto de partida para analizar qué tipo de proceso alterno de acondicionamiento necesitaban los lodos para disminuir su peligrosidad y lograr incorporarlos sin efectos secundarios en el proceso productivo del pegante. Cabe desatacar que los lodos fueron analizados por separado, debido a sus diferentes naturalezas.

Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos

PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO
DQO total	mg/L O ₂	Reflujo Cerrado
DBO ₅ total	mg/L O ₂	Winkler
Nitrógeno total	mg/L N-NO ₃	Kjendall
Nitritos	mg/L	Espectrofotométrico
PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO
Nitratos	mg/L	Electrodo
Nitrógeno amoniacal	mg/L	Electrodo
Fósforo soluble	mg/L	Espectrofotométrico
Fósforo particulado	mg/L	Espectrofotométrico
Fósforo total	mg/L	Espectrofotométrico
Aceites y grasas	mg/L	Extracción Soxhlet
pH	Unidad de pH	Potenciométrico
Alcalinidad total	mg CaCO ₃ /L	Volumétrico
Acidez	mg CaCO ₃ /L	Volumétrico
Conductividad eléctrica	(us/cm)	Electrodo
Huevos de Helminthos		Bilenger
Sólidos volátiles	mg/L	Gravimétrico
Sólidos suspendidos totales	mg/L	Gravimétrico
Coliformes totales	UFC/g	Filtración por membrana
Coliformes fecales	UFC/g	Filtración por membrana
Fenoles	mg/L	
Mercurio		Espectrofotométrico
Plomo		Espectrofotométrico

Fuente: La autora (2018)

Posterior a ello se realizó la segunda fase de la caracterización de las propiedades químicas y mineralógicas de los lodos por medio de los análisis de difracción de rayos x (DRX) y fluorescencia de rayos x (FRX). Con el fin de identificar el potencial de los lodos para sustituir las materias primas convencionales en el proceso de fabricación del pegante cerámico y percibir cuál fue su comportamiento y reacción con las otras materias primas.

Los análisis de DRX permitieron determinar la estructura detallada de los lodos, es decir, que ayudaron a identificar la posición que ocupan los átomos, iones o moléculas en sus estructuras, debido a este ordenamiento se determinaron las propiedades tanto físicas como químicas de los lodos seleccionados para estudiar si sus componentes son indicados en la fabricación del pegante. Además, es un método de alta tecnología, no destructivo, que es empleado para una amplia gama de materiales como: metales, minerales, polímeros, catalizadores, plásticos, productos farmacéuticos, recubrimientos de capa fina, cerámicas y semiconductores, entre otros (Cabero, 2012). Estos análisis fueron realizados en el laboratorio nacional de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) en Bogotá.

Por otra parte, los análisis de FRX permitieron identificar las concentraciones de elementos químicos en diversos tipos de muestras de lodos. Este es un método analítico de alta precisión que contribuyó en la detección de elementos muy ligeros como el carbono, hasta elementos pesados como el americio, con la ventaja de ser no destructivo en la mayoría de las aplicaciones y la facilidad de preparar la muestra de manera simple. La caracterización de estas muestras fue realizada en el laboratorio de fluorescencia de rayos x de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.

- **Evaluación del sistema de acondicionamiento de los lodos:** En esta fase se analizó y se evaluó las diversas técnicas para realizar un acondicionamiento adicional que garanticen que el lodo municipal cumple con las condiciones mínimas para ser empleados en la fase de la experimentación, como lo es el porcentaje de humedad, tamaño de las partículas, entre otros. Es por ello que se diseñaron algunos procesos de acondicionamiento para que los lodos sean aptos, como la estabilización térmica y química. A partir de los resultados obtenidos en estas caracterizaciones fueron seleccionados los lodos que mayor potencial mostraron en su composición para sustituir los agregados de los pegantes. Se eligieron dos lodos industriales y un lodo municipal para continuar la evaluación en la siguiente fase experimental.

5.3 FASE EXPERIMENTAL

Esta fase constituye una etapa determinante del proyecto, puesto que se obtuvieron resultados significativos para identificar la viabilidad de fabricar pegante de baldosas empleando lodos en sus materiales primas. Esta fase se dividió en 5 actividades:

- **Pruebas preliminares:** Con el objetivo de identificar el comportamiento que tienen los lodos con los materiales convencionales del pegante y verificar el desempeño del pegante obtenido. Se realizó una experimentación preliminar con los tres lodos seleccionados en la fase anterior, donde se prepararon morteros de cemento Portland, reemplazando la arena de mezcla en 50% por cada tipo de lodo. Se midió la resistencia a la compresión en dos periodos diferentes, uno y siete días.

Esta medida de la resistencia permitió verificar el comportamiento mecánico de estas probetas cilíndricas, que a pesar de que no es una medida propia para calcular la calidad del pegante cerámico, existe una correlación directa de sus propiedades mecánicas. Este ensayo corresponde a la medida más común de desempeño que se emplea en ingeniería para diseñar materiales y estructuras, se calcula ensayando probetas cilíndricas de concreto en una máquina de compresión, en tanto la resistencia a la compresión se mide a partir de la carga de ruptura dividida entre el área de la sección que resiste a la carga y se reporta en megapascuales (MPa) en unidades SI (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2015).

Inicialmente, se acondicionaron los lodos utilizando un mortero de cerámica para macerar y disminuir el tamaño de las partículas, posterior a ello los lodos y la arena se tamizaron por una malla # 25 con una apertura de 710 micras, con el objetivo de homogenizar las materias primas fabricar el mortero de cemento. Se elaboraron cuatro morteros diferentes, el mortero cero corresponde al patrón o muestra de referencia sin adición de lodo (100% de arena), mientras que el mortero uno, dos y tres tenían el 50% de aplicación de lodo de la fracción de relleno (es decir se aplicó el 36,7% del producto total) de adición de lodo municipal, lodo industrial 1 (industria de aluminio) y lodo industrial 2 (industria metalmecánica) respectivamente, ver Tabla 7. Se seleccionó reemplazar el 50% de arena por lodo para identificar el comportamiento de este material y conocer en que porcentajes era viable realizar la sustitución de lodos del diseño experimental. Cabe resaltar que se desconocen investigaciones previas que hayan estudiado este tipo de material con lodos, por lo cual se tuvo en cuenta cada una de las recomendaciones de los expertos para definir los porcentajes de estudio.

Tabla 7. Mezcla de morteros para evaluación de resistencia a compresión

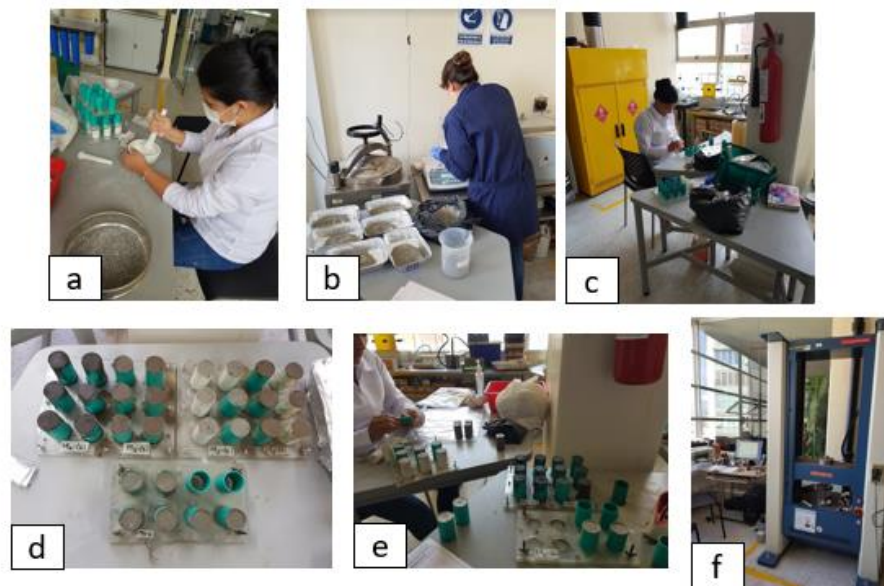
Experimentación	Cemento uso general (g)	Arena de río (g)	Lodo municipal (g)	Lodo Empresa 1 (g)	Lodo Empresa 2 (g)
Mortero 0	X	X			
Mortero 1	X	X	X		
Mortero 2	X	X		X	
Mortero 3	X	X			X

Fuente: La autora (2018)

El procedimiento que se implementó para la medición de la resistencia a la compresión está expuesto en la Figura 3. Para fabricar los morteros se empleó una relación arena/cemento de 2.75 en peso siguiendo los lineamientos de la NTC 111, y la relación agua/cemento fue la necesaria para conseguir una fluidez de 110 ± 5 (Norma NTC 111). Las probetas de cada mortero fueron fabricadas en forma de cilindros con diámetro de 30 mm y altura de 60 mm, cada uno de los experimentos fueron realizados con seis muestras. Las primeras tres muestras fueron utilizadas para el ensayo de compresión a un día, y los tres restantes fueron inmersas en agua hasta completar siete días, para su posterior ensayo a compresión.

Estos ensayos fueron realizados en el Tecnoparque del Sena en los laboratorios de biotecnología, específicamente para efectuar la resistencia a la compresión se utilizó la maquina universal Hung Ta referencia HT-2402 250KN y el programa UTM (Universal Testing Manager), en donde se creó un método para este ensayo teniendo en cuenta el diámetro (30 mm), una velocidad de compresión de un milímetro por minuto y una celda de carga de 100.000 Newtons.

Figura 3. Metodología para la medición de resistencia a la compresión



a. Acondicionamiento y tamizaje; **b.** Pesaje y elaboración de morteros; **c.** Engrase de moldes; **d.** Fabricación de probetas; **e.** Desmolde de cilindros; **f.** Ensayo de compresión

Fuente: La autora (2018)

Los índices de resistencia a 1 y 7 días, se calcularon dividiendo la resistencia promedio de los morteros con lodo (R_{lodo}), sobre la del mortero referencia (R_{ref}), multiplicado por 100 ($(R_{lodo}/R_{ref}) \cdot 100$). De igual forma, se presentan los índices de demanda de agua en las

mezclas que se necesita para obtener una fluidez constante (110 ± 5), la cual fue determinada de forma similar al índice de resistencia ($(A_{\text{lodo}}/A_{\text{ref}}) \cdot 100$).

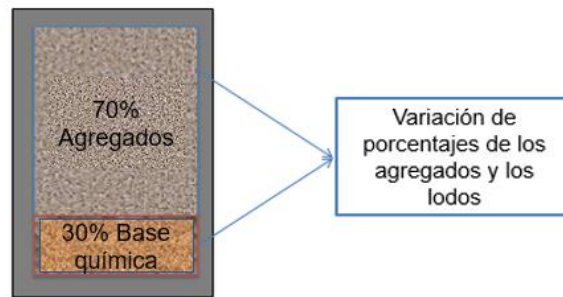
Teniendo en cuenta los mejores resultados de las pruebas de compresión obtenidos en cada uno de los dos ensayos, se seleccionó un lodo industrial y un lodo municipal para continuar con las pruebas de calidad del diseño experimental.

- **Diseño experimental:** El pegante cementicio para baldosa está constituido por dos componentes principales, el primero corresponde a la base química y el segundo es el material que brinda volumen al producto, también llamado agregado; según la formula suministrada por la Empresa MAECOL S.A.S la base química corresponde a un porcentaje aproximado del 30% (ver Figura 4), mientras que los agregados tienen un aporte del 70% (fracción azul de la Figura 4) en el material final, dado la protección intelectual de esta formula no se pueden revelar los contenidos de la base química.

La base química se compone principalmente de aditivos que se añaden a fin de mejorar algunas propiedades del material, tales como acelerar el secado y endurecimiento, reducir e incluso eliminar la formación de burbujas o espumas, y se acostumbra a designarlos con el nombre del defecto que combaten, como antiespumantes, antifloculantes, bactericidas, etcétera (Euroquímica, 2013). Por otro lado, la porción de los agregados tiene por objetivo dar soporte y consistencia al pegante, generalmente está compuesto de arena o marmolinas.

El objeto de estudio de este proyecto de investigación es evaluar la fabricación de un pegante cementicio con diferentes proporciones de lodos (uno municipal y uno industrial) en su porcentaje de agregados. Por consiguiente, se evaluaron diversos porcentajes para sustituir el material que da volumen al mortero (agregados), el cual corresponde a un 70% del producto final como se observa en la siguiente figura. En este punto fue muy importante contar con la amplia experiencia de los asesores de la empresa Materiales Ecológicos de Colombia (MAECOL), quienes han tenido práctica en la elaboración de pegante cerámico convencional y de otros materiales como mortero de revestimiento a partir de residuos de construcción y demolición. Así como también de diversos Ingenieros del Centro de la Construcción del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) quienes brindaron el soporte técnico en ingeniería de materiales.

Figura 4. Contenido del mortero de juntas



Fuente: La autora (2018)

La técnica seleccionada para el diseño de este experimento fue un diseño con estructura factorial, puesto que es uno de los estudios más eficientes para este tipo de experimento. Este tipo de arreglo factorial consiste en valorar el efecto de un factor o más factores sobre las variables de respuesta. Se plantea la posibilidad de que los factores presenten un efecto de interacción, es decir la diferencia en la respuesta entre los diferentes tratamientos del factor (Montgomery, 2004).

En esta investigación se definió la necesidad de utilizar un solo factor (tipo de tratamiento) y siete tratamientos, con el fin de evaluar el comportamiento de cada uno de los pegantes fabricados con tres porcentajes de adición de lodos o sin adición de lodo, este último corresponde al pegante o tratamiento de control (pegante convencional de MAECOL). Cabe resaltar que la comparación de estos tipos de tratamientos y el control permitió verificar las implicaciones positivas o negativas que tiene la incorporación de los lodos en el material.

Los porcentajes de adición de lodos fueron seleccionados, teniendo en cuenta los resultados de las pruebas preliminares y las recomendaciones de los expertos en materiales. La empresa asesora MAECOL, sugirió que la sustitución de los agregados no debía sobrepasar el 70% de adición de lodo al material y como mínimo se tenía que probar una adición del 10% de lodos al mortero, para que fuera un aprovechamiento significativo de estos residuos. A continuación, en la Tabla 8 se describen los tipos de tratamientos utilizados.

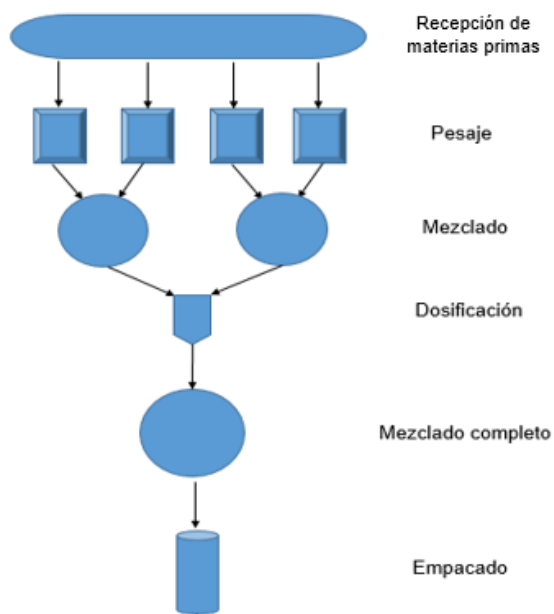
Tabla 8. Tratamientos del diseño experimental

TRATAMIENTO	CLASE DE LODO EMPLEADO	PROPORCIONES POR COMPONENTES	
		<i>Porcentaje de lodo</i>	<i>Porcentaje de agregados</i>
1	Sin adición de lodo	0%	100%
2	Municipal	10%	90%
3		20%	80%
4		30%	70%
5	Industrial	10%	90%
6		20%	80%
7		30%	70%

Fuente: La autora (2018)

- **Fabricación de producto:** Este proyecto conto con dos aliados estratégicos, MAECOL y el Centro de la Construcción del SENA, los cuales participaron activamente en el proyecto, principalmente en esta fase experimental donde toda la experiencia que su personal tiene en la fabricación de estos materiales de construcción va a ser determinante para optimizar el proceso y los recursos. MAECOL fabricó empleando sus fórmulas propias los siete tipos de adhesivos cementicios para baldosa (Código C1, según la NTC 6050) con las diversas especificaciones de los tratamientos. En la Figura 5 se esquematiza el proceso productivo del pegante cerámico tipo C1, el cual fue aplicado para la fabricación de los 7 materiales de la experimentación.

Figura 5. Esquematización del proceso de fabricación del mortero de juntas para baldosas



Fuente: La autora (2018)

- **Pruebas de calidad del producto:** Las variables de respuesta constituyen un factor fundamental para definir la viabilidad de sustituir los agregados convencionales por una fracción parcial de lodos. Por consiguiente, se identificaron dos criterios importantes para definir estas variables, el primer criterio fue las propiedades más reconocidas de los pegantes comerciales del mercado reportaban en sus fichas técnicas (contenidos en la NTC 6050) y el segundo fue las diversas recomendaciones de los expertos de materiales.

Teniendo en cuenta estos criterios se definieron dos variables de respuesta, la resistencia adhesiva a la tracción luego de inmersión al agua y resistencia a la tracción después de aplicar el material con un tiempo de abierto de 20 minutos. La determinación de estos parámetros permitió medir la calidad del material nuevo (pegante con lodos) obtenido frente a los requerimientos de la norma presentes en la NTC 6050. Estas pruebas se llevaron a cabo en el Laboratorio de Biotecnología del Tecnoparque nodo Cali del SENA y fueron realizados para cada uno de los siete tratamientos anteriormente descritos.

Según la NTC 6050-2 fue necesario construir diversos bloques de cemento para simular la superficie de cemento en el que normalmente se aplica el pegante para pisos. Es por ello que, teniendo presente los siete tratamientos a evaluar, sus tres repeticiones y las dos variables de respuesta se fabricaron 52 bloques de cemento (42 requeridos en los ensayos y 10 para imprevistos). La metodología empleada para fabricar estas estructuras se

describe en la Figura 6, se realizó la mezcla de arena, cemento y agua, utilizando una relación agua cemento de 0.5.

Figura 6. Metodología para fabricar bloques de cemento



a. Elaboración de moldes; **b.** Pesaje; **c.** Elaboración de la mezcla; **d.** Llenado de moldes; **e.** Desmolde luego de 1 día; **f.** Inmersión al agua por 7 días; **g.** Secado en el horno 1 día.

Fuente: La autora (2018)

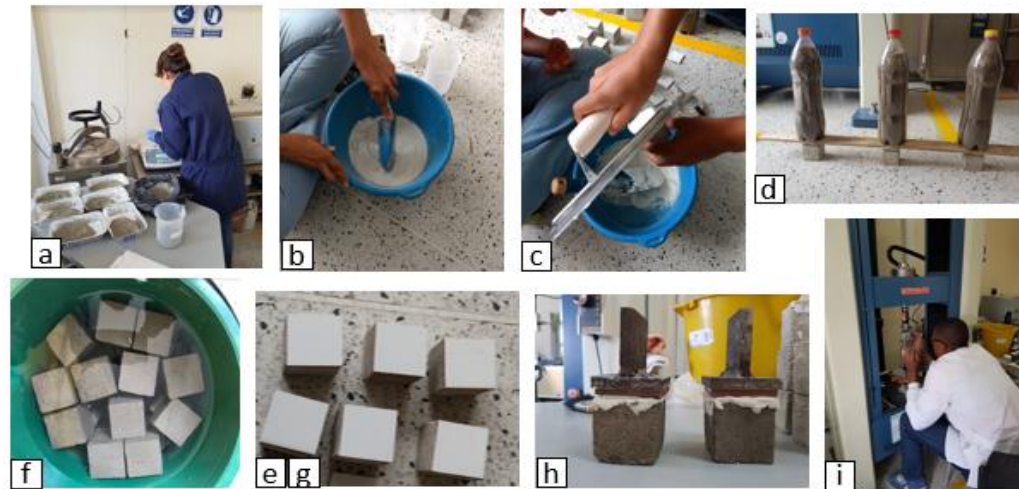
La resistencia adhesiva a la tracción es la máxima resistencia expresada en fuerza por unidad de superficie, puede ser medida en un ensayo de tracción o cortante. Esta variable es determinada para adhesivos cementicios normales clase C1, con una absorción de agua entre el 6% y el 10% en fracción de masa; además se encontró que los pegantes comerciales más reconocidos lo reportan en sus fichas técnicas. La resistencia del pegante fue medida siguiendo los lineamientos presentes en la NTC 6050-2 numeral 4.4.4.2, cuya metodología está expuesta en la Figura 7.

En la aplicación del pegante se utilizó una llana dentada con muescas de 6 mm x 6 mm a 12 mm entre centros y cuando se estaba esparciendo el material en el bloque fue sometida a un ángulo de aproximadamente 60° respecto a la superficie del bloque y un ángulo recto con uno de los bordes del bloque. Posteriormente se colocaron las cargas sobre las probetas, se utilizaron pesas de arena garantizando 20 ± 0.05 N.

Para fijar las cabezas de tracción (placa metálica cuadrada, con dimensiones de (50 ± 1) mm y un espesor de mínimo 10 mm) se utilizó un pegante instantáneo extrafuerte, el cual adhería adecuadamente la superficie de las baldosas de las probetas al aditamento para evitar fallas en el ensayo. Después de siete días de curado al aire, se sumergieron las muestras en agua hasta completar 28 días desde el mezclado, para posteriormente ensayar

a tracción. De igual forma para obtener los valores de carga total de tracción (F) se empleó la máquina universal Hung Ta referencia HT-2402 250KN y el programa UTM (Universal Testing Manager), en donde se creó un espécimen para este ensayo teniendo en cuenta el tamaño de los bloques y una fuerza a una velocidad constante de 250 ± 50 N/s.

Figura 7. Procedimiento para la medición de la resistencia adhesiva a la tracción de los pegantes



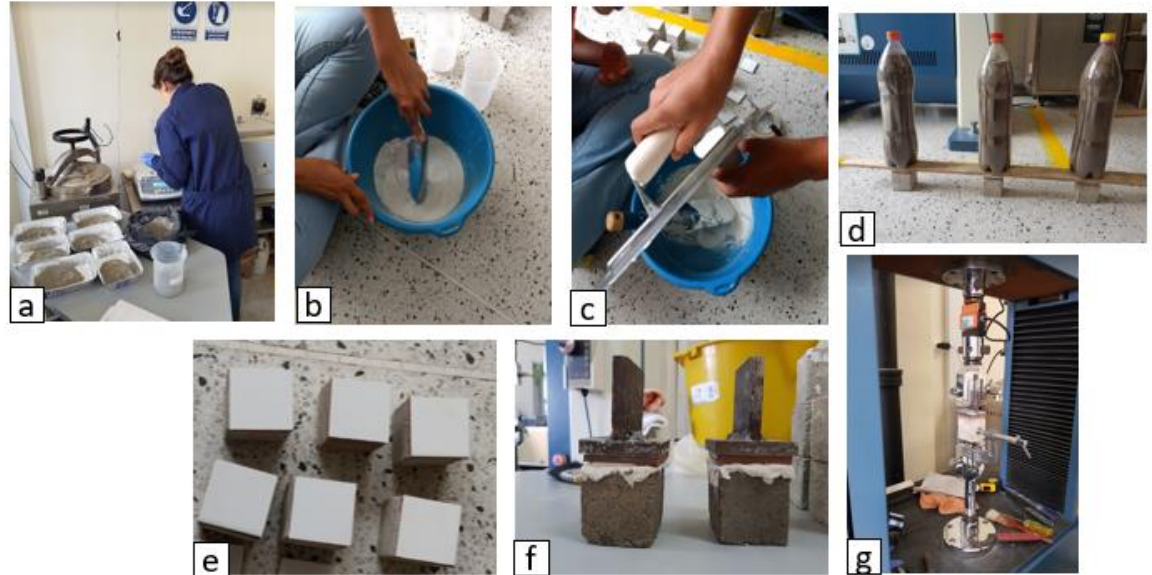
a. Pesaje; b. Mezcla de pegante; c. Aplicación del pegante; d. Colocación de la carga; e. Curado al aire; f. Inmersión al agua; g. Reposo de probetas; h. Adhesión de placas i. Ensayo de resistencia.

Fuente: La autora (2018)

El tiempo abierto es una de las características principales del adhesivo para baldosas cerámicas. Se define como el periodo de tiempo después de la extensión del adhesivo sobre la placa de hormigón, dentro del cual se puede colocar la baldosa con la resistencia adhesiva adecuada a la tracción (Vieira & Vanderley, 2000). El procedimiento para calcular el tiempo de abierto se expone en la Figura 8 se siguieron los lineamientos definidos en la NTC 6050-2 numeral 4.1.

Para fijar las cabezas de tracción (aditamento metálico) se utilizó un pegante instantáneo extrafuerte y se utilizaron pesas de arena garantizando $20 \pm 0,05$ N. La aplicación del pegante se realizó de la misma forma que en el ensayo anterior y la colocación de las baldosas fue realizada después de 20 minutos de la aplicación del pegante. Estas muestras, a diferencia del ensayo de resistencia a la tracción bajo agua, se curaron al aire hasta completar 28 días. Posteriormente para obtener los valores de resistencia a tracción, se empleó la máquina universal Hung Ta referencia HT-2402 250KN y el programa UTM (Universal Testing Manager), en donde se creó un espécimen para este ensayo teniendo en cuenta el tamaño de los bloques y una fuerza a una velocidad constante de 250 ± 50 N/s.

Figura 8. Procedimiento para la medición de tiempo abierto de los adhesivos para baldosas



a. Pesaje; **b.** Mezcla de pegante; **c.** Aplicación del pegante; **d.** Colocación de la carga; **e.** Curado al aire por 28 días; **f.** Inmersión al agua; **g.** Reposo de probetas; **h.** Adhesión de placas **i.** Ensayo de resistencia.

Fuente: La autora (2018)

Finalmente, para calcular los datos finales de resistencia adhesiva a la tracción y tiempo de abierto para cada uno de los tratamientos se utilizó la siguiente ecuación 1. Siendo R_x las resistencias obtenidas en cada uno de los ensayos (Newtons por milímetros cuadrados), F la carga total de tracción obtenida en la máquina universal en Newtons y A el área de unión en milímetros cuadrados (2500 mm²).

$$R_x = F/A \quad (1)$$

5.4 ANÁLISIS DE COSTOS DE LOS PRODUCTOS OBTENIDOS

A partir de la selección del mejor pegante obtenido utilizando lodos en la fase anterior, se realizó un análisis de costos, evaluación financiera y económica del proceso de fabricación de pegante cerámico evaluando dos escenarios a un horizonte de 10 años. El primer escenario (E1) corresponde al sistema de producción de pegante para cerámica tradicional, donde se tuvo en cuenta las condiciones actuales con las que cuenta la empresa MAECOL

en la producción de este tipo de pegante. Mientras que el segundo escenario (E2) pertenece a la producción de pegante para cerámica usando lodos, en el cual consideraron los gastos e inversiones requeridas para éste nuevo proceso productivo aplicado en la misma planta de MAECOL, con las instalaciones y maquinaria que ya existen; en esta fase se hizo un levantamiento de información importante en la empresa MAECOL, donde se contó con la colaboración de diferentes empleados de la empresa.

En cada uno de los escenarios se tuvieron en cuenta criterios importantes como la maquinaria, localización de la empresa, recurso humano requerido, permisos legales y costos unitarios de la producción. En la evaluación financiera, se elaboraron los flujos de caja totales para E1 y E2 donde se compararon los indicadores importantes como el Valor Presente Neto (VPN) y relación beneficio/costo.

Es importante resaltar que el sistema económico no se puede escindir de otros sistemas como el ambiental o el social (Miranda,2001), es por ello que cobro importancia en esta fase incluir una evaluación económica, la cual permitió valorar las variables ambientales que inciden en este proceso de fabricación. Por tanto, en la evaluación económica se determinaron los precios sombra de algunos recursos en cada escenario, por lo cual se utilizaron los Razones de los Precios de Cuenta (RPC) del Banco Interamericano de Desarrollo. Luego se identificaron las externalidades (positivas y negativas) y se calcularon nuevamente los flujos de caja para obtener los nuevos valores de los indicadores económicos, los cuales fueron comparados para determinar el mejor escenario.

5.5 EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL IMPACTO AMBIENTAL

Los gases efecto invernadero (GEI) en las últimas décadas se han convertido en compuestos de alto interés para la humanidad, debido a que la generación excesiva de estos ha traído consigo efectos adversos en las dinámicas normales del clima y otras condiciones del planeta. Es por ello que debido a la creciente preocupación por el cambio climático global y al estudio las emisiones de carbono como factor causal, han surgido gran cantidad de herramientas para cuantificar los impactos ambientales generados por diversas actividades antropogénicas (Matthews *et al.*, 2008).

La huella de carbono se ha convertido en un concepto ampliamente utilizado para comunicar tanto las causas del cambio climático como una variedad de estrategias para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Mulrow *et al.*, 2018). Es una herramienta factible de aplicar para monitorear y cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero, así como para verificar los programas de mitigación y/o reducción a diferentes escalas. En particular, puede capturar la cantidad total de emisiones de gases de efecto invernadero directa e indirectamente causada por un país, una actividad o acumulada durante las etapas de vida de un producto (Caro, 2019).

En el sector de la construcción, la huella de carbono es uno de los métodos más utilizados para evaluar los impactos ambientales de la producción y la utilización de diversas materias primas como el concreto (Jiménez *et al.*, 2018). En las últimas décadas, se ha buscado una reducción del consumo de recursos naturales en la producción de agregados a través del reciclaje de escombros de concreto u otro tipo de materiales, de modo que se puedan obtener nuevos materiales que reemplacen a los agregados habituales que vienen de la trituración de piedra caliza virgen (Jiménez & Moreno, 2015). Es por ello que dada la pertenencia de esta herramienta que se encuentra acorde con los lineamientos de las políticas nacionales e internacionales sobre cambio climático y el interés específico sobre el sector de la construcción, se evaluó el impacto ambiental del proceso de fabricación del pegante tradicional y el uso de lodos para la sustitución de agregados.

El análisis de la huella de carbono se realizó teniendo cuenta dos escenarios. El escenario 1 (E1) corresponde a la situación actual de producción de pegante tradicional (sin utilizar lodo) y el manejo de los lodos de la empresa metalmecánica, los cuales son recolectados e incinerados. Mientras que el escenario 2 (E2) atañe a la situación esperada con este proyecto, en donde se quiere incorporar los lodos como materia prima del pegante tradicional reemplazando los agregados tradicionales en un 20%, con lo cual se disminuiría o eliminaría el proceso de tratamiento y disposición final de los lodos industriales, ya que se incorporarían al proceso.

El método de cálculo contempló el procedimiento de minería de datos, análisis de la información, selección del factor de emisión y cálculo de las emisiones de dióxido de carbono propias del proceso productivo de acuerdo con las metodologías expuestas por las guías del IPCC 1996 y 2006. Cabe resaltar que el nivel de complejidad seleccionado para esta estimación, fue el nivel 1, dado que se utilizaron datos por defecto para el cálculo de los factores de emisión, donde se emplearon distintos valores reportados en las guías del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), guías de la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), reportes de la Oficina de Eficiencia Energética y Energía Renovable de Estados Unidos (NREL, por sus siglas en inglés) y a nivel nacional reportes del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).

Los cálculos de las emisiones de dióxido de carbono del proceso productivo del pegante en los dos escenarios, se realizaron a partir de la ecuación 3, donde Fe corresponde al factor de emisión específico para la actividad i y DA es el dato de la actividad específica i .

$$Emisiones\ de\ CO_2\ \left(\frac{kg}{año}\right) = \sum_{ij} ((Fe_i * DA_i) + (Fe_j * DA_j) \dots) \quad (3)$$

Inicialmente se identificaron los requerimientos del proceso productivo para ambos escenarios, donde se determinaron las capacidades de los equipos, los consumos por hora

de energía eléctrica y el material requerido para la producción anual. Las horas de operación de cada una de los equipos requeridos fueron calculados empleando la siguiente ecuación:

$$\text{Horas de operación} \left(\frac{h}{\text{año}} \right) = \frac{Mp \left(\frac{kg}{\text{año}} \right)}{1000 \left(\frac{kg}{T} \right) * Cm \left(\frac{T}{h} \right)} \quad (4)$$

Donde:

Mp = Cantidad de material a procesar en un año

Cm = Capacidad de la maquinaria

Posteriormente se investigaron los factores de emisión más adecuados para cada uno de los procesos y se consolidaron los datos de cada actividad o proceso, ya sean consumos de energía eléctrica, toneladas de marmolinas, entre otros. Finalmente se aplicó la ecuación tres en los dos escenarios y se obtuvieron las emisiones de CO₂ equivalentes.

5.6 PROCESAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Esta fase se realizó el procesamiento de los resultados obtenidos durante la caracterización de los lodos, la toma de muestras y las pruebas mecánicas, químicas y físicas realizadas a los productos obtenidos, en donde se utilizaron herramientas descriptivas como el promedio y la desviación estándar. Del mismo modo, se hizo un análisis de la normalidad de los datos obtenidos en el laboratorio, posteriormente un análisis de varianza considerando la hipótesis de investigación “*Por lo menos alguno de los tratamientos en este experimento presenta diferencia en las variables de respuesta*” y la confiabilidad de los resultados al final de la investigación. El procesamiento estadístico de los datos se realizará mediante el software de libre distribución R Project versión 3.5.0 (R Development Core Team, 2015).

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 EMPRESAS SELECCIONADAS

A partir de las bases de datos de CINARA de proyectos anteriores se preseleccionaron 20 empresas de diversos sectores económicos y diversos tamaños. El primer criterio de selección determinado fue el interés de la empresa hacia el proyecto, dado que el compromiso que adquiere la empresa es un factor transcendental para el flujo de información y el adecuado desarrollo de las actividades.

Se encontró que ocho empresas de los sectores automotriz, metalmecánica, alimentos y bebidas, textil y papel y cartón manifestaron su interés para participar en el proyecto (ver Tabla 9). El 50% de estas empresas se encontraban en jurisdicción del municipio de Cali, mientras que el 50% restante estaba localizado en Yumbo. Por otra parte, doce empresas manifestaron su desinterés, dado que mencionaban su baja disponibilidad de tiempo, recurso humano y económico para investigar sobre las diversas técnicas de aprovechamiento. Así como también existía una gran difidencia por parte de las empresas al tener que entregar información confidencial de los procesos productivos y administrativos.

Tabla 9. Empresas seleccionadas y vinculadas al proyecto

Id empresa	Sector industrial	Ubicación	Tipo de actividad
Empresa 1	Automotriz	Cali	Motos, Autopartes, tuberías metálicas
Empresa 2	Metalmecánica	Cali	Fabricación de tornillos en acero, cobre entre otras materias primas
Empresa 3		Cali	Fabricación de estructuras metálicas y construcción de obras civiles
Empresa 4		Yumbo	Extrusión y laminación de aluminio
Empresa 5	Alimentos y bebidas	Cali	Elaboración de bebidas no alcohólicas, producción de aguas minerales y de otras aguas embotelladas
Empresa 6		Yumbo	Elaboración de dulces y confitería
Empresa 7	Textil	Yumbo	Elaboración de prendas de vestir para mujer
Empresa 8	Papel y cartón	Yumbo	Fabricación de productos de higiene doméstico e industrial

Fuente: La autora (2018)

6.2 CARACTERIZACIÓN DE LODOS

La toma de muestra de lodos se ejecutó teniendo las dinámicas propias de cada empresa (procesos de tratamiento de lodos, tipo de almacenamiento, frecuencia de recolección de los lodos, generación de lodos, entre otros), pues son factores fundamentales para obtener una muestra representativa de la muestra, los cuales están expuestos en la Tabla 10.

El tipo de muestreo aplicado para las empresas 1, 2, 3, 5, 6, y 7 fue el muestreo de tipo contenedor, ya que en su mayoría almacenaban los lodos en contenedores de 55 galones por diferentes días dependiendo la frecuencia de recolección. Mientras que el muestreo efectuado para las empresas 4, 8 y PTAR-C fue realizado a través del procedimiento de almacenamiento en pilas.

Se identificó que la generación de lodo en grandes cantidades (>100 Ton/año) se presenta en las empresas que tienen una capacidad instalada y productiva grande, en particular la empresa 8 presenta la generación más grande con 23,400 T/año, mientras que la empresa 1 del sector automotriz presenta los valores más bajos con 0.8 T/año. Así mismo, los funcionarios de diversas empresas manifestaron que los costos asociados (transporte y manejo) a procesos de aprovechamiento y disposición final eran muy altos, en concordancia a lo reportado por Romero, (2002) y Pavlík *et al.*, (2016) quienes reportan que los costos de tratamiento y disposición final de los lodos puede representar hasta un 50% del costo total del tratamiento de las aguas residuales. Es por ello que estas empresas manifestaron su interés de explorar nuevas soluciones que les permitan aumentar la eficiencia y disminuir costos.

El 35% de las empresas implementan técnicas de disposición final como incineración, celda de seguridad y relleno sanitario. Por otra parte, el 65% restante efectúan diversas técnicas de aprovechamiento y tratamiento en algunos casos tercerizando la gestión externa de los lodos.

Tabla 10. Información sobre el manejo de los lodos en las empresas

Id empresa	Descripción del proceso	Generación (T/año)	Tipo de almacenamiento	Frecuencia de recolección	Gestor externo	Tipo de D.f o aprov.
Empresa 1	Lavado de motores	0.8	Tarro 1,6 gal	Trimestral	Sí	Incineración
Empresa 2	Galvanizado y remache de piezas pequeñas de hierro	3.6	Canecas 55 gal	Semestral	Sí	Celda de seguridad
Empresa 3	Galvanizado de láminas de hierro	23.04	Canecas 55 gal	Mensual	Sí	Relleno sanitario

Tabla 10. (Continuación).

Id empresa	Descripción del proceso	Generación (T/año)	Tipo de almacenamiento	Frecuencia de recolección	Gestor externo	Tipo de D.f o aprov
Empresa 4	Elaboración y galvanizado de productos con aluminio	224	Bodegas con pilas	Semanal	Sí	Producción de cemento
Empresa 5	Lavado de botellas y elaboración de bebidas	30	Canecas 55 gal	Mensual	Sí	Compostaje
Empresa 6	Elaboración de confitería	144	Canecas 55 gal	Mensual	Sí	Remitido a la PTAR- C
Empresa 7	Tintura y acondicionamiento de textiles	40	Canecas 55 gal	Semestral	Sí	Compostaje
Empresa 8	Elaboración de pasta con papel reciclado	23.400	Bodegas con pilas	Diaria	No	Relleno de terrenos

Fuente: La autora (2018)

Para implementar técnicas de aprovechamiento y disposición final eficientes se requiere conocer las características de las aguas residuales y los tratamientos a los que son sometidas, por consiguiente, se identificaron cada uno de los tratamientos que se aplican en siete empresas (exceptuando la empresa 1 que no cuenta con PTAR) y en la PTAR-C de EMCALI, los cuales se encuentran expuestos en la Tabla 11.

Se debe tener en cuenta que las características de las aguas residuales industriales son el insumo primordial para definir qué tipo de procesos de tratamiento son necesarios para disminuir y/o descontaminar el agua residual industrial. Así mismo, es importante destacar que las propiedades de esta clase de aguas varían considerablemente en cantidad, fuerza y presencia de sustancias contaminantes, e incluso hasta para la misma clase de industria, dado que hay muchos factores que inciden en esta variación como tipos de descarga, flujos de producción, entre otras dinámicas propias de cada empresa (Metcalf-Eddy, 1977).

Al analizar los trenes de tratamiento de las empresas se puede identificar que las industrias que pertenecen a un sector productivo, como es el caso del sector de metalmecánica y de alimentos y bebidas, presentan procesos semejantes. En el caso de las industrias metalmecánica, las empresas 2, 3 y 4 tienen en sus procesos baños galvánicos para realizar recubrimientos electrolíticos a las piezas que fabrican, donde utilizan diversas sustancias altamente contaminantes como metales pesados y ácidos. Por consiguiente, el agua residual de la industria metalmecánica tiene una naturaleza generalmente inorgánica, la cual es tratada inicialmente con procesos de neutralización, tratamiento químico de

coagulación y floculación, clarificación y finalmente con filtración empleando distintos lechos filtrantes.

Las industrias de alimentos y bebidas gracias a sus procesos de lavado de botellas y producción de bebidas y alimentos en su gran mayoría según lo reportado en la literatura presentan altos contenidos de materia orgánica disuelta (alta carga de DBO) y alta presencia de sólidos suspendidos (Henze *et al.*, 1997). Es por ello que en estos casos los trenes de tratamiento de la empresa 5 y 6 se concentran en procesos de tratamiento de tipo biológicos que permitan disminuir la carga orgánica final, empleando procesos aerobios y anaerobio.

Con respecto a las aguas residuales generadas en la industria textil, empresa 7, poseen cantidades relevantes de sustancias químicas como almidones, dextrinas, alcoholes, colorantes, pigmentos, entre otros, que en su mayoría son de origen sintético y son empleadas para el teñido de las prendas (Colotta, 2003; Garcés *et al.*, 2005). Razón por la cual en el proceso de tratamiento de esta empresa textil aplican un tratamiento fisicoquímico (coagulación y floculación), sedimentación y estabilización.

En la empresa 8 emplean un proceso de tratamiento biológico para la descontaminación de las aguas residuales industriales, dado que en el proceso se generan altas cantidades de DQO y DBO, sólidos suspendidos totales, lignina y celulosa. Finalmente, para el tratamiento de las aguas residuales municipales de Cali, EMCALI emplea un tratamiento químico avanzado que está conformado por operaciones unitarias, coagulación, floculación y sedimentación. Adicionalmente, se identificó que dos industrias (empresa 8 y 4) y la PTAR municipal están descargando las aguas tratadas a la cuenca del río Cauca.

6.2.1 Caracterización de interés sanitario

En la Tabla 11 se presentan todos los resultados de análisis realizados a ocho empresas y a la PTAR operada por EMCALI. Se encontró que los lodos de la PTAR-C contenían los más altos niveles de DBO₅ de todas las caracterizaciones, lo que quiere decir que la carga orgánica de las aguas residuales municipales es bastante alta, lo cual coincide con la composición típica reportada por Romero (2002). Los lodos de la empresa 5 también presentaron valores altos de DBO₅ al igual que los valores de DQO, lo que muestra que casi todos los sólidos se deben a la presencia de material orgánico debido a sus procesos normales de elaboración de alimentos y bebidas, en específico en el lavado de botellas para la reincorporación al proceso.

Tabla 11. Análisis fisicoquímicos realizados a lodos industriales y municipal

PARÁMETRO		LODOS INDUSTRIALES								LODO MUNICIPAL
		Empresa 1	Empresa 2	Empresa 3	Empresa 4	Empresa 5	Empresa 6	Empresa 7	Empresa 8	PTAR-C
Fisicoquímico	DQO (mg/g)	16,25	2,86	12,40	0,16	8,45	32,90	21,6	10,2	20,00
	DBO ₅ (mg/g)	2,35	2,04	0,62	0,14	8,20	3,76	1,7	0,2	9,85
	Solidos suspendidos totales (mg/L)	0,09	0,01	0,02	0,53	0,08	0,29	0,1	88,3	0,07
	Solidos Volatiles (mg/g)	156,68	130,84	304,62	30,92	81,75	260,04	80,9	561,8	160,63
	Nitratos (mg/g)	0,13	0,28	0,02	0,25	0,06	0,20	0,6	0,27	0,02
	Nitrogeno Total (mg/g)	0,27	0,13	0,17	0,31	7,37	3,79	0,3	0,612	1,34
	Nitritos (mg/g)	0,12	0,02	0,02	0,39	0,01	0,02	0,0466	0,01	0,03
	Nitrogeno amoniacal (mg/g)	0,02	0,16	0,10	0,16	0,52	1,10	0,0215	0,008	0,82
	Fosforo Soluble (mg/g)	0,05	0,07	0,0005	0,0047	0,41	0,02	0,0007	0,01	0,17
	Fosforo particulado (mg/g)	0,04	0,00	0,0014	0,67	2,31	1,50	0,0039	0,024	0,05
	Fosforo Total (mg/g)	0,09	0,07	0,0019	0,67	2,72	1,52	0,0047	0,035	0,22
	Grasas y/o Aceites (mg/g)	78,69	4,25	0,13	0,30	0,56	79,97	2,1	0,30	1,17
	pH (Unidades)	10,09	11,29	5,23	5,95	7,77	5,78	10,5	7,87	7,71
	Alcalinidad Total (mg CaCO ₃ /g)	17827,87	5,55	1992,93	176,79	3,31	8,28	67,00	4,8	1,14
	Acidez (mg CaCO ₃ /g)	0,00	0,00	100,66	37,61	0,0003	0,01	0	0	0,00
	Conductividad (µs/cm)	28,40	2,99	27,90	105,90	5,17	2,25	183	371	1,00
	Fenoles totales* (mg/kg)	N.D< 0,07	N.D< 0,07	N.D< 0,07	N.D< 0,07	N.D< 0,07	N.D< 0,07	3,7	0,321	N.D < 0,07
Microbiológico	Huevos de Helmintos (Nº/g)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00
	Coliformes Totales (UFC/g)	0,00	0,00	0,00	0,00	2297,01	5169,75	0	370000	12000000
	Coliformes Fecales (UFC/g)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	281,99	0	400	3100000
Metales Pesados	Arsenico* (mg/kg)	4,14	59,00	0,24	0,39	107,67	310,28	0,2	N.D <0,111	0,90
	Cadmio* (mg/kg)	N.D< 0,77	1,18	N.D< 1,14	N.D< 0,75	13,97	1,84	N.D <0,97	2,3	N.D < 1,0
	Cobre* (mg/kg)	740,30	26,25	46,03	20,07	61,77	69,05	2,4	52,1	58,90
	Cromo* (mg/kg)	329,20	259,30	120,97	44,78	19,10	13,88	4,8	7,20	11,50
	Mercurio* (µg/kg)	83,40	241,45	124,99	62,12	67,14	99,76	N.D <0,887	0,098	0,40
	Molibdeno* (mg/kg)	49,13	28,03	11,96	29,88	42,80	45,29	N.D <23,37	N.D <44,32	N.D < 2,4
	Plomo* (mg/kg)	649,95	N.D< 2,56	N.D< 18,11	N.D< 11,85	38,25	10,18	N.D <14,52	35,7	16,90
	Selenio* (mg/kg)	126,14	28,51	127,91	101,82	30,66	42,84	N.D <17,11	306,3	300,80
	Zinc* (mg/kg)	0,25	0,24	322,43	217,89	195,87	104,27	N.D <10,39	19,9	30,00

Fuente: La autora (2018)

La empresa 6, reportó los mayores niveles de DQO, no obstante, estos lodos no presentaron altos niveles de DBO₅, por tanto, la carga de sólidos no está compuesta principalmente por material orgánico, sino por otro material de mayor dificultad para la oxidación química. La empresa de la industria de papel (empresa 8) presentó la mayor carga de sólidos suspendidos totales, debido principalmente a la alta carga de lignina y celulosa de su proceso productivo.

Dado que los lodos de las empresas 5 y 6 pertenecen al sector de alimentos y bebidas, presentaron los niveles más altos de nitrógeno y fósforo totales, lo que puede generar efectos de eutrofización en los cuerpos de agua que reciban este tipo de residuos sin un tratamiento previo. Sin embargo, los lodos de la empresa 4 de metalmecánica, fueron los que presentaron los niveles más altos de otras formas de nitrógeno en estado de oxidación: nitratos y nitritos, causado por la alta cantidad de electrolitos usados durante su proceso productivo (Rojas,1980).

Los valores extremos de pH fueron reportados para los lodos de las empresas 2 y 3. La primera tuvo el valor más alto, lo que muestra que los residuos generados presentan altos niveles de alcalinidad que deben gestionarse de manera adecuada, dado que pueden ser peligrosos y generar problemas durante su manipulación sin un tratamiento previo. Mientras que los lodos de la empresa 3 mostraron los niveles más bajo de pH, lo que quiere decir que durante su proceso productivo usan altos volúmenes de ácidos que pueden favorecer la presencia de mercurio, estos lodos presentaron los niveles más altos de este metal pesado.

Por otra parte, se encontró que los lodos de la PTAR-C presentan los valores más altos de las dos especies de coliformes, lo cual era de esperarse por todo el contenido de microorganismo patógenos presentes en las aguas residuales de naturaleza doméstica. Así mismo, los lodos de las empresas de alimentos y bebidas (5 y 6), debido al alto contenido de materia orgánica, puede favorecer la proliferación de microorganismos, tanto que la empresa 6 mostró niveles muy altos de coliformes totales, lo que puede dificultar su disposición final. Además, los lodos de ésta misma empresa mostraron en general, altos niveles de metales pesados. También, se pudo evidenciar la presencia de mercurio en los lodos de la PTAR-C.

Teniendo en cuenta que la empresa 1 de automotriz, no cuenta con PTAR, estos lodos presentaron los niveles más altos de metales pesados, en especial para cadmio, cromo y plomo, lo que los vuelve extremadamente peligrosos tanto para la salud humana como para el ambiente. En general, los lodos de las empresas de metalmecánica, presentaron niveles altos de metales, por el contrario, los lodos de la empresa 7 no arrojaron resultados significativos para los metales pesados.

Al evaluar la peligrosidad de los lodos, se encontró que los lodos obtenidos de la empresa 1 y la empresa 6 mostraron niveles altos de metales pesados y de coliformes, lo que dificulta la manipulación e incorporación en cadenas productivas sin un acondicionamiento previo. Además, la cantidad de lodos que genera la empresa 1, es la más baja de las empresas vinculadas al proyecto. Por estas razones, se decidió no continuar investigando los subproductos de estas dos empresas.

6.2.2 Caracterización mineralógica y química

En la

Tabla **13** se presentan la composición química de los diferentes lodos estudiados, mediante la técnica de fluorescencia de rayos x. Se puede observar que presentan pérdidas por ignición (LOI) altas, atribuido a fases volátiles, a deshidroxilación de fases arcillosas y de hidróxidos de aluminio, hierro, y descarbonatación. Se observa que ya se descartaron los lodos de las empresas 1 y 6, por lo que no fueron caracterizados. Se encontró que los lodos de la empresa 7 y empresa 8 poseen elevado porcentaje de óxido de calcio y alta pérdida por ignición, lo que confirma la fase de carbonato en su composición mineralógica y un alto contenido de materia orgánico cercano a los valores reportados por el lodo municipal.

El lodo de la empresa 4 posee elevada cantidad de óxido de aluminio, lo cual puede beneficiar las reacciones del cemento al entrar en contacto con las partículas finas del lodo. Mientras que el subproducto de la empresa 2 se compone principalmente por óxidos de silicio, aluminio y hierro, sustancias que lo hacen atractivo para ser usado como agregado fino en morteros de cemento por la posibilidad de que la fracción fina (menor a 45 μm) reaccione con el cemento para mejorar resistencia.

El lodo de la empresa 3 es un material rico en óxido de hierro (72%) por ser proveniente de la industria metalmecánica, por otra parte, el óxido de hierro es un material que en ocasiones reacciona con el cemento; no obstante, estas reacciones ocurren a edades largas. Se identificó que la industria de bebidas (empresa 5) posee un lodo que presenta una pérdida por ignición elevada, atribuible a material orgánico o arcilloso, por lo tanto, desde el punto de vista químico sea inviable para utilizarse en combinación con el cemento, además posee un elevado porcentaje de sulfato (SO_3) que puede generar expansiones en el cemento endurecido por la formación de productos expansivos como la taumasita.

En las industrias metalmecánicas (empresa 2, 3 y 4) se encontró en los lodos una cantidad de algunos elementos similares y otros bastante divergentes. Esto puede indicar que a pesar de que pertenezcan al mismo sector productivo hay muchas variables que influyen en los procesos que pueden generar grandes divergencias.

Dicha situación pudo ser contrastada con diversos resultados reportados en investigaciones previas, donde se encontró que una empresa dedicada al cromado reportaba que los

elementos químicos de mayor presencia en los lodos era CaO 18.11%, Cr 12.71%, Cu 5.85% y Ni 4.71%; además encontraron un contenido de 24.52% de materia orgánica (Castañeda, 2015). Mientras que para el contenido de materia orgánica para el lodo objeto de estudio se detectó que el valor obtenido es inferior al reportado por otros estudios descritos en la Tabla 12.

Tabla 12. Compilado de resultados obtenidos de materia orgánica

Referencia	Residuo analizado	% LO
La autora	Lodos galvánicos	6.51% - 19.67%
Lombana & Saavedra, 2018	Lodo galvánico	23.10%
Castañeda, 2015	Tratamiento de aguas residuales	33.67%
Pérez-Villarejo <i>et al.</i> , 2015	Lodo galvánico	36.62%
Luz <i>et al.</i> , 2009	Lodo galvánico	35.40%
Stepanov <i>et al.</i> , 2016	Lodo galvánico	29.78%

Fuente: La autora (2018)

Los lodos municipales de la PTAR-C de EMCALI están compuestos en su gran mayoría de materia orgánica, óxidos de silicio y óxidos de aluminio, lo que concuerda con lo reportado por Amin *et al.* (2018) que encontró que los lodos municipales generados en El Cairo, Egypto tenían un contenido elevado de materia orgánica según los reportes de pérdidas por ignición (65%).

Cabe resaltar que los reportes de resultados de FRX específicos para lodos industriales de diferentes las actividades productivas vinculadas a esta investigación son limitados, es por ello que se contrastaron los resultados de las industrias más documentadas, en este caso fue el sector productivo metalmecánico o también llamado galvánico.

Tabla 13. Composición química obtenida de los lodos industriales y municipal

Elemento y/o Compuesto	Composición química de lodos (% en peso)						
	Empresa 2	Empresa 3	Empresa 4	Empresa 5	Empresa 7	Empresa 8	PTAR EMCALI
CaO	1.31	0.70	0.23	6.05	45.89	52.95	5.10
SiO ₂	11.80	0.34	0.62	7.69	10.38	7.50	27.40
P ₂ O ₅	1.02	1.66	0.36	10.61	4.52	0.22	2.88

MgO	0.41	0.03	0.18	0.42	4.20	0.87	1.62
------------	------	------	------	------	------	------	------

Tabla 13. (Continuación)

Elemento y/o Compuesto	Composición química de lodos (% en peso)						
	Empresa 2	Empresa 3	Empresa 4	Empresa 5	Empresa 7	Empresa 8	PTAR EMCALI
TiO₂	0.45	0.04	62 ppm	0.20	0.11	0.45	0.98
Zn	10.84	10.69	0.02	0.61	0.05	0.24	0.14
K₂O	0.09	0.00	68 ppm	0.25	0.03	0.09	0.62
Pb	0.01	0.01	0.00	0.10	0.00	0.00	0.01
Ba	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.10
Cu	0.13	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	97 ppm
Cr	1.28	0.03	0.03	0.07	0.00	0.00	0.03
MnO	0.16	0.45	96 ppm	0.07	0.00	0.00	0.07
Zr	0.01	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.01
Sn	0.00	0.02	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00
Co	0.10	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	88 ppm
Mo	25 ppm	32 ppm	0.00	94 ppm	0.00	0.00	0.00
Ni	0.06	0.00	0.05	73 ppm	0.00	0.00	73 ppm
SO₃	10.11	0.09	18.38	7.47	3.24	0.46	6.41
Cl	1.10	4.94	0.02	1.07	2.43	0.07	0.10
Al₂O₃	11.35	0.16	57.21	27.43	2.01	5.68	12.64
Na₂O	1.48	1.49	2.92	1.52	1.79	0.19	0.56
Fe₂O₃	31.01	72.84	0.27	7.60	1.77	0.96	10.44
Sr	62 ppm	0.00	0.00	0.08	0.24	0.07	0.01
L.O.I	17.28	6.51	19.67	28.50	23.35	30.25	30.86

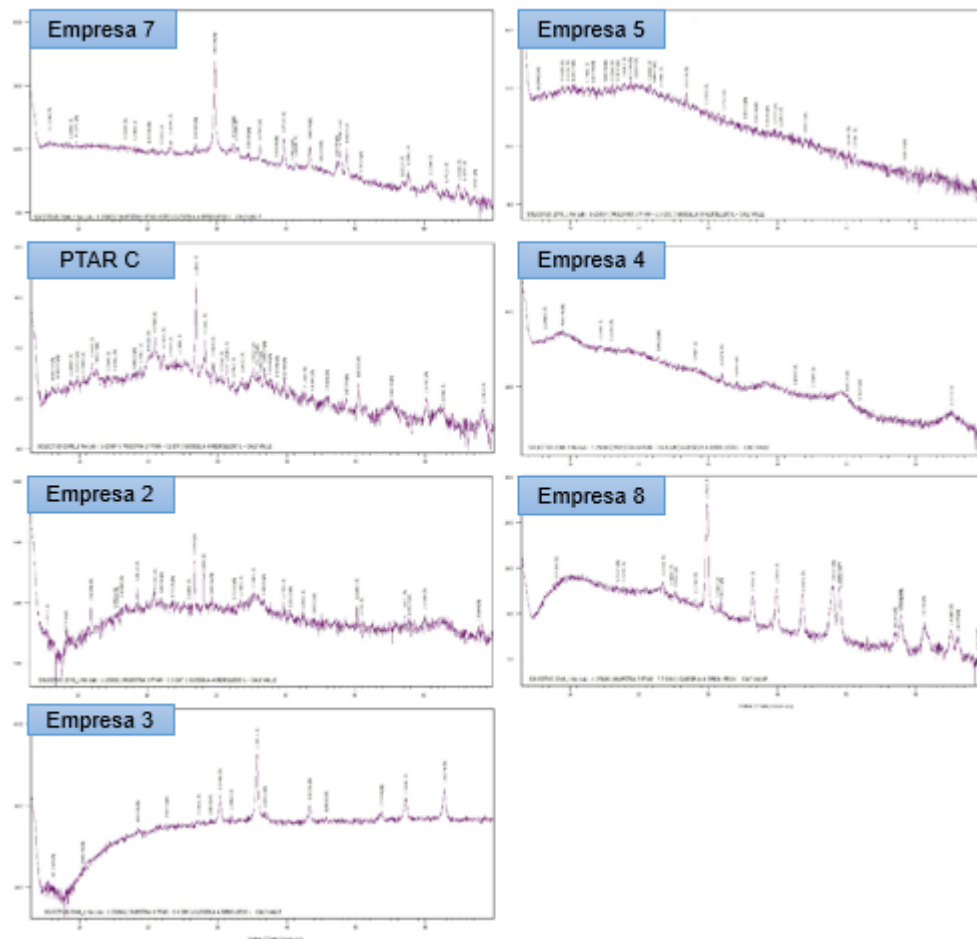
Fuente: La autora (2018)

Por otro lado, el DRX de las seis muestras de lodo industriales y una muestra de lodo municipal arrojaron diversos patrones determinados por cada una de sus estructuras expuestos en los difractogramas de la Figura 9.

Las muestras de las empresas 4 y 5 (industria metalmeccánica y de alimentos y bebidas) poseen un comportamiento característico de materiales amorfos, pues no muestran picos definidos en los patrones de difracción. Esta característica hace que estos materiales sean más reactivos que los lodos que poseen mayor cristalinidad (mayor cantidad de picos en los patrones), por consiguiente, puede ser benéfico o perjudicial dependiendo de la composición química de estos en el momento que se realicen las mezclas con el cemento Portland o base química de los pegantes para pisos.

Según los patrones de difracción, los lodos industriales de la empresa 3, 7 y 8 exhiben mayor cristalinidad en su microestructura, lo que permitiría que no tuviera una reacción con la base química del material, al igual que los agregados. Por otra parte, las muestras del lodo municipal y los lodos industriales de la empresa 2 muestran diferentes picos cristalinos en sus patrones de difracción. No obstante, entre los 20 y 30° 2θ aparece un halo correspondiente a fase amorfa en su microestructura, por lo que se espera que estos puedan generar algún tipo de reacción química con el cemento portland.

Figura 9. Patrones de difracción de muestras de lodos industriales y municipal



Fuente: La autora (2018)

Según los análisis mineralógicos de los lodos reportados por el laboratorio de IGAC (Tabla 14), se observa que la muestra de la empresa 7 y 8 contienen gran cantidad de calcita (carbonato de calcio CaCO_3), 79.45% y 87.59% respectivamente. Este compuesto es comúnmente utilizado como *filler* o relleno en adición a materiales cementicios, pues se

encarga de la resistencia mecánica a edades tempranas en estos materiales, por tanto, estos dos lodos presentan un elevado potencial desde el punto de vista mineralógico.

Tabla 14. Resultado de análisis mineralógico de las muestras de lodo mediante DRX

MINERAL	MUESTRAS DE LODO						
	PTAR-C	Empresa 2	Empresa 3	Empresa 4	Empresa 5	Empresa 7	Empresa 8
ARCILLAS DE 14 Å	-	2,97%	-	-	5,20%	4,36%	-
MICAS	1,93%	3,79%	-	20,84%	10,22%	1,04%	0,05%
PIROFILITA	2,66%	-	-	-	9,38%	2,15%	-
GIBSITA	-	-	5,61%	-	-	2,17%	-
CRISTOBALITA	5,84%	5,10%	-	-	9,58%	1,56%	-
CUARZO	45,12%	42,42%	3,54%	-	23,20%	4,43%	-
CALCITA	5,74%	4,67%	-	-	7,43%	79,45%	87,59%
APATITO	1,67%	-	-	-	9,62%	4,83%	-
CLORITAS	1,85%	-	1,77%	26,79%	-	-	-
ANFIBOLES	1,97%	-	1,87%	-	8,76%	-	-
METAHALOISITA	6,11%	15,19%	-	-	-	-	-
CAOLINITA	3,65%	-	-	-	7,17%	-	-
LEPIDOCROCITA	1,32%	-	-	-	-	-	-
FELDESPATOS	13,82%	21,87%	80,70%	13,78%	-	-	3,52%
DOLOMITA	5,60%	-	-	-	-	-	4,68%
HEMATITA	2,73%	3,98%	-	-	-	-	-
HALITA	-	-	6,50%	38,60%	-	-	4,16%
GOETITA	-	-	-	-	9,45%	-	-

Fuente: La autora (2018)

Por otro lado, la muestra de la empresa 7 presenta 4.36% de arcilla, material que puede retardar las reacciones de fraguado y alta demanda de agua en el cemento en caso de ser arcillas plásticas. Los otros minerales que presentan arcillar en menor proporción, son materiales inertes, tales como feldespatos, dolomitas, micas, los cuales son aluminosilicatos que se encuentran en estado cristalino como lo muestran los patrones de difracción de ambas muestras.

El lodo de la empresa 3 contiene un elevado porcentaje de feldespatos y minerales de hierro, estos compuestos corresponden a aluminosilicatos de sodio, potasio o calcio, y según el patrón de difracción (Figura 9) presentan una microestructura cristalina lo que hace que esta fase sea inerte con el cemento Portland. Sin embargo, se identificó un 6.5% de Halita (sal mineral), que puede generar reacciones contrarias cuando se mezcle este material con la base química por el ion cloro que contiene.

Las muestras de lodo empresarial 2 y el lodo municipal tienen cantidades de minerales similares, predominando en estas el cuarzo, en cantidades de 45.12% y 42.42% respectivamente, además posee porciones significativas de metahaloisita que es un mineral

silico-aluminoso meta-estable con cierto grado reactividad. Por otra parte, el lodo municipal presentó fases arcillosas que podrían dificultar la acción del cementante, deteriorando las propiedades mecánicas.

Finalmente, las muestras de las empresas 4 y 5, según el análisis mineralógico, muestran cantidades de diferentes silicatos y sales. No obstante, en los patrones de difracción de estas muestras se aprecia que los picos no tienen intensidades significativas y tienen un alto contenido de fase amorfa, por tanto, no es preciso atribuir mediante esta técnica los minerales o compuestos presentes.

A partir de la caracterización química (FRX) y mineralógica (DRX), se estableció que los lodos industriales que reportaron mayor potencial en sus compuestos y estructuras para incorporarse en el pegante como agregados son los lodos residuales de las empresas 2 y 4.

6.2.3 Evaluación de los sistemas de acondicionamiento para lodos

En la caracterización de interés sanitario se encontró un gran contenido de microorganismos patógenos como los coliformes totales (12×10^6) y coliformes fecales (31×10^5) presentes en los lodos municipales, expuestos en la Tabla 11. Los coliformes son bacilos gram negativos, aerobios y facultativos anaerobios, no formadores de esporas, que fermentan la lactosa. El grupo de coliformes totales, se considera el género *Escherichia*, especie *E. coli*, como la población de bacterias coliformes más representativa de la contaminación fecal. Los coliformes pueden aceptar o transferir genes resistentes a los medicamentos, por lo que se hace necesario su eliminación (Romero, 2002).

Razón por la cual, se investigaron distintos métodos para estabilizar los lodos con bajos costos y resultados en poco tiempo. Se encontró que los métodos más empleados para este proceso son el tratamiento térmico (Araque & Rodríguez, 2006) y el tratamiento alcalino con cal viva y cal hidratada (Torres *et al.*, 2007). De igual manera, se realizaron consultas a diversos profesionales en microbiología y manifestaron que los coliformes totales y fecales pueden ser eliminados en rangos de temperatura entre 50 y 60°C.

Teniendo en cuenta los criterios identificados en la literatura se realizó un diseño experimental descrito en el Cuadro 3. En donde se efectuaron dos tipos de tratamiento, el primero con exposición térmica a dos temperaturas diferentes durante 24 horas y el segundo con adición de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) en dos porcentajes distintos durante 144 horas. Cada uno de estos tratamientos fueron evaluados por triplicado.

Tabla 15. Diseño experimental para la estabilización de lodos

Tipos de estabilización	Condiciones	Tiempo
TC: Tratamiento Álcali	10% de adición de cal	24 h
	25% de adición de cal	
Tt: Tratamiento Térmico	Temperatura del horno 50°C	144 h
	Temperatura del horno 70°C	
Testigo: sin ningún tratamiento	NA	NA

Fuente: La autora (2018)

Este diseño experimental fue efectuado en el Laboratorio de Combustión Combustibles de la Escuela de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente y los análisis microbiológicos fueron realizados en el Laboratorio de Aguas del Instituto CINARA. Cada uno de los procedimientos empleados para efectuar los tratamientos álcali (Figura 10) y térmico (Figura 11) con los lodos municipales están expuestos en la Figura 10 y 11.

Figura 10. Procedimiento para la estabilización térmica



Fuente: La autora (2018)

Figura 11. Procedimiento para la estabilización álcali



Fuente: La autora (2018)

En la Tabla 16 se exponen los datos obtenidos en el laboratorio después de realizar los tratamientos y el testigo. Se encontró que la gran mayoría de tratamientos fueron eficaces para estabilizar los lodos, dado que después de realizar los diferentes tratamientos, el único valor que reportó contenido de coliformes fecales fue PTAR-C T₁t₃, el cual corresponde al tratamiento térmico a 50° C durante 24 horas y numero de repetición 3.

Es así que los lodos municipales que continuaron a la siguiente fase fueron estabilizados térmicamente a una temperatura de 70° C durante 24 horas, para garantizar un bajo riesgo.

Tabla 16. Análisis de microorganismos de los tratamientos evaluados

Muestra	Coliformes totales (UFC/g)	Coliformes fecales (UFC/g)
Testigo	4363,6	3560,9
PTAR-C T ₁ C ₁	0	0
PTAR-C T ₁ C ₂	0	0
PTAR-C T ₁ C ₃	0	0
PTAR-C T ₂ C ₁	0	0
PTAR-C T ₂ C ₂	0	0
PTAR-C T ₂ C ₃	0	0
PTAR-C T ₁ t ₁	0	0
PTAR-C T ₁ t ₂	0	0
PTAR-C T ₁ t ₃	1000	0
PTAR-C T ₂ t ₁	0	0

Tabla 17. (Continuación)

Muestra	Coliformes totales (UFC/g)	Coliformes fecales (UFC/g)
PTAR-C T ₂ t ₂	0	0
PTAR-C T ₂ t ₃	0	0

Fuente: La autora (2018)

Donde:

T: Tipos de tratamientos

c_(x) y t_(x): Número de repetición

Tt: Tratamiento térmico

C₁: Tratamiento con adición de cal al 10%

TC: Tratamiento con cal

C₂: Tratamiento con adición de cal al 25%

t₁: Tratamiento a 50° C (24 horas)

t₂: Tratamiento a 70° C

6.3 FASE EXPERIMENTAL

6.3.1 Pruebas preliminares

Se determinó que los lodos seleccionados para continuar en este proceso de evaluación son los lodos industriales de la empresa 2 y empresa 4, los cuales de ahora en adelante se nombrarán lodo industria 1 y lodo industrial 2 respectivamente. En la Tabla 17 se presentan las cantidades de materiales empleadas para preparar los morteros, que posteriormente se evaluaron a compresión a 1 y a 7 días de curado.

En la preparación de los pegantes se tuvo en cuenta que la textura final del material adquiriera una consistencia cremosa firme, como lo sugieren diversas fichas técnicas de los pegantes más reconocidos a nivel comercial, teniendo como referencia el material sin adición de lodos; las relaciones Agua/Cemento fueron calculados por peso.

Tabla 18. Dosificación de morteros para evaluación de resistencia a compresión

Tipo de mortero	Cemento uso general (g)	Arena de río (g)	Lodo municipal (g)	Lodo industrial 1 (g)	Lodo industrial 2 (g)	Relación A/C
Mortero referencia	180.2	495.6				0.60
Mortero Municipal	180.2	247.8	247.8			1.47
Mortero industrial 1	180.2			247.8		0.94

Mortero Industrial 2	180.2				247.8	3.93
----------------------	-------	--	--	--	-------	------

Fuente: La autora (2018)

Se encontró que los morteros con reemplazo de lodo por arena demandan mayor cantidad de agua de mezclado, debido a que las fases arcillosas del lodo municipales y de los lodos industriales 1 presentan una alta absorción de agua en la mezcla. Esta situación fue reportada Tanpure *et al.* (2017), quienes encontraron que a medida que aumenta el porcentaje de lodos de PTAR en la mezcla, también lo hace la absorción de agua.

El mortero que presentó mayor demanda de agua fue el lodo industrial 2, requiriendo más de seis veces respecto al mortero referencia, seguido por el preparado con lodo municipal (más del doble respecto al de referencia), mientras que el mortero que menos requirió agua fue el mortero preparado con lodo industrial 1, demandando alrededor de 1.5 veces el agua de requerida para la referencia. Lo anterior es importante a tener en cuenta al realizar mezclas de cemento Portland, ya que, al utilizar mayor cantidad de agua, las resistencias tienden a disminuir debido a la mayor porosidad que se presenta por la posterior evaporación de agua.

Tabla 19. Resistencia a compresión de morteros de cemento

Muestra	Relación agua/cemento	Consumo agua vs Ref. (%)	Resistencia a la compresión (Mpa)		Índice de resistencia vs. Ref. 1 día (%)	Índice de resistencia vs. Ref. 7 días (%)
			Promedio 1 día	Promedio 7 días		
Mortero referencia	0.60	---	2.52	7.83	---	---
Mortero Municipal	1.47	246%	0.10	0.00	4%	0%
Mortero industrial 1	0.94	157%	4.40	5.71	175%	73%
Mortero Industrial 2	3.93	656%	2.31	2.67	92%	34%

Fuente: La autora (2018)

En general, la resistencia de los morteros disminuye a las dos edades respecto a la resistencia del mortero referencia. Sin embargo, la resistencia del mortero elaborado con lodo industrial 1 supera en 1.75 veces a la referencia a 1 día, a 7 días obtiene el 73% del mortero referencia, lo cual es un comportamiento aceptable.

Por otra parte, el mortero con lodo municipal presentó resistencias muy bajas respecto a la referencia, incluso a 7 días de curado bajo agua, las muestras se expandieron y desboronaron, debido al alto contenido de arcilla en el material (Figura 12). Con respecto al mortero industrial 2 a 1 día obtuvo un resultado aceptable (93% respecto al de referencia).

No obstante, a 7 días presentó una caída significativa en la resistencia por su alto contenido de sulfatos en su composición química, lo que genera que el mortero sea susceptible a expansión y fisuración interna.

Cabe resaltar que en la literatura no se registraron resultados de análisis de pruebas de compresión empleando lodos industriales y municipales en la composición del mortero, ya que es un material innovador que no se han encontrado registros de su investigación previamente.

Figura 12. Cilindro de morteros después de inmersión al agua



Fuente: La autora (2018)

6.3.2 Pruebas de calidad de los adhesivos cementicios

A partir de los resultados de los ensayos de caracterización y preliminares (resistencia a compresión en morteros), se decidió continuar la investigación con el lodo municipal (se debe incluir, pues es objeto del estudio) y un lodo industrial (lodo industrial 1), realizando reemplazos por el agregado fino en el pegante cerámico en porcentajes de 10, 20, y 30% en cada lodo. A continuación, se presentan los resultados de estos dos ensayos con su respectivo análisis estadístico.

6.3.2.1 Resistencia a tracción después de tiempo abierto en pegantes con lodo

En la Tabla 19 se muestran los valores de resistencia después de tiempo abierto para los lodos municipal e industrial. La mejor resistencia se obtuvo con el lodo municipal 20 % (0.34 MPa), seguido por un valor similar (0.31 MPa) cuando se utilizó lodo industrial en 30 %. Cabe destacar que no se observa una tendencia clara al comparar la resistencia de cada

lodo, además se encuentra que la resistencia con los otros porcentajes en los dos lodos es muy baja, principalmente en el lodo industrial, la diferencia es del orden de 10 veces.

Por tanto, esta situación se le atribuye a la aplicación inadecuada de la carga cuando se pegó la cerámica. El mejor resultado obtenido en los dos lodos (0.34 y 0.31 MPa), es aceptable en la resistencia de un pegante de pisos, aunque no cumple con lo recomendado con la norma NTC 6050 (0.5 MPa), la cual sugiere datos, pero cabe aclarar que no son de obligatorio cumplimiento.

Tabla 20. Efecto considerando la interacción entre los niveles de ambos factores para la resistencia a tracción después de Tiempo Abierto

Interacción	Mun-10%	Mun-20%	Mun-30%	Ind-10%	Ind-20%	Ind-30%
Promedio (MPa)	0.15	0.34	0.12	0.03	0.02	0.31
Desv. Estándar	0.04	0.05	0.02	0.01	0.00	0.01
Varianza	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Min	0.13	0.30	0.10	0.02	0.01	0.30
Max	0.19	0.39	0.13	0.04	0.02	0.32
CV	23.17%	14.72%	16.45%	26.78%	17.31%	2.62%

Fuente: La autora (2018)

El coeficiente de variación (CV) es menor en el ensayo con lodo industrial 30% es de solo 2.62%, mientras que el de los otros ensayos se encontraron por encima del 15%.

6.3.2.2 Resistencia a la tracción después de inmersión en agua en pegantes con lodo

Los resultados de resistencia a la tracción después de inmersión al agua (Tabla 20) indican que a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de lodo municipal, este valor disminuye significativamente, coincidiendo con lo encontrado en los ensayos de resistencia a compresión (etapa preliminar), donde se evidenciaba que al sumergir en agua los morteros elaborados con este lodo para su respectivo curado, se desintegraban debido al hinchamiento de su fase arcillosa por la absorción de agua. Así mismo, coincide con lo reportado por Taur *et al.* (2018) quien empleando otra clase de materiales afirman que a medida que aumenta el porcentaje de lodos de PTAR en la mezcla, la resistencia de los ladrillos disminuía.

Lo anterior es una importante desventaja de este material para ser usado en pegantes de pisos, ya que pueden existir humedades después de su colocación, ocasionando el levantamiento de las baldosas. Por otra parte, se encontró que con el lodo industrial se obtienen resistencias a tracción mayores, siendo el mejor comportamiento cuando se reemplaza el 10% de este lodo (0.34 MPa), cuando se utiliza en 20 y 30% disminuye la

resistencia, sin embargo, todos los valores son aceptables. La variabilidad de los datos es elevada en todos los reemplazos, especialmente para el lodo industrial 20%.

Esta situación se constató con lo reportado en varias investigaciones empleando otra clase de materiales de construcción, Joshi *et al.* (2016) mencionó que los bloques con reemplazo parcial de arena en hasta un 10% por lodos, cumplen con los requerimientos estándares. Sin embargo, cuando se probaban porcentajes mayores, disminuía la calidad del material. En el caso de Pavlík *et al.*, (2016), reportaron que en la producción de cemento portland el límite seguro para el uso práctico de los lodos domésticos como sustituyentes de otras materias primas era del 10%, debido principalmente al contenido relativamente alto de cloruros y álcalis.

En el uso de lodos hidratados para la producción de hormigones y morteros también Roccaro *et al.*, (2015) demostró que el exceso de lodo puede reemplazar parcial o completamente el agua en el mortero de concreto, pero esta sustitución del agua por lodo, incluso en una cantidad del 10%, reduce la resistencia a la compresión de los materiales obtenidos.

Tabla 21. Efecto considerando la interacción entre los niveles de ambos factores para la resistencia a tracción después de inmersión en agua

Interacción	Mun-10%	Mun-20%	Mun-30%	Ind-10%	Ind-20%	Ind-30%
Promedio (MPa)	0.19	0.05	0.07	0.34	0.26	0.24
Desv. Estándar	0.04	0.01	0.01	0.07	0.11	0.04
Varianza	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
Min	0.14	0.05	0.06	0.29	0.18	0.20
Max	0.23	0.07	0.08	0.42	0.39	0.28
CV	22.03%	18.87%	17.52%	21.17%	42.45%	15.99%

Fuente: La autora (2018)

6.3.2.3 Resistencia a tracción después de tiempo abierto y después de inmersión en agua para el pegante Comercial

En la Tabla 21 y Tabla 22 se presentan los resultados para la resistencia a la tracción después de tiempo abierto y después de inmersión en agua para un pegante comercial. En donde se identificó que, en ambos casos, la resistencia es mayor que la obtenida al utilizar los dos lodos en los pegantes (Municipal e Industrial), superando lo recomendado por la norma NTC 6040 (0.5 MPa). Se encontró que la variabilidad es baja en los dos ensayos para el pegante comercial.

Tabla 22. Indicadores para el Lodo de Control sobre la respuesta de la resistencia después de Tiempo Abierto

Comercial	Indicador
Promedio (MPa)	0.54
Desv. Estándar	0.07
Varianza	0.00
Min	0.48
Max	0.62
CV	12.43%

Tabla 23. Indicadores para el Lodo Control sobre la respuesta de la Resistencia a tracción después de inmersión

Comercial	Indicador
Promedio (MPa)	0.53
Desv. Estándar	0.10
Varianza	0.01
Min	0.43
Max	0.62
CV	18.62%

Fuente: La autora (2018)

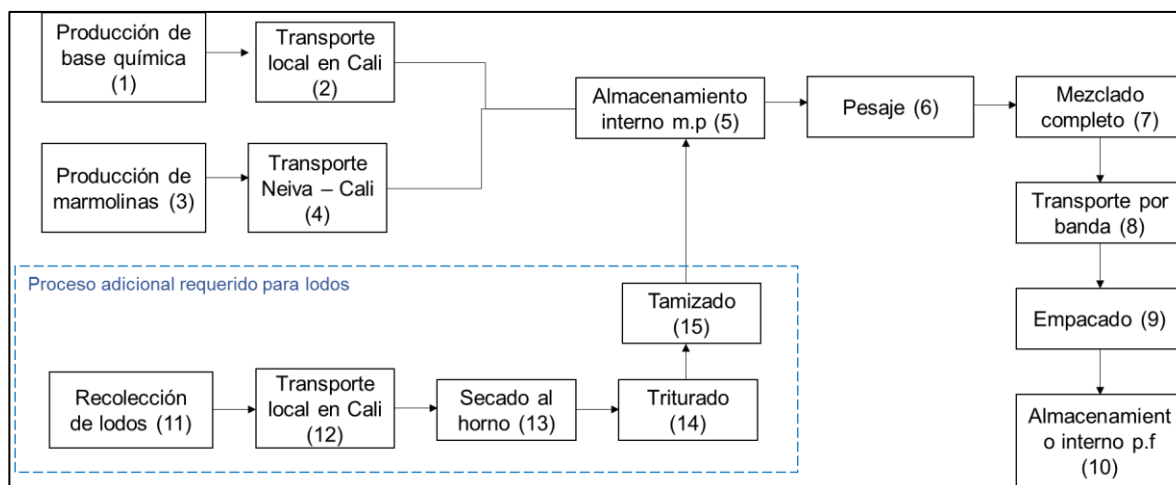
A partir de los resultados obtenidos, y de su respectivo análisis estadístico, se recomienda no utilizar el lodo municipal para la fabricación de pegantes para pisos, debido que, al entrar en contacto con el agua, cuando se elaboraron los morteros para el ensayo preliminar de compresión, este material después de haber endurecido, se desintegra por el hinchamiento de dicha fase arcillosa, consecuente con el contenido de arcilla encontrada en la caracterización por DRX.

Por otra parte, se recomienda utilizar el lodo industrial como reemplazo de agregado fino en la fabricación de pegantes para pisos en proporciones bajas (< 20%), ya que se encontró que al aumentar el reemplazo de este material, la resistencia a tracción después de inmersión disminuye.

6.4 ANÁLISIS DE COSTOS, FINANCIEROS Y ECONÓMICOS DE LOS PRODUCTOS OBTENIDOS

Los procesos productivos requeridos para cada uno de los escenarios se exponen en la Figura 13. El E1 inicia con el proceso de producción de base química y marmolinas y finaliza con el almacenamiento interno del producto final. En cuanto al E2, existe una variación en la producción, dado que para incorporar los lodos como materia prima se requieren procesos previos (recuadro punteado en azul de la Figura 13). Cabe resaltar que este último escenario también requiere el proceso de producción de base química y producción de marmolinas, aunque en menor medida.

Figura 13. Diagrama de flujo del proceso de producción de pegante de cerámica E1 y E2



*Las siglas m.p: corresponde a la materia prima y p.f: corresponde al producto final.

Fuente: La autora (2018)

Para cada uno de los escenarios se levantó información técnica base, como punto de partida para realizar los cálculos posteriores, se describen en la Tabla 23. La presentación normal del producto en el mercado es en bultos de 25 kg.

Para determinar el tamaño de producción, se trabajó con una producción inicial para el escenario ya existente en la empresa MAECOL (E1), y se estimó un crecimiento sostenido anual del 3%. En cuanto a E2, dado que sería un producto nuevo en el mercado, tratando de ser conservadores, se estimó una producción inicial del 80% de la producción inicial de E1, con un incremento del 10% para los primeros años, con el fin de igualar ambas producciones para el tercer año, de allí en adelante se estimó el mismo crecimiento sostenido del 3% anual de E1.

Tabla 24. Información técnica de sistemas de producción de pegante para cerámica tradicional (E1) y pegante para cerámica con lodos (E2)

Horizonte de los proyectos	10 años
Presentación de los productos	Bulto por 25 kg
Producción inicial E1 (anual)	33,049 bultos
Producción inicial E2 (anual)	32,175 bultos
Porcentaje de adición de lodos en E2	20%
Humedad de los lodos	20%

Fuente: La autora (2018)

Para la selección de tecnología de ambos escenarios, se determinó la maquinaria requerida para los dos procesos productivos, la Tabla 24 y Tabla 25 describen las máquinas y equipos con su respectivo precio unitario y los tiempos de depreciación recomendados para maquinaria industrial.

Tabla 25. Maquinaria requerida para la producción de pegante de cerámica tradicional (escenario 1)

No.	Máquina	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total	Tiempo de depreciación (años)
1	Tolva y banda transportadora	1	\$ 12,000,000	\$ 12,000,000	10
2	Pesa o balanza de piso 300 kg pesaje de materias primas	1	\$ 600,000	\$ 600,000	10
3	Balanza analítica para dosificación de químicos	1	\$ 500,000	\$ 500,000	10
4	Mezclador de cintas. Incluye sistema de pesaje de costales	1	\$ 40,000,000	\$ 40,000,000	10
5	Máquina para empacar - cosedora	1	\$ 800,000	\$ 800,000	10
Total				\$ 53,900,000	

Fuente: La autora (2018)

Para E2 se incluyó la maquinaria necesaria para el procesamiento previo de los lodos industriales, dado que se deben someter a un proceso de secado utilizando hornos de tipo de industria cementera, trituración y tamizado. Posteriormente, los lodos ingresan al mismo proceso productivo del pegante tradicional.

Tabla 26. Maquinaria para producción de pegante de cerámica con lodo (escenario 2)

No.	Máquina	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total	Tiempo de depreciación (años)
1	Tolva y banda transportadora	1	\$ 12,000,000	\$ 12,000,000	10
2	Molino de martillo	1	\$ 18,000,000	\$ 18,000,000	10
3	Zaranda Vibratoria	1	\$ 28,000,000	\$ 28,000,000	10

Tabla 25. (Continuación)

No.	Máquina	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total	Tiempo de depreciación (años)
4	Pesa o balanza de piso 300 kg pesaje de materias primas	1	\$ 600,000	\$ 600,000	10
5	Balanza analítica para dosificación de químicos	1	\$ 500,000	\$ 500,000	10
6	Mezclador de cintas. Incluye sistema de pesaje de costales	1	\$ 40,000,000	\$ 40,000,000	10
7	Máquina para empacar - cosedora	1	\$ 800,000	\$ 800,000	10
8	Horno industrial de secado	1	\$ 30,000,000	\$ 30,000,000	10
Total				\$ 12,990,0000	

Fuente: La autora (2018)

Dado que la empresa MAECOL ya cuenta con una planta de producción para distintos materiales de construcción, la localización de los sistemas productivos propuestos de acuerdo con los escenarios 1 y 2, será en las mismas instalaciones de la planta actual, donde se tienen costos de arrendamiento del local por \$3,200,000 mensuales. Asimismo, se estima que para el montaje del E2 se requerirá \$ 5,000,000 en adecuaciones.

Para ambos escenarios, el recurso humano administrativo y comercial es el mismo con el cual ya cuenta la empresa MAECOL. Por tanto, los costos asociados a estas actividades no se tienen en cuenta. Ambos escenarios requerirían recurso humano operativo según lo establecido en la Tabla 26, todos los valores incluyen salarios básicos y prestaciones de ley.

Tabla 27. Recurso humano operacional requerido para E1 y E2

Personal - Cargo	Perfil Profesional				Salario Mensual	Cantidad
	Profesional	Tecnólogo	Técnico	No Calificado		
Operario 1			X		\$ 1,500,000	1
Operario 2			X		\$ 1,500,000	1
Supervisor	X				\$ 2,500,000	1
Total	1		2	0	\$ 5,500,000	3

Fuente: La autora (2018)

Las licencias y permisos legales y ambientales requeridos para la operación de la planta tanto para E1 y E2 no tienen costos, sin embargo, se estiman costos de transacción durante la gestión de todos estos requisitos una vez en el arranque, el valor asignado es de \$ 2'000,000 para gastos en transporte o movilidad, tiempo de dedicación, etc.

6.4.1 Análisis de costos

Se estimaron los valores unitarios para cada uno de los ítems de inversión y escenarios de acuerdo con los costos totales tanto de inversión inicial como de operación, todos los cálculos fueron asociados a la producción de un bulto de 25 kilogramos.

Se realizó el flujo total de costos desde el año de inicio (en economía normalmente se toma como año cero) hasta el horizonte de 10 años, luego se estimaron los Valores Presentes (VP) para cada línea de gastos, aplicando una tasa de descuento de 6%, obtenida del promedio de la tasa semanal de Depósito a Término Fijo (DTF) para el 2017 tomada del Banco de la República de Colombia (Banco de la República de Colombia, 2017). Posteriormente, los costos totales en VP durante todo el horizonte, se dividieron sobre la producción total del pegante durante los 10 años, para obtener los costos unitarios mostrados en la Tabla 26.

La materia prima y los servicios básicos, se determinaron con base al tamaño de la producción. La depreciación de los equipos se calculó de forma lineal durante el horizonte, aplicando una tasa fija de 10% para cada año.

Tabla 28. Costos unitarios discriminados para cada escenario

Ítem	Costos unitarios en VP (\$ / bulto 25 kg)	
	E1	E2
Adecuaciones	0	16
Maquinaria, equipos, instrumentos	163	404
Capacitaciones, entrenamientos	14	28
Materia prima	6,329	5,833
Mano de obra	1,470	1,510
Depreciación maquinaria, equipos, instrumentos	120	297
Servicios básicos	181	240
Mantenimiento de equipos	13	18
Arrendamiento del local	855	878
Permisos, licencias	6	6
Total	9,152	9,230

Fuente: La autora (2018)

Se obtuvo valores de producción muy cercanos, sin embargo, se observa que la producción unitaria del pegante con lodos es ligeramente más costosa que la producción del pegante tradicional. El principal gasto es la materia prima, que para E2 es más bajo debido a la sustitución de la marmolina por lodos, no obstante, dado que el tamaño de producción de E2 al inicio es más bajo, la amortiguación de todos los demás costos no tiene tanto efecto, en especial en los gastos de maquinaria, que resultan siendo más de \$200 más caros que para E1.

6.4.2 Evaluación financiera.

Pegante tradicional (E1)

La estimación del flujo de caja se realizó desglosando los valores correspondientes a inversiones, costo de operación e ingresos. Se tuvo como base precios constantes para posteriormente proyectar a 10 años (horizonte del proyecto) y luego traer a valores presentes.

Con respecto a las inversiones diferidas se tuvo en cuenta que para la instalación de los equipos se requiere contratar personal para ello, por lo tanto, se destinó el 5% del valor total de los equipos para tal fin. De igual forma se requiere la capacitación del personal para el manejo de toda la maquinaria, por lo que se asignó una partida de \$2,000,000 inicialmente. En cuanto al capital de trabajo, dado que actualmente la planta está operando y cuenta con

materia prima para la producción de estos materiales de construcción, no se tuvo en cuenta inventarios, ni personal para tener en stock.

Para los gastos indirectos, se determinó que el ítem de servicios básicos es en donde se consideran el consumo de energía (calculado a partir de los requerimientos de los equipos y para el área administrativa), agua para los baños, servicios de telecomunicaciones y servicio de alcantarillado. En este aspecto, las tarifas de energía, agua y telecomunicaciones fueron establecidas de acuerdo con el consumo promedio mensual actual de \$600,000 de los recibos de servicios públicos.

Para los equipos, actualmente se realizan dos mantenimientos en el año, cada uno tiene un valor de \$300,000 por lo que se presupuesta un valor de \$600,000 anuales. Cabe resaltar que no se tuvieron en cuenta gastos de transporte, puesto que se considera que los precios de las materias primas requeridas incluyen los costos de traslados hasta la planta. De igual manera, los clientes que compran el producto asumen los costos de transporte, razón por la cual tampoco se asumen este valor en los costos de producción del pegante.

Finalmente, teniendo en cuenta el precio por bulto de 25 kg de pegante cerámico que se tiene actualmente en la empresa es de \$15,000 pesos. Para los ingresos se toma el supuesto de que todo el material producido es vendido. En conclusión, el flujo de caja con la inversión, costos de operación e ingresos al horizonte del proyecto se expone en la Tabla 28.

Tabla 29. Flujo neto de caja obtenido para el escenario 1

FLUJO NETO DE CAJA TOTAL E1 (en millones de pesos)											
PERIODO (AÑOS)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Flujo total de costos	61	369	377	385	393	401	410	419	428	438	448
2. Flujo total de ingresos	-	432	445	459	473	487	501	516	532	548	564
3. Flujo neto de caja	(61)	63	69	74	80	85	91	97	103	110	116

Fuente: La autora (2018)

Como criterio de evaluación se empleó el indicador VPN utilizando la misma tasa de descuento del 6% con base al DTF, utilizada en el análisis de costos, se estimaron los VP para egresos (VPE) y para ingresos (VPI), todos en millones de pesos. Adicionalmente, se calculó la relación beneficio costo. Dichos valores se muestran en la Tabla 29.

Tabla 30. Indicadores financieros obtenidos para E1

VPE (6%)	3,025
VPI (6%)	3,597
VPN (6%)	573
B/C	1.19

Fuente: La autora (2018)

Después de realizar la evaluación financiera, se realizó un análisis de sensibilidad. Se consideraron escenarios variando los ingresos por ventas, con el fin de evaluar hasta qué punto los escenarios empiezan a mostrar valores de VPN cercanos o por debajo de cero (0). Se encontró que, si los ingresos por ventas para E1 decrecen en más del 15%, los beneficios son menores que los costos y se generan pérdidas a lo largo del horizonte, lo cual se puede observar en la Tabla 30.

Tabla 31. Análisis de sensibilidad para E1 con decrecimiento de 15% en ventas

VPE (6%)	3,025
VPI (6%)	3,058
VPN (6%)	33
B/C	1.01

Fuente: La autora (2018)

Pegante con lodos (E2)

La evaluación financiera para el escenario 2, en general contempla los mismos criterios que el escenario 1. Sin embargo, tiene 5 diferencias significativas que se describen a continuación:

- Tamaño de producción, inicialmente empieza en un 80% del E1, al tercer año se igualan
- Insumos: El escenario 2 tiene menos gastos en insumos debido a la disminución del uso de agregados (marmolina), siendo reemplazada por el lodo.
- Maquinaria: Se incluyen nuevos equipos para el nuevo proceso productivo.
- Depreciación de equipos, dado que cambia la maquinaria cambian los costos por depreciación.
- Servicios básicos: Aumenta el consumo de energía, se toma un incremento de 1/3 el consumo para la maquinaria del E1.

- Mantenimiento: Aumentan los equipos, por ende, aumentan los costos por mantenimiento, se toma un incremento de 1/3 del valor para E1.

El flujo neto de caja total para el escenario 2 se presenta en la Tabla 31.

Tabla 32. Flujo neto de caja obtenido para E2

FLUJO NETO DE CAJA TOTAL E2 (en millones de pesos)											
PERIODO (AÑOS)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Flujo total de costos	146	351	359	368	375	383	391	399	407	416	425
2. Flujo total de ingresos	-	346	401	459	473	487	501	516	532	548	564
3. Flujo neto de caja	(146)	(6)	41	91	97	104	110	117	124	132	139

Fuente: La autora (2018)

Se puede observar que, al comparar los flujos netos de caja total para ambos escenarios, los ingresos se igualan, dado que se mantiene el mismo precio de venta de \$ 15,000 por bulto de 25 kg. Mientras que los costos para el E2, inicialmente son más altos (costos de inversión fija), debido a los nuevos equipos requeridos en el proceso de secado y preparación de los lodos. Mientras que los gastos de insumos son más bajos, lo que hace que al final del horizonte del proyecto (10 años), se amortigüe mejor el flujo neto de caja para E2.

Al evaluar el VPN en la alternativa de pegante con lodos (E2) en millones de pesos, mostrados en la Tabla 32.

Tabla 33. Indicadores financieros obtenidos para E2

VPE (6%)	2,970
VPI (6%)	3,476
VPN (6%)	506
B/C	1.17

Fuente: La autora (2018)

La Tabla 31 y la Tabla 33 evidencian resultados similares para ambos escenarios. Para ambos casos el VPN es positivo; por tanto, los escenarios generarían ingresos en el horizonte proyectado. Asimismo, ambos casos resultan con una relación B/C mayor a cero (0), lo que quiere decir que los escenarios son recomendables desde el punto de vista financiero. A pesar de que E2 tiene menos egresos debido a menores insumos que E1, también posee menos ingresos debido al tamaño de producción menor, por lo que se obtiene un VPN mayor para E1, lo que significa que generaría mayores ingresos.

Para el caso de E2, se realizó el mismo análisis de sensibilidad de E1 (Tabla 33) encontrando que E2 es ligeramente más sensible que E1 a la disminución de ingresos por ventas, dado que cuando estos ingresos decrecen en más del 14%, los valores de VPN empiezan a dar negativos y la relación B/C empieza a ser menor que 1.

Tabla 34. Análisis de sensibilidad para E2 con decrecimiento de 14% en ventas

VPE (6%)	2,970
VPI (6%)	2,989
VPN (6%)	20
B/C	1.01

Fuente: La autora (2018)

6.4.3 Evaluación económica

Para realizar la evaluación económica de las alternativas, se determinó el precio sombra de algunos recursos en cada alternativa, por lo que se utilizó el listado de Razones de los Precios de Cuenta (RPC) para Colombia que se muestra en la Tabla 34.

Tabla 35. Listado de RPC utilizados en la evaluación económica de alternativas

Recurso	RPC
Mano de Obra	
Obreros Calificados	0.60
Mano de Obra profesional	1.0
Maquinaria	
Maquinaria y equipos industriales	0.77
Otros	
Construcción Industrial	0.79
Piedra caliza	0.87

Fuente: Adaptado de DNP (2015)

Adicionalmente, para realizar la evaluación económica de las alternativas, después de determinar el precio sombra, se identificaron las externalidades positivas y negativas, encontrando principal y significativamente una externalidad positiva para el escenario 2 (reemplazo de lodos por marmolina). En este punto se tuvo en cuenta que la empresa metalmecánica paga \$1,200 pesos por kilogramo de lodos recolectado e incinerado. Las formas de realizar los cálculos se muestran en la Tabla 35.

Tabla 36. Cálculo de externalidades

Externalidades Positivas	
Nombre Externalidad	Fórmula
Disminución de costos por disposición final de lodos	$(\$/\text{kg} \text{ dispuesto}) * (\text{kg de lodo aprovechado})$

Fuente: La autora (2018)

Pegante tradicional (E1)

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, se realizó la evaluación económica del escenario 1; obteniendo el flujo de caja neto como se muestra en la Tabla 36.

Tabla 37. Flujo neto de caja total para la evaluación económica de E1

FLUJO NETO DE CAJA TOTAL E1 (en millones de pesos)											
PERIODO (AÑOS)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Flujo total de costos	48	337	297	304	312	320	328	336	345	354	363
2. Flujo total de ingresos	-	432	445	459	473	487	501	516	532	548	564
3. Flujo neto de caja	(48)	96	149	155	161	167	174	180	187	194	201

Fuente: La autora (2018)

Seguidamente se calcularon los valores de los indicadores económicos para E1, los cuales se exponen en la Tabla 37. Estos valores están discriminados en millones de pesos.

Tabla 38. Indicadores económicos obtenidos en la evaluación económica para E1

VPE (6%)	2,453
VPI (6%)	3,597
VPN (6%)	1,144
B/C	1.47

Fuente: La autora (2018)

Pegante con lodos (E2)

Para la producción del pegante de cerámica con lodos se tiene en cuenta la externalidad positiva, la cual está contemplada en los ingresos. Se obtiene el nuevo flujo neto de caja total para E2 expuesto en la Tabla 38.

Tabla 39. Flujo neto de caja total para la evaluación económica de E2

FLUJO NETO DE CAJA TOTAL E2 (en millones de pesos)											
PERIODO (AÑOS)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Flujo total de costos	113	278	259	289	296	303	311	318	326	334	343
2. Flujo total de ingresos	-	543	561	579	584	588	593	598	603	608	613
3. Flujo neto de caja	(113)	265	302	290	288	285	282	279	276	273	270

Fuente: La autora (2018)

El valor presente neto obtenido para la alternativa de pegante empleando lodos (E2) esta discriminado en millones de pesos y expuesto en la Tabla 39.

Tabla 40. Indicadores económicos obtenidos en la evaluación económica para E2

VPE (6%)	2,335
VPI (6%)	4,295
VPN (6%)	1,961
B/C	1.84

Fuente: La autora (2018)

Para realizar la comparación de ambos escenarios estudiados, se presenta la Tabla 39 con los valores de VPN obtenidos. Se encuentra que para la evaluación financiera E1 fue mejor calificado, mientras que para la evaluación económica E2 es el que obtiene mejores resultados (subrayados en verde). De igual manera, se calculó la diferencia entre los VPN para ambos escenarios (valor absoluto de la resta entre VPN para E1 vs E2).

En este se encuentra que cuando se hace la evaluación económica y se tienen en cuenta los ingresos por la externalidad positiva de reemplazar los lodos (20% de reemplazo) por los materiales tradicionales (marmolinas), se obtiene una diferencia bastante relevante, dado que pasa de 66 millones de pesos en la evaluación financiera a 816 millones de pesos en la evaluación económica.

Tabla 41. Comparación de los resultados obtenidos en los escenarios 1 y 2

Escenarios	VPN Financiero (en millones de pesos)	VPN Económico (en millones de pesos)
Pegan tradicional (E1)	\$ 573	\$ 1,144
Pegante con lodos (E2)	\$ 506	\$ 1,961
Diferencias E1 vs E2	\$ 66	\$ 816
Escenario mejor calificado	E1	E2

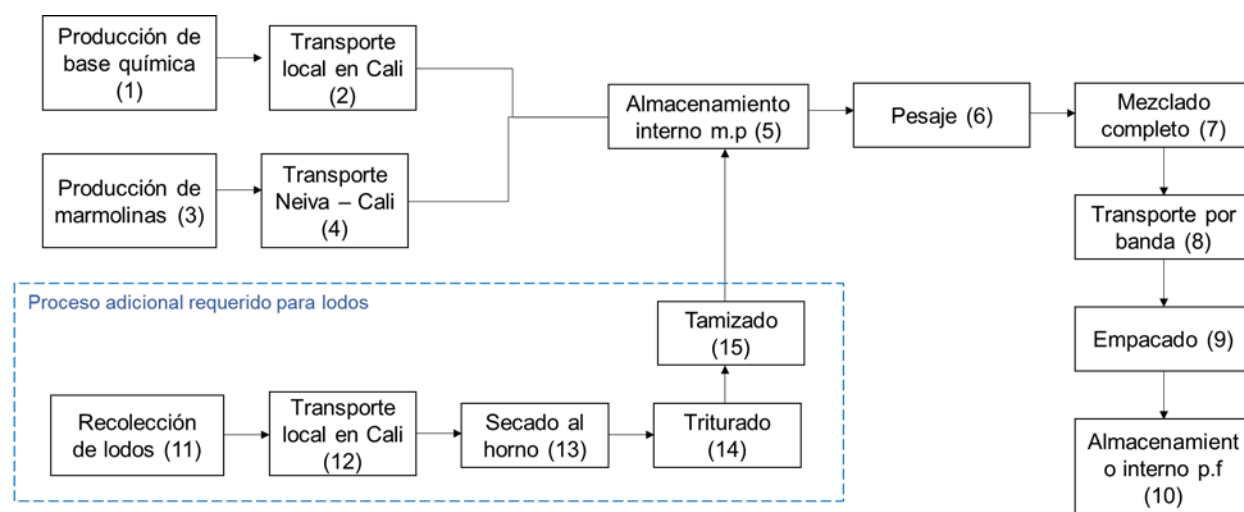
Fuente: La autora (2018)

Para todas las evaluaciones realizadas, las relaciones B/C dieron mayor que 1, por tanto, es mayor el beneficio que los costos, lo que significa que todos los escenarios son recomendables para llevar a cabo.

6.5 EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL IMPACTO AMBIENTAL

El diagrama del proceso productivo que se abordó durante esta evaluación está expuesto en la Figura 14. El proceso aplicado para E1 corresponde a todo el proceso tradicional que tiene las entradas de las materias primas (m.p) tradicionales hasta el almacenamiento interno del producto final (p.f); a diferencia del proceso de E2, el cual requiere un proceso adicional para el acondicionamiento de los lodos (rectángulo azul de la Figura 14).

Figura 14. Diagrama de flujo para el proceso productivo del pegante para baldosas



Fuente: La autora (2018)

A partir de la información obtenida en la empresa MAECOL, se determinó que la producción anual del pegante cerámico tradicional (escenario 1) de 33,049 bultos de 25 kilogramos, y

para el escenario 2 corresponde a una producción anual de 32.175 bultos de 25 kilogramos. Con base en ello se calculó la cantidad de material requerido para satisfacer esta producción expuesto en la Tabla 41.

Tabla 42. Material requerido para la producción anual

Material	Cantidad (T)
Marmolina (E1)	529
Marmolina (E2)	412
Base química	297
Lodo húmedo (20% de humedad)	290
Lodo seco	129
Pegante	103

Fuente: La autora (2018)

Ahora bien, teniendo en cuenta los requerimientos de producción para cada uno de los escenarios. Se calcularon cada una de las potencias de las maquinarias empleadas para ambos escenarios, donde se identificaron las horas de operación efectivas y el consumo de energía en kWh al año como se evidencia en la Tabla 42. De acuerdo con el diagrama del proceso y los requerimientos de maquinarias, se obtuvieron los factores de emisión más adecuados para cada actividad, los cuales se describen en la Tabla 43.

Tabla 43. Requerimientos de maquinaria y equipos para el proceso productivo

Maquinaria	Capacidad de la maquinaria (T/h)	Potencia (kW)	Horas en operación/año E1	Consumo (kWh) en un año E1	Horas en operación/año E2	Consumo (kWh) en un año E2
Horno industrial de secado	1	20,880	NA	NA	129	2687
Molino de martillo	1	7,457	NA	NA	103	768
Zaranda Vibratoria	1	2,610	NA	NA	103	269
Pesa o balanza de piso 300 kg pesaje de materias primas	NA	0,150	1248	187	1248	187
Balanza analítica para dosificación de químicos	NA	0,100	1248	125	1248	125
Mezclador de cintas. Incluye sistema de pesaje de costales	1	17,897	826	14787	804	14396
Tolva y banda transportadora	1	0,373	826	308	804	300
Máquina para empacar - cosedora	1	2,610	826	2156	804	2099
Iluminación (4 bombillas)	NA	0,300	3120	936	3120	936
Ventiladores (3 ventiladores)	NA	0,290	1560	452	1560	452

Fuente: La autora (2018)

Tabla 44. Factores de emisión empleados para el análisis

Actividad	Factor de Emisión	Unidad	Fuente
<i>Producción de base química</i>	0.52	Kg CO ₂ e/T de base química	(DANE, 2016)
<i>Transporte terrestre de carga</i>	0.0782	kg CO ₂ e/T*km	(NREL, 2012)
<i>Producción de marmolinas</i>	0.43971	Toneladas CO ₂ e/T de marmolinas	(IPCC, 2006)
<i>Uso de energía eléctrica</i>	0.153	kg CO ₂ e/kWh	(IEA, 2013)
<i>Incineración de residuos</i>	Se calculó empleando metodología del IPCC, 2006		

Fuente: La autora (2018)

Cabe resaltar que los factores de emisión empleados para esta investigación tienen asociados márgenes de incertidumbre entre 3% al 7% según el IPCC (2006), dado que son porcentajes asociados a la determinación indirecta de este tipo de factores en las actividades anteriormente descritas. De igual manera, las incertidumbres son determinadas a partir de las condiciones típicas de los procesos productivos.

El factor de emisión del proceso de incineración de residuos fue calculado, teniendo en cuenta la siguiente ecuación (IPCC, 2006):

$$Emisiones\ de\ CO_2\ \left(\frac{kg}{año}\right) = \sum_i (DI_i * CCD_i * FCF_i * EF_i * 44/12)$$

Donde:

i = Residuos sólidos urbanos, desechos peligros, desechos clínicos, lodos de aguas residuales, etc

DI_i = Cantidad de desechos del tipo i incinerados (kg/año)

CCD_i = Fracción de contenido de carbono en los desechos del tipo i

FCF_i = Fracción de carbono fósil en los desechos del tipo i

EF_i = Eficiencia de consunción de la combustión en incineradores para los desechos del tipo i (fracción)

44 / 12 = Conversión de C en CO₂

La cantidad de desechos corresponde a la cantidad de lodos dispuestos para este tipo de tratamiento y disposición final, la fracción del contenido de carbono se calculó teniendo en cuenta que este tipo de residuos tiene muy poco contenido de materia orgánica (4%). La fracción de carbono fósil del carbono total y la eficiencia de consunción del incinerador se

calcularon siguiendo los lineamientos del cuadro 5.6 del capítulo de desechos de la guía del IPCC, 2006 que correspondía a 95% para ambos casos. Es así que se obtuvo que el factor de emisión para incineración de lodos de industria metalmecánica correspondía a 1,3237 kg de CO₂ equivalente por un kilogramo de residuo.

En la Tabla 43 se calculan las emisiones de dióxido de carbono correspondientes al escenario 1. A cada uno de los procesos del diagrama de flujo se les asignaron números, los cuales en la table se encuentran relacionados con su respectiva emisión.

Posteriormente, se calculó la emisión de CO₂ asociada al manejo actual de los lodos industriales de la empresa metalmecánica, ya que este debe ser considerado en el E1. Actualmente el lodo es gestionado por una empresa externa, que lo recolecta transporta hasta Bogotá para finalmente ser incinerado en un horno. Finalmente, la emisión total de kg de CO₂ en un año para E1 corresponde a la suma de estos dos procesos, obteniendo un valor total de 423.875 kg CO₂ equivalente anual, o una emisión de 13 kg CO₂ equivalente por la producción de un saco de pegante de 25 kilogramos.

Por otra parte, el escenario 2 considera la incorporación de los lodos en su proceso productivo. Es por ello que requiere un proceso adicional de acondicionamiento de 129 toneladas al año (Humedad del 20%) de lodos procedentes de la industria metalmecánica. Cabe resaltar que la industria 1 seleccionada para el estudio genera 3,6 T/año, lo cual demarca la necesidad de vincular otras empresas en la gestión de estos residuos, con las cuales se pueda garantizar esta demanda productiva y se debe tener en cuenta que cumplan con las características de los lodos para no afectar la calidad del pegante. Por consiguiente, se estima que las otras empresas del sector productivo de metalmecánica vinculadas al inicio del presente proyecto puedan incorporarse.

La emisión total de kg de CO₂ en un año para E2 corresponde solo a las emisiones generadas en el proceso productivo, obteniendo un valor total de 195.168 kg CO₂ equivalente anual, o una emisión de 6 kg CO₂ equivalente por la producción de un saco de pegante de 25 kilogramos, cada uno de los cálculos se encuentran descritos en la Tabla 47.

Tabla 45. Cálculos de emisiones de CO₂ para el proceso productivo de E1

No. del Proceso	Nombre del Proceso	Factor de Emisión	Unidad	Base para el Cálculo	Unidad	Emisión kg CO ₂ e/año
1	Producción de base química	0.52	Kg CO ₂ e/T	297	T	155
2	Transporte local en Cali (factor con toneladas transportadas y los kilómetros)	0.0782	kg CO ₂ e/T*km	2.380	T*km	186
3	Producción de marmolinas (calcita) para E1	0.43971	Toneladas CO ₂ e/T de marmolinas	529	T	232.512
4	Transporte de Neiva - Cali para E1	0.0782	kg CO ₂ e/T*km	165.509	T*km	12.943
5	Almacenamiento interno de materias primas (consumo de energía por un tiempo)	0.153	kg CO ₂ e/kWh	1.388	kWh	212
6	Pesaje (consumo de la pesa de piso)	0.153	kg CO ₂ e/kWh	187	kWh	29
6	Pesaje (consumo de la balanza analítica)	0.153	kg CO ₂ e/kWh	125	kWh	19
7	Mezcla (consumo de la maquina)	0.153	kg CO ₂ e/kWh	14.787	kWh	2.262
8	Transporte por banda (consumo de la maquina)	0.153	kg CO ₂ e/kWh	308	kWh	47
9	Empacado	0.153	kg CO ₂ e/kWh	2.156	kWh	330
10	Almacenamiento interno de materias primas	0.153	kg CO ₂ e/kWh	1.388	kWh	212
					Total	248.907

Fuente: La autora (2018)

Tabla 46. Cálculos de emisiones de CO₂ equivalentes asociados a la gestión y disposición final de los lodos industriales

Nombre de procesos	Factor de emisión	Unidad	Base para el Cálculo	Unidad	Emisión kg CO ₂ e/año
Transporte Cali - Bogotá	0.0782	kg CO ₂ e/T*km	58.945	T*km	4.610
Incineración de lodo industrial	1.3237	kg CO ₂ e/kg	128.702	kg/año	170.358
				Total	174.968

Fuente: La autora (2018)

Tabla 47. Cálculos de emisiones de CO₂ para el proceso productivo de E1

No del Proceso	Nombre del Proceso	Factor de Emisión	Unidad	Base para el Cálculo	Unidad	Emisión kg CO ₂ e/año
1	Producción de base química	0.52	Kg CO ₂ e/T	290	T	151
2	Transporte local en Cali (factor con toneladas transportadas y los kilómetros)	0.0782	kg CO ₂ e/T*km	2.317	T*km	181
3	Producción de marmolinas (calcita) para E2	0.43971	Toneladas CO ₂ e/T de marmolinas	412	T	181.093
4	Transporte de Neiva - Cali para E2	0.0782	kg CO ₂ e/T*km	128.908	T*km	10.081
5	Almacenamiento interno de materias primas (consumo de energía por un tiempo)	0.153	kg CO ₂ e/kWh	1.388	kWh	212
6	Pesaje (consumo de la pesa de piso)	0.153	kg CO ₂ e/kWh	187	kWh	29
6	Pesaje (consumo de la balanza analítica)	0.153	kg CO ₂ e/kWh	125	kWh	19
7	Mezcla (consumo de la maquina)	0.153	kg CO ₂ e/kWh	14.396	kWh	2.203
8	Transporte por banda (consumo de la maquina)	0.153	kg CO ₂ e/kWh	300	kWh	46
9	Empacado	0.153	kg CO ₂ e/kWh	2.099	kWh	321
10	Almacenamiento interno de materias primas	0.153	kg CO ₂ e/kWh	1.388	kWh	212
11 y 12	Recolección de lodos y Transporte local en Cali (factor con toneladas transportadas y los kilómetros)	0.0782	kg CO ₂ e/T*km	644	T*km	50
13	Secado al horno	0.153	kg CO ₂ e/kWh	2.687	kWh	411
14	Triturado	0.153	kg CO ₂ e/kWh	768	kWh	117
15	Tamizado	0.153	kg CO ₂ e/kWh	269	kWh	41
					Total	195.168

Fuente: La autora (2018)

Se encuentra que al comparar las emisiones de cada uno de los escenarios, como se observa en la Tabla 47, el escenario 2 tiene una menor huella de carbono en comparación de las actividades normales. Razón por la cual se identifica un potencial bastante significativo para desarrollar esta clase de estrategias que permitan cerrar ciclos y disminuir los impactos generados al ambiente.

Tabla 48. Emisiones totales para cada uno de los escenarios

Emisiones	Escenario 1	Escenario 2
kg CO ₂ e/año	423.875	195.168
kg CO ₂ e/kg pegante	0.51	0.24
kg CO ₂ e/25 kg pegante	12.83	6.07

Fuente: La autora (2018)

Se identificó que la producción de pegante tradicional tiene mayor impacto ambiental por su mayor aporte a la atmósfera de emisiones de CO₂ equivalente (0.51 kg CO₂ e/kg pegante), mientras que la producción del pegante para pisos empleando lodos tiene una disminución del 53% en emisiones.

Se observó que en E1 los principales procesos que conducen a la alta generación de CO₂ son la producción de marmolinas, transporte de marmolinas y la disposición de los lodos. Mientras que el impacto positivo de aprovechar todos los lodos en la fabricación de pegante para baldosa disminuye a ½ la generación de emisiones de CO₂ equivalente por saco de pegante producido.

La incorporación de materiales reciclados o aprovechados, como en este caso los lodos, se convierte en una estrategia eficiente para disminuir la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera, reduciendo los impactos ambientales que se puede generar por la extracción de agregados y otros procesos propios de la producción de pegante. Esta práctica también fue documentada por Jiménez *et al.* (2018), quienes en la evaluación de la huella de carbono del hormigón con agregados reciclados se encontraron que las emisiones de CO₂ equivalente tienen una leve disminución con respecto al proceso normal.

Al comparar los datos obtenidos con otras investigaciones que han realizado mediciones de huella de carbono en otros materiales de la industria de la construcción empleando la misma metodología consignados en la Tabla 49, se evidencia que los datos obtenidos en la presente investigación se encuentran en una escala similar a los reportados por los demás autores, lo cual permite validar de los resultados obtenidos (Shen *et al.*, 2016; Badilla *et al.*, 2015). De igual manera se evidencia que el pegante de baldosa tradicional generan más emisiones que los demás materiales, así mismo que el pegante de baldosa con lodos

incorporados se encuentra con una emisión de CO₂ equivalente muy similar a la reportada por el cemento portland tradicional (Shen *et al.*, 2016).

Tabla 49. Emisiones de CO₂ equivalente en diversos materiales de la industria de la construcción

Material	Emisiones	Referencia
Pegante de baldosa	0.51 kg CO ₂ e/kg de pegante	La autora
Pegante de baldosa con lodos	0.24 kg CO ₂ e/kg de bloques	La autora
Bloques de concreto	0.16 kg CO ₂ e/kg de bloques	(Badilla <i>et al.</i> , 2015)
Columna prefabricada	0.33 kg CO ₂ e/kg de columnas	(Badilla <i>et al.</i> , 2015)
Cemento reactivo con óxidos de magnesio	0.39 kg CO ₂ e/kg de cemento	(Shen <i>et al.</i> , 2016)
Cemento portland tradicional	0.29 kg CO ₂ e/kg de cemento	(Shen <i>et al.</i> , 2016)

Fuente: La autora (2018)

7 CONCLUSIONES

A partir de la presente investigación se determinó que las aguas residuales industriales tienen gran variedad de componentes y están directamente relacionados con los procesos productivos aplicados y los posteriores tratamientos a las que se sometan estos subproductos líquidos. Se encontró que incluso en aguas residuales del mismo sector productivo presentaban grandes variaciones en los elementos, es por ello que se requiere conocer cada una de las características del proceso industrial.

Los lodos industriales del sector productivo de metalmecánica (empresa 2, 3 y 4), presentaron mayor contenido de sustancias poco reactivas con el cemento como feldspatos y minerales de hierro, por lo cual tenían un potencial significativo para agregarlos al pegante cerámico. Específicamente se encontró que los lodos industriales de la empresa 2 del sector de metalmecánica tienen un potencial para sustituir los agregados del pegante cerámico, ya que se obtuvieron resistencias a la tracción mayores, siendo el mejor comportamiento cuando se reemplaza el 10% de este lodo (0.34 MPa). Cabe resaltar que cuando se utiliza en 20 y 30% disminuye la resistencia, sin embargo, todos los valores son aceptables.

Los lodos municipales de la PTAR-C presentaron un alto contenido de microorganismos, por lo cual se implementaron procesos de acondicionamiento térmicos y álcali que reportaron eficiencias (100%) de remoción significativas. Al analizar su estructura el lodo municipal posee fases arcillosas que dificultaron la acción del cementante, deteriorando las propiedades mecánicas del pegante.

En términos de la cuantificación del impacto ambiental generado por la fabricación del pegante tradicional y el pegante con incorporando lodos en un 20%, se encontró que los principales procesos que conducen a la alta generación de CO₂ son la producción de marmolinas, transporte de marmolinas y la disposición de los lodos. Mientras que el impacto positivo de aprovechar todos los lodos en la fabricación de pegante para baldosa disminuye a ½ la generación de emisiones de CO₂ equivalente por saco de pegante producido.

En la evaluación de los proyectos de los dos escenarios (E1 y E2), se encontró que en términos financieros el proyecto puede ser ligeramente más rentable para la producción de pegante tradicional (VPN 503) frente al pegante con adición de lodos (VPN 506). Sin embargo, al considerar las externalidades y los precios sombras de la evaluación económica se obtiene una diferencia bastante relevante con el E2, dado que pasa de 66 millones de pesos en la evaluación financiera a 816 millones de pesos, convirtiéndolo en una opción rentable para el aprovechamiento de lodos en la producción del pegante cerámico.

Finalmente se encontró que el lodo más adecuado para sustituir un porcentaje de los agregados convencionales del pegante cerámico es el producido por la empresa 2 del sector de metalmecánica, dado que presentó valores aceptables en las resistencias de tiempo de abierto y luego de inmersión al agua. De igual manera, al analizar conjuntamente las evaluaciones ambiental, económica y financiera se evidencia un gran potencial para seguir escalando este tipo de estrategias de cierre de ciclos, que antes no había sido considerada.

8 RECOMENDACIONES

Luego de encontrar resultados prometedores en la identificación del potencial de aprovechamiento para el pegante cerámico es importante tener en cuenta que para continuar con la validación de este material se requiere efectuar pruebas de dosis óptima que permitan encontrar el porcentaje de adición ideal sin afectar las condiciones del producto. Asimismo, es importante realizar otras pruebas que consigna la norma 6050-2 para este adhesivo cementicio C1, como por ejemplo resistencia adhesiva a la tracción luego de ciclos de hielo-deshielo y resistencia adhesiva sin inmersión al agua.

Con el fin de examinar el comportamiento de las sustancias de interés (metales pesados u otros), presentes en el lodo de la industria 1, es muy importante realizar pruebas de la lixiviación del pegante para identificar si con este material se va a generar algún tipo de transferencia de sustancias en la aplicación del pegante.

En las caracterizaciones de los lodos industriales y municipal estudiados se encontraron diferentes compuestos químicos y estructuras que pueden tener potencialidades de incorporación en otra clase de materiales de construcción. Por consiguiente, se recomienda continuar investigando cada uno de estos lodos para cerrar los ciclos en nuevos materiales.

Los lodos de la PTAR-C presentaron un contenido alto de materia orgánica y arcillas, los cuales en esta clase de materiales no es muy recomendable. Razón por la cual es necesario investigar otras clases de métodos para mejorar las condiciones, como la aplicación de métodos térmicos que inhiban o volaticen el contenido de materia orgánica.

De igual manera todas las caracterizaciones realizadas a los lodos, quedan disponibles para continuar con la línea investigativa, ya que son la base primordial para evaluar algún tipo de valorización que se incorporen los lodos.

En términos ambientales para la evaluación del impacto se recomienda realizar un análisis del ciclo de vida completo del pegante cerámico, el cual incluya mediciones de entradas y salidas para tener una cuantificación más cerca de las dinámicas de MAECOL u otra empresa que fabrique este producto.

9 TEMAS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, se evidencia la importancia de continuar con diversas investigaciones en los siguientes temas:

- Evaluación el potencial de cada uno de los lodos para la incorporación en diversos materiales de construcción que se adapten a sus características.
- Estimación de la calidad de los materiales con pruebas piloto.
- Escalamiento de los productos de la investigación a nivel industrial.
- Valoración de la huella de carbono de los diferentes materiales de construcción obtenidos con mediciones en el sitio.

10 REFERENCIAS

- Acevedo, C. (2016). *Informe de revisión bibliográfica sobre el manejo de lodos de sistemas de tratamiento de aguas residuales*. Cali.
- Amin, S., Abdel Hamid, E., El-Sherbiny, S., Sibak, H., & Abadir, M. (2018). The use of sewage sludge in the production of ceramic floor tiles. *Housing and Building National Research Center*, 309-315.
- Araque, M., & Rodríguez, M. (2006). *Evaluación de los tratamientos térmico y alcalino en la desinfección del lodo generado en la PTAR El Salitre*. Bogotá: Universidad de los Andes .
- Asociación Nacional de Fabricantes de Morteros Industriales. (2013). *Adhesivos para la colocación de baldosas cerámicas*. Mayorca: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos.
- Badilla, P., Elizondo, J., Fernández, T., Méndez, J., Mora, F., & Quesada, M. (2015). *Cálculo de huella de carbono para materiales de construcción en Costa Rica*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Banco de la República de Colombia. (2017). *Tasas de captación semanales y mensuales: estadísticas* . Bogotá D.C.
- Cabero, M. (2012). *Caracterización estructural y de transporte de películas ultradelgadas de conductores iónicos*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Carmona, S. (2010). *Morteros especiales*. Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa Maria.
- Caro, D. (2019). Carbon footprint. *Earth Systems and Enviromental Sciences*, 252-257.
- Castañeda, J. (2015). *Evaluación de los métodos de hidrometalurgia, pirometalurgia y estabilización solidificación en el tratamiento de lodos procedentes de plantas de aguas residuales de procesos de cromado*. Bogotá D.C: Universas Nacional de Colombia.
- Chen, P., Zhan, L., & Wilson, W. (2014). Expimental investigation on shear strength and permeability of a deeply dewatered sewage sludge of use in landfill covers. *Environmental Earth Sciences*, 4593-4602.
- Collivignarelli, M., Abba, A., Castagnola, F., & Bertanza, G. (2017). Minimization of municipal sewage slugde by means of a thermophilic membrane bioreactor with intermittent aeration. *Cleaner Production*, 369-376.
- Colotta, G. (2003). Tratamiento físico-químico de aguas residuales de la industria textil. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 73-80.
- Daguer, G. (2003). Gestión de biosolidos en Colombia. Santiago de Cali: ACODAL.

- DANE. (2016). *Guía para la estimación de la cuenta de emisiones al aire por procesos de producción y utilización de materiales*. Bogotá D.C: Dirección técnica de síntesis y cuentas nacionales.
- DNP. (2015). *Manual conceptual de la Metodología General Ajustada (MGA)*. Bogotá D.C: Dirección de Inversiones y Finanzas Públicas.
- Donado, R. (2013). *Plan de gestión para lodos generados en las PTAR-D de los municipios de Cumaral y San Martín de los llanos en el Departamento del Meta*. Bogotá D.C: Pontificia Universidad Javeriana.
- Drechsel, P., Qadir, M., & Wilhelms, D. (2015). *Wastewater: Economic asset in an Urbanizing World*. Dordrecht: Springer.
- El Tiempo . (19 de Julio de 1995). *Periodico El Tiempo*. Obtenido de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-368712>
- EMCALI. (17 de Febrero de 2014). www.emcali.gov.co. Recuperado el 15 de 09 de 2016, de www.emcali.gov.co: http://www.emcali.com.co/informate/-/asset_publisher/6ovX/content/id/597568
- Empresas Municipales de Cali. (22 de Agosto de 2012). *Empresas Municipales de Cali*. Obtenido de <https://www.emcali.com.co/web/guest/nuestra-emcali/calidad/alcantarillado>
- Euroquímica. (2013). *Composición de pinturas*. Recuperado el 25 de 03 de 2016, de <http://ec.europa.eu/environment/waste/index.htm>. Consultado
- Fijalkowski, K., Rorat, A., Grobelak, A., & Kacprzak, M. (2017). The presence of contaminations in sewage sludge- The current. *Environmental Management*, 1126-1136.
- Frías, M., Rodríguez, O., Nebreda, B., García , R., & Villar-Cociña, E. (2010). Influence of activation temperature of kaolinite based clay wastes on pozzolanic activity and kinect parameters. *Advances in Cement Research*, 135-142.
- Frías, M., Sanchez de Rojas, M., Rodriguez, O., García , R., & Vigil , R. (2008). Characterization of calcined paper sludge as an environmentally friendly source of metacaolín for manufacture of cementitious materials. *Advances in Cement Research* , 23-30.
- Garcés, L., Hernández , M., Peñuela , G., Rodríguez, A., & Salazar, J. (2005). Degradación de aguas residuales de la industria textil por medio de fotocátalisis. *Revista Lasallista de Investigación*, 15-18.
- Grobelak, A., Stepien, W., & Kacprzak, M. (2016). Sewage sludge as an ingredient in fertilizers and soil substitutes. *Inzynieria Ekol*, 52-60.
- Hammeken, A., & Romero , E. (2005). *Análisis y diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el municipio de San Andrés Cholula*. Puebla: Universidad de las Américas.

- Hamood, A., Khatib, J., & Williams, C. (2017). The effectiveness of using raw sewage sludge (RSS) as a water replacement in cement mortar mixes containing unprocessed fly ash . *Construction and Building Materials*, 27-34.
- Henze, M., Harremoës, P., Cour-Jansen, J., & Arvin , E. (1997). *Wastewater treatment: Biological and chemical processes*. New York: Springer.
- Hong, J., Hong , J., Otaki, M., & Jolliet, O. (2009). Environmental and economic life cycle assessment for sewage sludge treatment processes in Japan. *Waste Management*, 696-703.
- Hüseyin, A., Cahit, G., Sedat, Ç., & Ayfer, E. (2012). Investigation of using granite sludge as filler in bituminous hot mixtures. *Construction and Building Materials*, 430-436.
- ICA. (2016). *Listado de fertilizantes autorizados*. Bogotá.
- IEA. (2013). *CO2 emissions from fuel combustion*. Paris.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2014). *NTC 6050-1: Baldosas cerámicas. Material para juntas y adhesivos*. Bogotá D.C.
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (2015). *Información técnica del concreto*. Ciudad de México.
- IPCC. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases efecto invernadero*. Ginebra: IPCC.
- Jiang, J., Zhao, Q., Wei, L., Wang , K., & Lee, D. (2011). Degradation and characteristic changes of organic mater in sewage sludge using microbial fuel cell woth ultrasound pretreatment. *Bioresource Tecnology*, 1(102), 272-277.
- Jiménez, L., & Moreno, E. (2015). Durability indicators in high absorption recycled aggregate concrete. *Advances in Materials Science and Engineering* , 1-9.
- Jiménez, L., Domínguez, J., & Vega-Azamar, R. (2018). Carbon footprint of recycled aggregate concrete. *Advances in Civil Engineering*, 1-6.
- Joshi, M., Borse, G., Dhake, A., Bagaw, S., & Shinde, O. (2016). Utilization of sewage sludge in construction material. *Imperial Journal of the interdisciplinary Research*, 277-279.
- Limón, J. (2013). *Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿Problema o recurso?* Guadalajara.
- Lombana, L., & Saavedra, A. (2018). *Obtención de metales a partir de lodos peligrosos de la industria galvánica*. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América.
- López, S., & Cruz, D. (2016). *Beneficio de lodos de plantas de producción de pinturas*. Cali: Universidad del Valle.
- Luz, C., Rocha, J., Cheriaf, M., & Pera, J. (2009). Valorization of galvanic sludge in sulfoaluminate cement. *Construction and Building Materials*, 595-601.

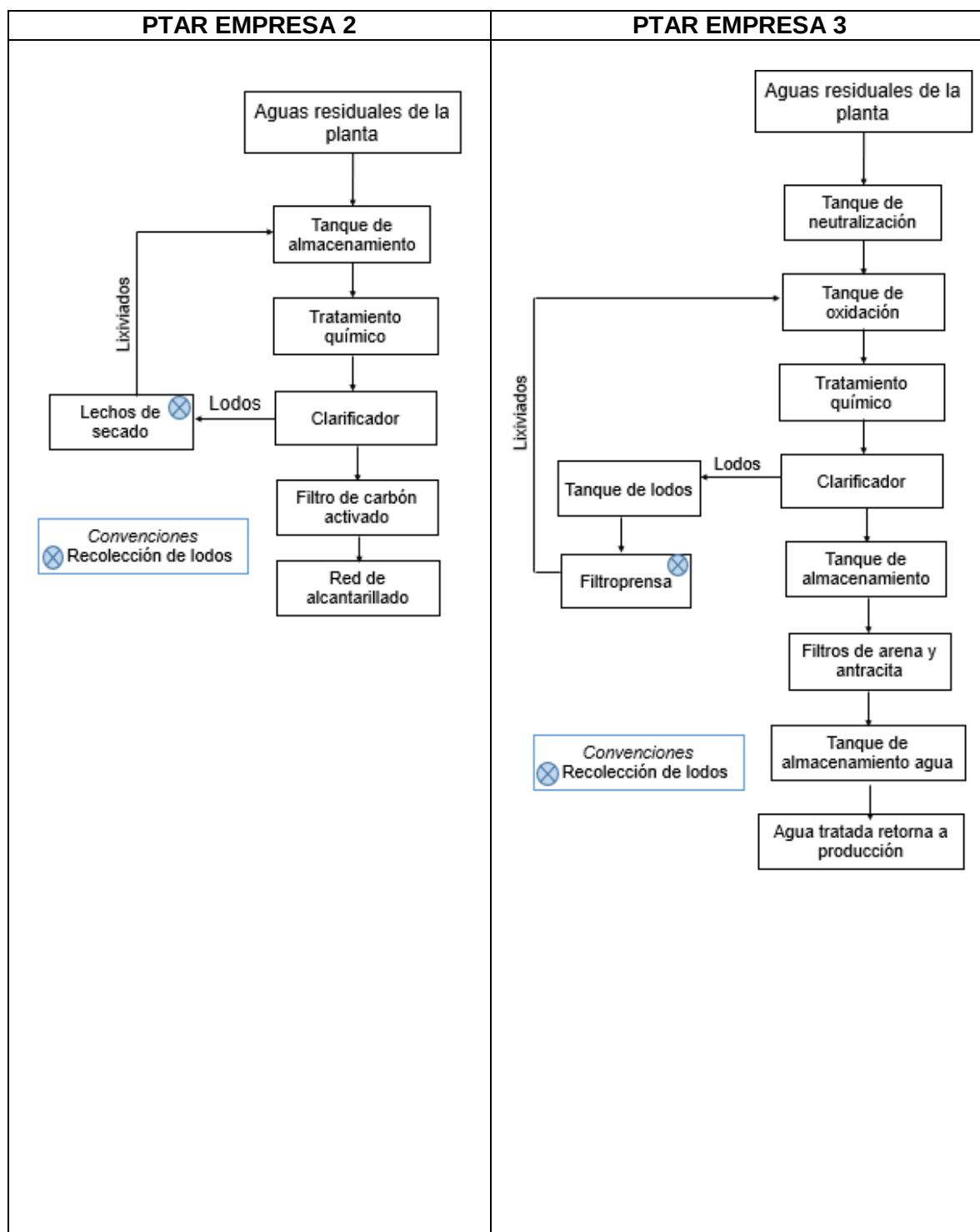
- Lynn, C., & Ghataora, G. (2016). Sewage sludge ash characteristics and potential for use bricks, tiles and glass ceramics. *Water Science & Technology*, 17-29.
- Matthews, S., Hendrickson, C., & Weber, C. (2008). The importance of carbon footprint. *Enviromental Science & Techonology*, 5839-5842.
- Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, G., Burton, F., Stensel, D., & Tsuchihashi, R. (2013). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (Quinta ed.). New York: Mc Graw Hill.
- Metcalf-Eddy. (1977). *Tratamiento y depuración de las aguas residuales*. Barcelona: Labor S.a.
- Miranda, J. (2001). *Gestión de proyectos. identificación, formulación, evaluación financiera, económica, social y ambiental* .
- Mohsen, T., Abderrazek, K., & Mongi Ben, O. (2015). Incorporation of fillers from marble and tile wastes in the composition of self-compacting concretes. *Construction and Building Materials*, 65-70.
- Montgomery, D. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. México D.F: Limusa Wiley.
- Mulrow, J., Machaj, K., Deanes, J., & Derrible, S. (2018). The state of carbon footprint calculators: An evaluation of calculator design and user interaction features. *Sustainable Production and Consumption*, 1-9.
- Naamane, S., Rais, Z., & Taleb, M. (2016). The effectiveness of the incineration of sewage sludge on the evolution of physicochemical and mechanical properties of Portland cement. *Construction and Building Materials*, VI(112), 783-789.
- NREL. (2012). *Life cycle assessment commons*. Washington: University of Washington.
- Ñañez, M., Restrepo, I., & Valencia, V. (2015). *Elaboración del flujo de residuos proveenientes del tratamiento de aguas residuales del sector industrial del municipio de Cali zona urbana y periurbana, zonafranca y municipio de Yumbo*. Cali: Instituto CINARA-Universidad del Valle, BAÑO MOVIL DE COLOMBIA S.A .
- Olkiewicz, M., Fortuny, A., Stuber, F., Fabregat, A., Font, J., & Bengoa, C. (2012). Evaluation of different sludges from WWTP as a potential source for biodiesel production. *Procedia Engineering*(42), 634-643.
- Oropeza, N. (2006). Lodos residuales: Estabilización y manejo. *Caos Conciencia*, V(1), 51-58.
- Paéz, V., & Aguilar, L. (2013). *Proyecto de factibilidad para la exportación de mortero pegante de cerámica a Colombia 2013-2022*. Quito: Universidad Tecnológica Equinoccial.
- Pavlík, Z; Foit, J; Záleská, M; Pavlíková, M; Trník, A; Medved, I; Keppert, M; Koutsoukos, P & Cerny, R. (2016). Energy-efficient thermal treatment of sewage sludge for its application in blended cements. *Cleaner production*(112), 409-419.

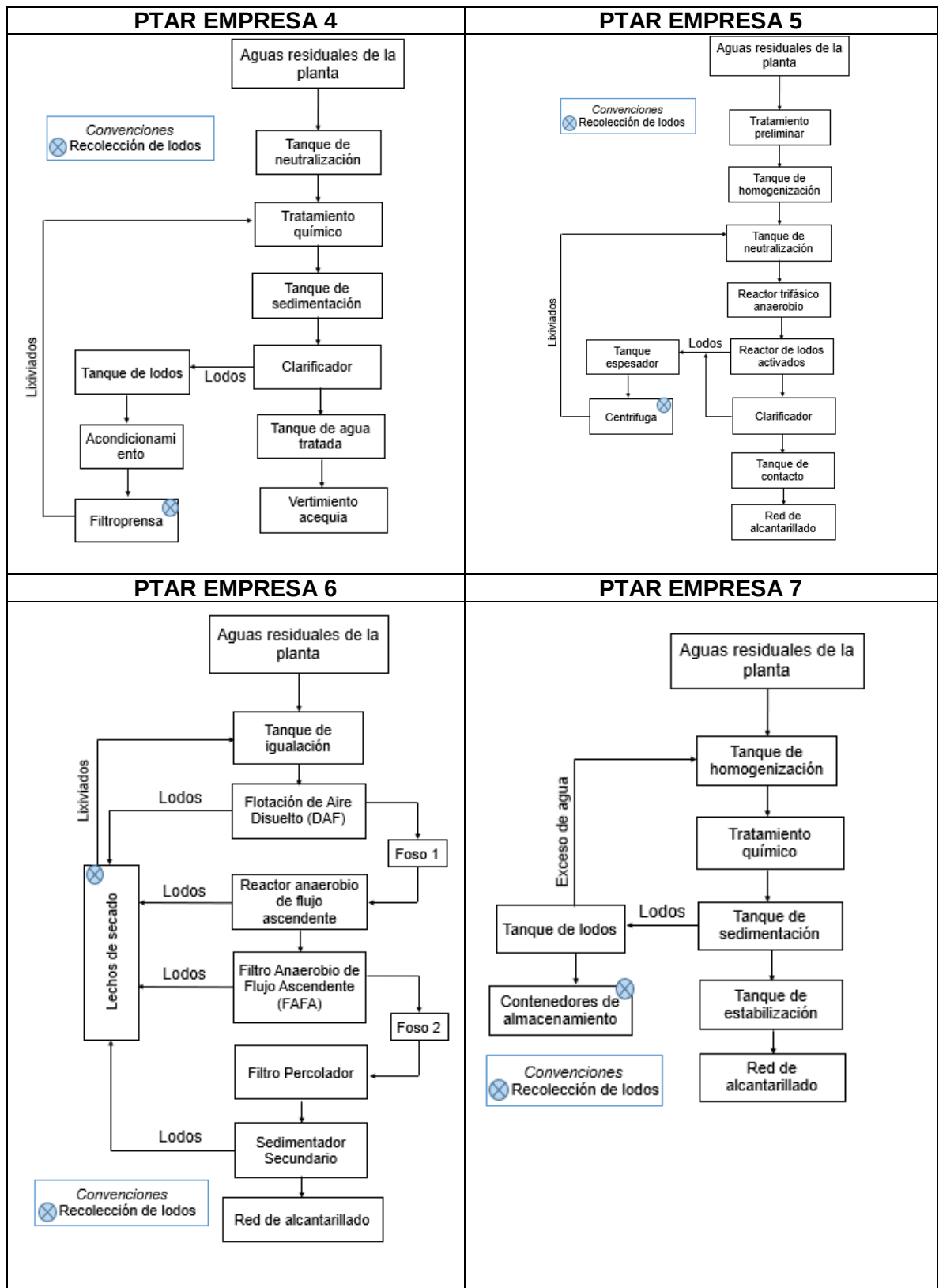
- Pérez-Villarejo, L., Martínez-Martínez, S., Carrasco-Hurtado, B., Eliche-Quesada, D., Ureña-Nieto, C., & Sánchez-Soto, P. (2015). Valorization and inertization of galvanic sludge waste in clay bricks. *Applied Clay Science*, 89-99.
- Quintana, J. M. (2012). *Estudio para la viabilidad tecnica de compostaje a partir de biosólido seco proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR-Cañaveralejo*. Santiago de Cali .
- R Development Core Team. (27 de 09 de 2015). The R Project for Statistical Computing. Obtenido de <https://www.r-project.org/>
- Ramalho, R. (1996). *Tratamiento de aguas residuales* (Segunda ed.). Canada: Reverté.
- Roccaro, P., Franco, A., Contrafatto, L., & Vagliasindi, F. (2015). Use sludge from water and wastewater treatment plants in the production of concrete: an effective end-of-waste alternative. *Proceeding of the 14th International Conference on Environmental Science and Techonology*. Rhodes.
- Rojas, O. (1980). *Aguas residuales industriales*. Cali: Universidad del Valle.
- Romero, J. (2002). *Tratamiento de aguas residuales* (Segunda ed.). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- SAMANCTA. (2015). *Métodos de muestreo para los distintos tipos de muestras*. Bruselas: Comisión Europea .
- Shen, W; Cao, L; Li, Q; Wen, Z; Wang , J; Liu, Y; Dong, R; Tan , Y & Chen , R (2016). Is magnesia cement low carbon? Lyfe cycle carbon footprint comparing with Portland cement. *Cleaner Production*, 20-27.
- Shen, Y., Linville, J., Urgun-Demirtas, M., Mintz , M., & Snyder, S. (2015). An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. *Renewable and sustainable energy reviews*(50), 346-362.
- 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. *Cleaner Production*, 45-54.
- Sroda, K., Kijo-Kleckowska, A., Schab, M., & Pietrasik, M. (2015). *Specificity of the properties of sewage sludge with reference to coal fuels and biomass*.
- Stepanov, S., Morozov, N., Morozova, N., Ayupov, D., Makarov, D., & Baishev, D. (2016). Efficiency of use of galvanic sludge in cement. *Procedia Engineering*, 1112-1117.
- Supino, S., Malandrino, O., Testa, M., & Sica , D. (2016). Sustainability in the EU cement industry: the Italian and German experiences. *Cleaner Production*, 430-442.
- Suthar, S. (2010). Pilot-scale vermireactors for sewage sludge stabilization and metal remediation process: Comparison with small-scale vermireactors. *Ecological engineering*(116), 214-219.

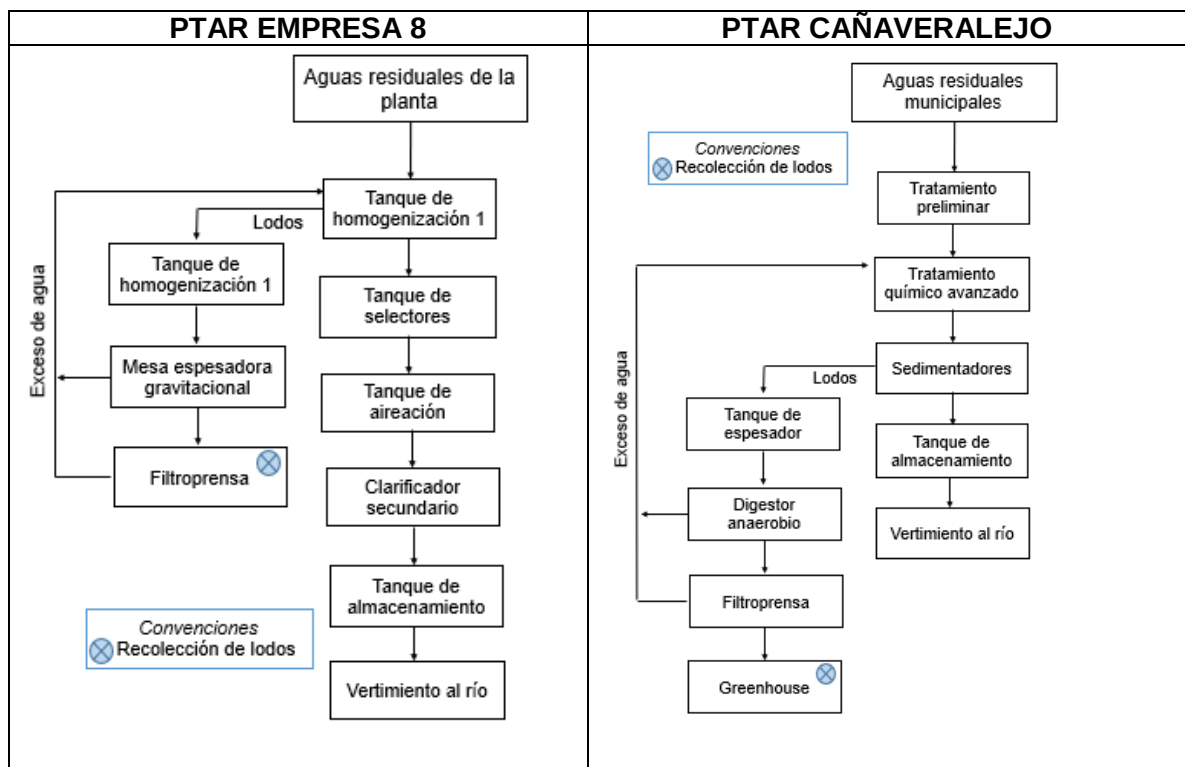
- Swierczek, L., Cieslik, B., & Konieczka, P. (2018). The potencial of raw sewage slugde in construction industry- A review. *Cleaner Production*, 342-356.
- Tanpure, P., Shinde, P., Borade, A., Chate , R., Kalje, C., & Gaikwad, D. (2017). Mamifaturing of bricks from sewage sludge and waste materials. *Imperial Journal of Intesdisciplinary Research*, 1910-1912.
- Taur, S., Sonawane, S., Rahi, D., Singh, N., Sonawane, K., Vichare, V., & Kakani, M. (2018). Experimental evaluation of incorporating dry sludge in cement concrete. *International Journal of Science Technology Management and Research*, 26-30.
- Tezel, U., Tandukar, M., Pavlostathus, S., & Hajaya, M. (2014). Transition of municipal sludge anaerobic digestion from mesophilic to thermophilic and long-term performance evaluation. *Bioresource Technology*(170), 385-394.
- Torres, P; Escobar, J; Perez, A; Imery, R; Nates, P; Sánchez, G; Sánchez, M & Bermúdez, A. (2005). Influencia del material de enmienda enel compostaje de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales PTAR. *Revista de ingeniería e investigación*, 53-61.
- Torres, P., Madera, C., & Martinez, G. (2007). Estabilización alcalina de biosólidos compostados de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas para aprovechamiento agrícola. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 4432-4444.
- Torres, P., Madera, C., & Silva, J. (2009). Mejoramiento de la calidad microbiológica de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista EIA*, 21-37.
- Velasco, F. J., Acuna Polanco , J. J., Urhan Rojas, M., & Moreno Ruiz, F. (2008). Estudio de la co-combustión de lodos de la PTAR cañaveralejo de la ciudad de cali con carbones consumidos en el Valle del Cauca, utilizando diseño experimental al azar. *EIDENAR*.
- Vieira, Y., & Vanderley, J. (2000). *Adhesivos para baldosas cerámicas: Determinación del tiempo abierto por regresión L1*. Castellón: Qualicer 2000.
- Vinay, K., & Shang-Lien, L. (2013). Sludge: A waste or renewwable source for energy and resources recovery? *Renewable and sustainable energy reviews*(25), 708-728.
- Wang, X., Li, M., Liu, J., & Qu, J. (2016). Ocurrence, distribution, and potencial influencing factor of sewage sludge components derived from nine full-scale wastewater treatment plants of Beijing, China. *Enviromental Sciences*, X(106), 1-7.
- Yang, G., Zhang, G., & Wang, H. (2015). Current state of sludge production, management, treatment and disposal in China. *Water Research*, 60-73.

10. ANEXOS

Anexo A. Diagramas de flujo de las PTAR industriales y municipal







Anexo B. Flujo de caja de la evaluación financiera para E1

PRESUPUESTO DE INVERSIONES (en millones de pesos)											
PERIODO (AÑOS)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DEPRECIABLE (equipos, instrumentos, maquinaria)											
Adecuación de la bodega de la planta de producción	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maquinaria e instrumentos	54										
	-										
TOTAL	54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-										
INVERSIONES DIFERIDAS (estudios técnicos, capacitaciones, entrenamientos)	-										
Instalación de equipos, se asigna 5% del precio de equipos	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Capacitación 2 operarios para manejo de maquinaria e instrumentos	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-										
TOTAL	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-										
TOTAL FLUJO DE INVERSIONES	59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

COSTOS DE OPERACIÓN (en millones de pesos)											
PERIODO (AÑOS)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
COSTOS DIRECTOS											
Materia prima (agregados, base química)	-	251	259	267	275	283	291	300	309	318	328
Mano de obra operarios	-	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66
TOTAL	-	317	325	333	341	349	357	366	375	384	394
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OTROS GASTOS INDIRECTOS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Depreciación maquinaria e instrumentos (10 años, 10% anual)	-	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Servicios básicos (requerimientos de energía, agua, alcantarillado, gas)	-	7	7	8	8	8	8	9	9	9	9
Mantenimiento	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Arrendamiento del local	-	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
TOTAL	-	52	52	52	52	52	53	53	53	54	54
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GASTOS ADMINISTRATIVOS Y COMERCIALES	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Costos de transacción (durante la gestión de las licencias)	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL FLUJO DE INVERSIONES	2	369	377	385	393	401	410	419	428	438	448

INGRESOS (en millones de pesos)											
PERIODO (AÑOS)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos por ventas (teniendo en cuenta el valor de venta de cada bulto)	-	432	445	459	473	487	501	516	532	548	564

FLUJO NETO DE CAJA TOTAL (en millones de pesos)											
PERIODO (AÑOS)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Flujo total de costos	61	369	377	385	393	401	410	419	428	438	448
2. Flujo total de ingresos	-	432	445	459	473	487	501	516	532	548	564
3. Flujo neto de caja	(61)	63	69	74	80	85	91	97	103	110	116

En millones de pesos	
VPE (6%)	3,025
VPi (6%)	3,597
VPN (6%)	573
B/C	1.19

Anexo C. Flujo de caja de la evaluación financiera para E2

PRESUPUESTO DE INVERSIONES (en millones de pesos)											
PERIODO (AÑOS)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DEPRECIABLE (equipos, instrumentos, maquinaria)											
Adecuación de la bodega de la planta de producción	5										
Maquinaria e instrumentos	130										
	-										
TOTAL	135	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-										
INVERSIONES DIFERIDAS (estudios técnicos, capacitaciones, entrenamientos)	-										
Instalación de equipos, se asigna 5% del precio de equipos	6										
Capacitación 2 operarios para manejo de maquinaria e instrumentos	3										
	-										
TOTAL	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-										
TOTAL FLUJO DE INVERSIONES	144	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

COSTOS DE OPERACIÓN (en millones de pesos)											
PERIODO (AÑOS)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
COSTOS DIRECTOS											
Materia prima (agregados, base química)	-	226	232	239	247	254	262	269	277	286	294
Mano de obra operarios	-	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66
TOTAL	-	292	298	305	313	320	328	335	343	352	360
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OTROS GASTOS INDIRECTOS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Depreciación maquinaria e instrumentos (10 años, 10% anual)	-	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Servicios básicos (requerimientos de energía, agua, alcantarillado, gas)	-	8	9	10	10	11	11	11	12	12	13
Mantenimiento	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Arrendamiento del local	-	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
TOTAL	-	60	61	62	63	63	63	64	64	64	65
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GASTOS ADMINISTRATIVOS Y COMERCIALES	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Costos de transacción (durante la gestión de las licencias)	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL FLUJO DE INVERSIONES	2	351	359	368	375	383	391	399	407	416	425

INGRESOS (en millones de pesos)											
PERIODO (AÑOS)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos por ventas (teniendo en cuenta el valor de venta de cada bulto)	-	346	401	459	473	487	501	516	532	548	564

FLUJO NETO DE CAJA TOTAL (en millones de pesos)											
PERIODO (AÑOS)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Flujo total de costos	146	351	359	368	375	383	391	399	407	416	425
2. Flujo total de ingresos	-	346	401	459	473	487	501	516	532	548	564
3. Flujo neto de caja	(146)	(6)	41	91	97	104	110	117	124	132	139

En millones de pesos	
VPE (6%)	2,970
VPI (6%)	3,476
VPN (6%)	506
B/C	1.17

Anexo D. Flujo de caja de la evaluación para E1

PRESUPUESTO DE INVERSIONES (en millones de pesos)											
PERIODO (AÑOS)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DEPRECIABLE (equipos, instrumentos, maquinaria)											
Adecuación de la bodega de la planta de producción (RPC 0.79)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maquinaria e instrumentos (RPC 0.77)	42										
	-										
TOTAL	42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-										
INVERSIONES DIFERIDAS (estudios técnicos, capacitaciones, entrenamientos)	-										
Instalación de equipos, se asigna 5% del precio de equipos	2										
Capacitación 2 operarios para manejo de maquinaria e instrumentos	2										
	-										
TOTAL	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-										
TOTAL FLUJO DE INVERSIONES	46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

COSTOS DE OPERACIÓN (en millones de pesos)											
PERIODO (AÑOS)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
COSTOS DIRECTOS											
Materia prima - marmolina (piedra caliza) (RPC 0.87)	-	112	116	119	123	126	130	134	138	142	147
Materia prima - otros	-	122	126	130	134	138	142	146	150	155	160
Obrero calificado (RPC 0.60)	-	22	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Mano de obra profesional (RPC 1.00)	-	30	3	3	3	3	3	3	3	3	3
TOTAL	-	286	246	253	261	268	276	284	293	302	310
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OTROS GASTOS INDIRECTOS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Depreciación maquinaria e instrumentos (10 años, 10% anual)	-	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Servicios básicos (requerimientos de energía, agua, alcantarillado, gas)	-	7	7	8	8	8	8	9	9	9	9
Mantenimiento	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Arrendamiento del local	-	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
TOTAL	-	50	51	51	51	51	51	52	52	52	53
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GASTOS ADMINISTRATIVOS Y COMERCIALES	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Costos de transacción (durante la gestión de las licencias)	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL FLUJO DE INVERSIONES	2	337	297	304	312	320	328	336	345	354	363

INGRESOS (en millones de pesos)											
PERIODO (AÑOS)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos por ventas (teniendo en cuenta el valor de venta de cada bulto)	-	432	445	459	473	487	501	516	532	548	564

FLUJO NETO DE CAJA TOTAL (en millones de pesos)											
PERIODO (AÑOS)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Flujo total de costos	48	337	297	304	312	320	328	336	345	354	363
2. Flujo total de ingresos	-	432	445	459	473	487	501	516	532	548	564
3. Flujo neto de caja	(48)	96	149	155	161	167	174	180	187	194	201

En millones de pesos	
VPE (6%)	2,453
VPI (6%)	3,597
VPN (6%)	1,144
B/C	1.47

Anexo E. Flujo de caja de la evaluación económica para E2

PRESUPUESTO DE INVERSIONES (en millones de pesos)											
PERIODO (AÑOS)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DEPRECIABLE (equipos, instrumentos, maquinaria)											
Adecuación de la bodega de la planta de producción (RPC 0.79)	4										
Maquinaria e instrumentos (RPC 0.77)	100										
	-										
TOTAL	104	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-										
INVERSIONES DIFERIDAS (estudios técnicos, capacitaciones, entrenamientos)	-										
Instalación de equipos, se asigna 5% del precio de equipos	5										
Capacitación 2 operarios para manejo de maquinaria e instrumentos	3										
	-										
TOTAL	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-										
TOTAL FLUJO DE INVERSIONES	111	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

COSTOS DE OPERACIÓN (en millones de pesos)											
PERIODO (AÑOS)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
COSTOS DIRECTOS											
Materia prima - marmolina (piedra caliza) (RPC 0.87)	-	72	83	95	98	101	104	107	111	114	117
Materia prima - otros	-	98	113	130	134	138	142	146	150	155	160
Obrero calificado (RPC 0.60)	-	22	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Mano de obra profesional (RPC 1.00)	-	30	3	3	3	3	3	3	3	3	3
TOTAL	-	221	201	229	236	243	250	258	265	273	281
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OTROS GASTOS INDIRECTOS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Depreciación maquinaria e instrumentos (10 años, 10% anual)	-	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Servicios básicos (requerimientos de energía, agua, alcantarillado, gas)	-	8	9	10	10	11	11	11	12	12	13
Mantenimiento	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Arrendamiento del local	-	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
TOTAL	-	57	58	59	60	60	60	61	61	61	62
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GASTOS ADMINISTRATIVOS Y COMERCIALES	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Costos de transacción (durante la gestión de las licencias)	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL FLUJO DE INVERSIONES	2	278	259	289	296	303	311	318	326	334	343

INGRESOS (en millones de pesos)											
PERIODO (AÑOS)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos por ventas (teniendo en cuenta el valor de venta de cada bulto)	-	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432
Externalidad disminución costos x DF lodos	-	111	128	147	151	156	160	165	170	175	181

FLUJO NETO DE CAJA TOTAL (en millones de pesos)											
PERIODO (AÑOS)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Flujo total de costos	113	278	259	289	296	303	311	318	326	334	343
2. Flujo total de ingresos	-	543	561	579	584	588	593	598	603	608	613
3. Flujo neto de caja	(113)	265	302	290	288	285	282	279	276	273	270

En millones de pesos	
VPE (6%)	2,335
VPI (6%)	4,295
VPN (6%)	1,961
B/C	1.84