

PROPUESTA TÉCNICA FINAL: RETO DE INNOVACIÓN ABIERTA EPM

TÍTULO DEL PROYECTO: ECO-LODOS: Valorización de residuos bajo principios de economía circular y química verde para fabricación de mobiliario urbano sostenible.

1. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DETALLADA DE LA SOLUCIÓN

EPM genera aproximadamente 15.000 t/año de lodos deshidratados (2024) provenientes de todas sus plantas de potabilización; estos lodos son considerados como residuo no peligroso (desde el análisis CRETIB), y son materiales con alta humedad y bajo contenido orgánico. La composición de los lodos, en SiO_2 y Al_2O_3 , y la actividad puzolánica reportados en la ficha de caracterización muestra valores relevantes que hacen que estos materiales puedan ser aptos para utilizarse como materiales cementantes suplementarios (SCM, por sus siglas en inglés) o como materiales cementantes activados alcalinamente. Asimismo, la humedad promedio del lodo cercana al 68% representa una oportunidad para disminuir el agua de mezclado.

ECO-LODOS plantea la valorización de lodos deshidratados provenientes de las plantas de potabilización de EPM para su uso como Material Cementante activado alcalinamente para ser utilizado en la preparación de morteros para fabricar piezas prefabricadas para mobiliario urbano (bloques, materas, topes, jardineras) evitando tratamientos térmicos y conformando un sistema cementante híbrido que combina la hidratación convencional del Cemento Portland (OPC) con la activación alcalina de los aluminosilicatos presentes en los lodos. Se pretende entonces desarrollar una tecnología que se configura como un material cementante apoyado en principios de química verde y economía circular.

Nombre de la Tecnología: Sistema Híbrido de Activación Alcalina en Frío con Nucleación Asistida (H-AAN).

Fundamento Científico

1. **Activación Química:** Se utiliza una solución de Silicato de Sodio alcalino para elevar el pH (13-14). Esto provoca la disolución de las fases amorfas y semicristalinas (sílice y alúmina) del lodo, induciendo reactividad puzolánica y favoreciendo la generación de productos tipo gel cementante (C-A-S-H y N-A-S-H); además, se inactiva químicamente la materia orgánica evitando la interferencia en el desempeño mecánico y de durabilidad del material.

El gel N-A-S-H, Silico Aluminato Sódico Hidratado, suele considerarse el principal producto de la activación alcalina de materiales ricos en SiO_2 y Al_2O_3 . Es una estructura de gel amorfo que ejerce una influencia mecánica en los materiales aportando resistencia a compresión y estabilizada a largo plazo, extremadamente resistente a

ataques ácidos y sulfatos, que lo hace muy útil para materiales expuestos a la intemperie. El gel C-A-S-H, Silico Aluminato de Calcio Hidratado, es también uno de los principales productos de la activación alcalina y es una forma de gel semi-cristalino con estructuras laminares, que ejerce su principal influencia en la densificación de la matriz cementante que ayuda a reducir la porosidad capilar de los materiales y desarrollar resistencia a compresión en edades tempranas.

¿Cómo influye esto en las propiedades mecánicas del prototipo?

Propiedad	Influencia del Gel Híbrido (C-A-S-H + N-A-S-H)
Resistencia a Compresión	El gel C-A-S-H da la resistencia inicial (1-7 días), mientras que el N-A-S-H continúa polimerizando a largo plazo (28-90 días), incrementando la resistencia tardía. Es un sistema de "doble endurecimiento".
Porosidad y Permeabilidad	La coexistencia de geles de distinta morfología (laminares 2D + red 3D) reduce la porosidad efectiva. Los geles N-A-S-H precipitan en los poros que el gel C-A-S-H deja vacíos, haciendo el material más impermeable.
Adhesión a Agregados	La alta alcalinidad mejora la zona de transición interfacial (ITZ) entre la pasta y la arena, que suele ser el punto débil del concreto convencional.

Ahora, la propuesta consiste en la mezcla del lodo activado con cemento Portland y agua, buscando lograr una sinergia microestructural por la coexistencia de fases de hidratación del cemento y de la activación alcalina. Los principales productos de la hidratación del cemento, y responsables del desarrollo de resistencia mecánica en este material, son el gel C-S-H (Silicato de Calcio Hidratado): Producto principal de la hidratación del clinker, responsable de las resistencias iniciales y la cohesión de la matriz; y la Etringita Primaria (AFt): Formada por la reacción de los aluminatos con el yeso del cemento. Su estructura cristalina acicular (en forma de agujas) actúa como un entramado microscópico temprano que densifica la matriz cementante y contribuye al fraguado inicial y la estabilidad dimensional.

Esta coexistencia de geles y cristales como productos de hidratación y activación alcalina generan una matriz ultra-densa: mientras la red de Etringita y C-S-H proveen la resistencia temprana, los geles N-A-S-H y C-A-S-H evolucionan en el tiempo refinando la estructura de poros. El resultado será un material con mayor resistencia mecánica, menor permeabilidad y mayor resistencia al ataque de agentes químicos.

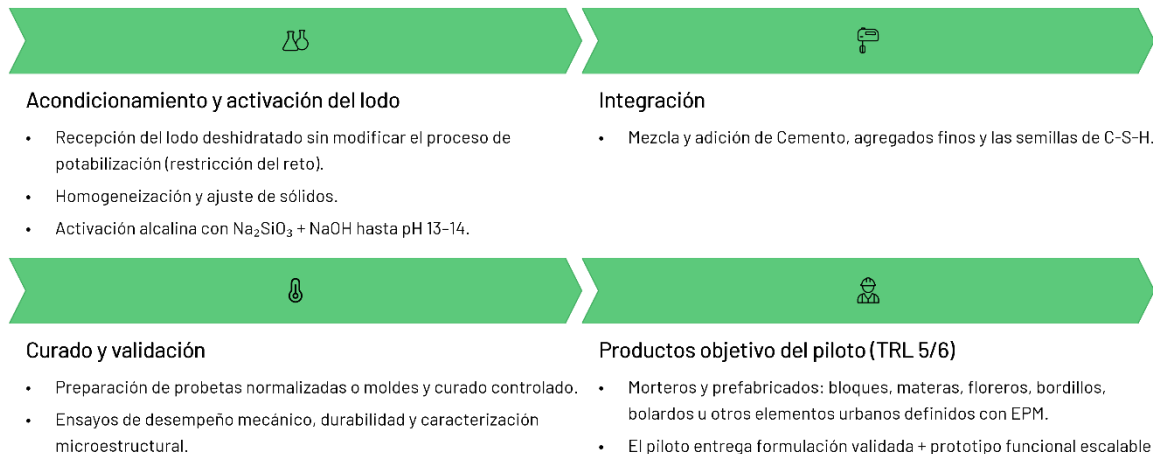
2. **Nucleación (Nanotecnología):** Se incorporan semillas de Silicato de Calcio Hidratado (C-S-H) sintético. Estas nanopartículas actúan como puntos de crecimiento para los productos de hidratación del cemento, acelerando la cinética de reacción y

compensando las posibles pérdidas de resistencia asociadas a los sistemas con altos reemplazos de cemento con otros materiales (ceniza volante, escoria de altos hornos, residuos de demolición y construcción, residuos de minería y suelos).

La adición de semillas de C-S-H sintético a la mezcla de lodo activado y cemento genera un efecto de nucleación heterogénea que acelera significativamente la hidratación, al eliminar el periodo de latencia típico y permitir el crecimiento inmediato de geles C-S-H y C-A-S-H sobre sus superficies. Estas semillas también mitigan el efecto inhibitor de la materia orgánica presente en el lodo, que normalmente bloquea la hidratación del cemento, al ofrecer una superficie reactiva alternativa y extensa en el medio líquido. Además, favorecen una densificación sinérgica al promover el crecimiento de productos como etringita y C-S-H en los espacios porosos, lo que resulta en una estructura más cohesionada y una mejora sustancial de la resistencia mecánica en etapas tempranas. En resumen, la siembra de C-S-H actúa como un catalizador que asegura la viabilidad técnica del uso de lodos sin calcinar, permitiendo obtener un material de alto desempeño.

Flujo técnico del proceso de valorización

Transformación de lodos residuales en materiales de construcción mediante cuatro etapas optimizadas



2. PLAN DE EJECUCIÓN DEL PILOTO (CRONOGRAMA Y FASES)

Objetivo del Piloto: Alcanzar un TRL 6 (Prototipo validado en entorno relevante).

Fase	Mes	Actividades Clave	Entregables	Responsable
I. Diagnóstico y diseño	1	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reunión de arranque con EPM para confirmar: plantas fuente, cantidades, logística de suministro, condiciones de almacenamiento, requerimientos normativos. 2. Revisión detallada de fichas de caracterización entregadas por EPM y definición de criterios de aceptación del lodo. 3. Selección del lodo de trabajo. 4. Diseño de mezclas, definición de: <ul style="list-style-type: none"> ○ Relación lodo/activador (Ld/Ss) ○ %Reemplazo de cemento ○ %Adición C-S-H 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Acta de inicio ▪ Informe de avance #1 (Selección de lodo y mezclas) ▪ Plan logístico de suministro 	Líder Técnico (Spin) Profesional enlace EPM
II. Validación de Laboratorio	1-3	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Preparación de lodo activado. ▪ Preparación y vaciado del mortero. ▪ Ensayos de caracterización de materiales (Análisis DRX/TGA para verificar formación de geles) ▪ Ensayos de desempeño mecánico (Resistencia a compresión, 1, 3, 7 y 28 días de curado y módulo de rotura) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Informe de avance #2 (Protocolo de activación y mezcla. Reporte de desempeño mecánico y microestructural). ▪ Ficha técnica preliminar de la mezcla óptima. 	Líder Técnico (Spin) Inv. Junior (Spin)
III. Escalamiento y Prototipado	3-4	<ul style="list-style-type: none"> • Escalamiento de la mezcla seleccionada. • Diseño/fabricación de moldes. • Fabricación del prototipo 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Informe de avance #3 (Prototipo funcional, manual de producción piloto). 	Líder Técnico (Spin) Inv. Junior (Spin)

Fase	Mes	Actividades Clave	Entregables	Responsable
IV. Evaluación y Cierre	5	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Análisis de ciclo de vida simplificado (comparado con referencia OPC). ▪ Estimación de costos de escalamiento (Análisis de costos finales vs. Convencional) ▪ Presentación ejecutiva del prototipo ▪ Reunión de cierre con EPM. 	<p>Informe Final de Proyecto.</p> <p>Entrega de prototipo</p>	<p>Líder Técnico (Spin)</p> <p>Inv. Junior (Spin)</p> <p>Profesional enlace EPM</p>

De manera transversal y paralela a la ejecución del proyecto, se propone realizar un estudio de factibilidad económica inicial que permita, por un lado, evaluar la viabilidad de escalar el prototipo a nivel piloto o semiindustrial; y por otro, explorar la creación de una nueva línea de negocio orientada al desarrollo de mobiliario urbano sostenible, con potencial de impacto en el sector de la construcción.

3. PRESUPUESTO DETALLADO Y JUSTIFICACIÓN

Concepto	Descripción	Justificación	Valor (\$)	IVA (\$)	Total (\$)
Costos directos			\$ 80.672.269	\$ 15.327.731	\$ 96.000.000
Talento humano	Ingeniero de Materiales (Líder) - Dedicación parcial. Ingeniero Químico (Inv. Junior) - Dedicación mayoritaria. Técnico de Aplicaciones.	Se requiere de estos profesionales para la ejecución del proyecto	\$ 21.848.739	4151261	\$ 26.000.000
Servicios tecnológicos y laboratorio	Ensayos de caracterización de materiales Ensayos de desempeño mecánico Ensayos de módulo de rotura	Análisis requeridos para verificar el desempeño mecánico de los materiales y verificar los productos de hidratación obtenidos	\$ 29.411.765	\$ 5.588.235	\$ 35.000.000
Materiales e insumos	Químicos: Silicatos, Silicato de calcio hidratado. Materias primas: Cemento OPC, Agregados, Nitrato de calcio Insumos de laboratorio	Materias primas e insumos requeridos para la elaboración de los morteros	\$ 12.605.042	\$ 2.394.958	\$ 15.000.000
Prototipado y logística	Fabricación de moldes metálicos/polímeros. Transporte de muestras de lodo (Planta EPM -> Lab Silicatos).	Adquisición de moldes para el prototipo. Costos logísticos del transporte de lodos, materias primas, prototipos, etc Alquiler de mezcladora y máquina bloquera	\$ 16.806.723	\$ 3.193.277	\$ 20.000.000
Costos indirectos			\$ 15.126.050	\$ 2.873.950	\$ 18.000.000
Gestión administrativa	Coordinación administrativa, papelería, comunicaciones.		\$ 8.403.361	\$ 1.596.639	\$ 10.000.000
Imprevistos	Fondo de reserva para variaciones en precios de insumos o repetición de ensayos.		\$ 6.722.689	\$ 1.277.311	\$ 8.000.000
Total			\$ 95.798.320	\$ 18.201.681	\$ 114.000.000

4. MATRIZ DE RIESGOS Y MITIGACIÓN

Riesgo Identificado	Tipo	Probabilidad	Impacto	Estrategia de Mitigación
Variabilidad composicional del Lodo	Técnico	Media	Alto	Protocolo de caracterización rápida por lote (humedad y pH) y ajuste dinámico de la dosis de lodo /activador antes de la mezcla.
Pérdida de resistencia por alto reemplazo de OPC	Técnico	Media	Alto	Optimización de % reemplazo + %adición de C-S-H para compensación
Dificultades logísticas (transporte y almacenamiento)	Operativo	Media	Media	Coordinación logística con EPM, embalaje por costales/tolvas, cronograma de suministro por demanda.
Restricciones regulatorias para uso del residuo	Legal	Baja	Alta	Revisión normativa con EPM, asegurar que no se modifica potabilización y que el residuo es no peligroso.
Retrasos en suministro de lodo y materias primas, ensayos tercerizados o fabricación de moldes	Operativo	Media	Alta	Reservas de cupos/tiempos de laboratorio externos. Doble proveedor para ensayos clave.
Variación en costos de materias primas	Financiero	Medio	Medio	Se incluyó rubro de imprevistos para absorber los posibles cambios

5. PROPUESTA DE ESQUEMA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

La propiedad intelectual generada durante el piloto permanecerá en manos Silicatos para la Industria S.A.S; sin embargo, EPM obtendrá una licencia no exclusiva, gratuita y por tiempo indefinido para uso interno de los resultados del piloto.

Si los resultados son exitosos y se desea avanzar hacia la implementación y escalamiento, ambas partes deberán negociar un nuevo acuerdo, que puede incluir:

- Licencia comercial ampliada
- Contratación directa de la solución
- Transferencia tecnológica parcial o total
- Modelo de alianza para co-desarrollo o implementación conjunta

6. EQUIPO DE TRABAJO

Equipo de trabajo	Perfil profesional	Rol
Líder Técnico	MSc. Ingeniería de materiales	Dirección estratégica y diseño experimental. Responsable de la transferencia tecnológica con EPM.
Investigador	Ingeniero químico	Ejecución operativa de ensayos (TGA, preparación de muestras para microcalorimetría, DRX). Análisis de datos y control de calidad de mezclas.
Técnico de aplicaciones	Técnico en construcción	Encargado de la logística de materiales, moldes y fabricación de los prototipos (vaciado, vibrado y curado de piezas).

ENTIDAD PROPONENTE

Razón Social: Silicatos para la Industria S.A.S.

Trayectoria: 55 años de experiencia en el mercado químico industrial colombiano.

Experiencia Relevante y Capacidad Técnica

Silicatos para la Industria S.A.S ha evolucionado de ser un proveedor tradicional a un desarrollador de tecnología aplicada basadas en silicatos o derivados de sílice, contamos con amplia trayectoria en la química de silicatos, garantizando que nuestras formulaciones son estables, seguras y escalables.

Nuestra propuesta se fundamenta no solo en nuestra solidez empresarial, sino en una estrategia de I+D+i validada por alianzas con la academia y otras entidades:

- **Síntesis y aplicación de C-S-H (Proyecto Actual - UNAL):** Actualmente ejecutamos un proyecto en alianza con el Grupo de Cemento y Materiales de Construcción (**CEMATCO – Grupo A1 Minciencias**) de la Universidad Nacional de Colombia, estudiando el impacto de la **siembra de C-S-H** en morteros. Este conocimiento ("Know-How") hace parte de nuestra propuesta tecnológica.
- **Economía Circular (Proyecto Minciencias - UdeA):** Ejecutamos exitosamente una investigación para la producción de silicato de sodio a partir de cenizas de cascarilla de arroz en alianza con el grupo de catalizadores y adsorbentes (**Catalad – Grupo A1 Minciencias** la Universidad de Antioquia, demostrando nuestra capacidad para valorizar residuos industriales.
- **Ingeniería de Materiales:** Ejecutamos un proyecto interno, en alianza con el grupo de catalizadores y adsorbentes (**Catalad – Grupo A1 Minciencias**) de la

Universidad de Antioquia, para la síntesis de Zeolita 4A, Zeolita P y sílice precipitada, como productos de innovación de la compañía.

- **Apuestas Productivas Sostenibles (Proyecto de InnPulsa):** Ejecutamos un proyecto para la recuperación y reuso de las aguas residuales industriales de la Compañía, así apuntar a ser una empresa con cero (0) vertimientos industriales.

7. ANEXOS

Los siguientes documentos dan cuenta de la experiencia de la compañía en la ejecución de proyectos internos y con entidades externas:

Anexo A: Convenio Spin – Unal

Anexo B: Acta de liquidación – Proyecto Minciencias

Anexo C: Informe de visita de cierre - Apuestas productivas sostenibles, Proyecto InnPulsa

Anexo D: Artículo Científico, Líder técnico

Anexo E: Artículo científico, investigador



Jose Daniel Vélez R.
Ingeniero de desarrollo de
nuevos productos



Carlos Andrés Vélez M.
Ingeniero técnico y de innovación