

**FORTISOILD: SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS A TRAVÉS DE
GEOPACKS COMPUESTOS DE CENIZA VOLANTE, CAL Y GEOTEXTILES
APLICADO A LA INFRAESTRUCTURA VIAL EN BOGOTÁ Y CUNDINAMARCA.**

Diego Fernando Castillo Sachica

Eric Mateo Racines Cabuya

Johan Sebastián Triana Paez

Facultad de Arquitectura e Ingeniería

Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca

Proyecto de Grado

Carlos Alberto Corrales Medina

Bogota D.C.

Abril 2025

INDICE

LISTA DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	5
INTRODUCCIÓN	7
1. NOMBRE DEL PRODUCTO O SERVICIO.	8
1.1 Imagen del producto o servicio.....	8
1.2 Composición del producto o servicio.....	8
1.3 Insumos, elementos y componentes del producto o servicio.	8
1.4 Especificaciones técnicas del producto.....	9
1.5. Características físicas, químicas y mecánicas del producto.....	9
1.6. Ventajas comparativas.	10
1.7. Presentación del producto, dimensiones, modalidades, requisitos, periodicidad, características de uso.....	10
1.8 Proceso de Producción del producto.....	10
1.9 Identificación de las actividades necesarias para el diseño, puesta en marcha y producción.	11
2. DURACIÓN DEL CICLO PRODUCTIVO.....	12
2.1. Capacidad instalada.....	13
2.2. Proceso de control de calidad.....	13
2.3. Proceso de seguridad industrial.....	14
2.4. Puesta en marcha, en obra o en el mercado.	14
2.5 Necesidades y requerimientos.....	15
3. MATERIAS PRIMAS E INSUMOS.....	15
3.1. Pruebas y ensayos.	16
Ensayos experimentales preliminares de validación técnica.	16

Pruebas Mecánicas	22
3.2. Tecnología, herramientas, equipos y maquinaria.....	25
3.3. Pruebas piloto, secuencia de uso, planes de manejo.	25
3.4. Sistema de presentación, empaque y embalaje.	25
3.5. Costos.	26
3.6. Precios unitarios. (APU).....	27
3.7. Costos globales de producción.	27
3.8. Valor comercial del producto.	28
4. CONCLUSIONES.....	29
4.1. De la investigación del producto o servicio.....	29
4.2. De la empresa.	30
4.3. Del proyecto financiero.....	30
5. GLOSARIO DE TÉRMINOS Y VOCABULARIO ESPAÑOL E INGLÉS.....	31
5.1. De la investigación del producto o servicio.....	31
5.2. De la empresa	32
5.3. Del proyecto financiero.....	32
6. MARCO TERMINOLÓGICO EN INGLES	33
6.1. De la investigación del producto o servicio.....	33
6.2. De la empresa	34
6.3. Del proyecto financiero.....	34
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proporciones de Mezclas con Cal y Ceniza Volante	17
Figura 2. Mezcla recién hidratada: textura pastosa, cohesiva y manejable	18
Figura 3. Estado de mezcla después de 7 días de fraguado	18
Figura 4. Muestra de mezcla 75%-25% (ceniza seca) en molde de PVC tras 15 días de fraguado.	19
Figura 5. Muestra de mezcla 70%-30% (ceniza húmeda) en molde de PVC tras 15 días de fraguado.....	20
Figura 6. Muestra de mezcla 60%-40% (ceniza húmeda) en molde de PVC tras 15 días de fraguado.....	20
Figura 7. Fraguado del cilindro.....	23
Figura 8. Cilindro Fraguado.....	23
Figura 9. Pruebas del Cilindro	24
Figura 10. Pruebas Mecánicas del Geopack	24

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

PIB: Producto Interno Bruto

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

NSR-10: Norma Sismo Resistente de Colombia 2010

DANE: Departamento Administrativo Nacional de Estadística

IED: Inversión Extranjera Directa

VIS: Vivienda de Interés Social

CAMACOL: Cámara Colombiana de la Construcción

ICONTEC: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación

FINAGRO: Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario

BIM: Building Information Modeling (Modelado de Información de Construcción).

IA: Inteligencia Artificial

VAN: Valor Actual Neto

TIR: Tasa Interna de Retorno

TIO: Tasa de Interés de Oportunidad

CVLAC: Currículum Vitae en Línea del Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología

PROCEMCO: Cámara Colombiana del Cemento y el Concreto

FICEM: Federación Interamericana del Cemento

RESUMÉN

El presente trabajo de investigación desarrolla una solución innovadora para la estabilización de suelos con enfoque sostenible, basada en el aprovechamiento de subproductos industriales como la ceniza volante, la cal y el uso de geotextiles. El sistema propuesto, denominado *Fortisoild*, busca mejorar las condiciones geotécnicas de suelos con baja capacidad portante, comunes en la ciudad de Bogotá y la región de Cundinamarca, mediante la conformación de módulos prefabricados tipo costal que permiten una fácil instalación y mayor eficiencia estructural.

A través de una metodología experimental, se diseñó y evaluó un prototipo en laboratorio que permite comparar el desempeño técnico, económico y ambiental del sistema *Fortisoild* frente a métodos tradicionales de estabilización como los gaviones o los muros de concreto. Se realizaron ensayos mecánicos para validar su resistencia y durabilidad, así como un análisis de mercado que identifica el potencial comercial del producto en proyectos de infraestructura vial y contención.

Los resultados obtenidos evidencian que el sistema *Fortisoild* representa una alternativa viable, económica y ambientalmente responsable, alineada con los principios de economía circular y los Objetivos de Desarrollo Sostenible. El estudio concluye que *Fortisoild* representa una alternativa técnica y ambientalmente sólida para la infraestructura vial de Bogotá y Cundinamarca, con potencial de estabilidad nacional.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo propone una solución alternativa a los problemas de estabilidad de suelos en Bogotá y Cundinamarca, regiones donde las condiciones geotécnicas son especialmente complejas debido a la presencia de suelos arcillosos con alta retención de agua y baja resistencia mecánica. Frente a las limitaciones técnicas y ambientales de los métodos tradicionales de estabilización, se plantea el sistema Fortisoild como una propuesta innovadora y ambientalmente responsable.

Fortisoild se basa en el aprovechamiento de subproductos industriales como la ceniza volante y cal, combinados con geotextiles para mejorar el desempeño mecánico del suelo. Esta combinación de materiales busca no solo optimizar el comportamiento estructural del terreno, sino también reducir el impacto ambiental mediante la reutilización de residuos industriales, en línea con los principios de la economía circular.

Ante esta situación, se plantea la siguiente pregunta: **¿Es posible estabilizar de manera eficiente, técnica y ambientalmente responsable los suelos de baja capacidad portante mediante el uso de ceniza volante, cal y geotextiles?**

Para responder esta interrogante, se diseñó un prototipo a escala de laboratorio y se aplicaron ensayos experimentales que permitieron evaluar la viabilidad técnica del sistema Fortisoild frente a métodos tradicionales como los muros de contención en concreto o los gaviones.

Los resultados obtenidos en este estudio buscan validar el sistema Fortisoild como una alternativa replicable en proyectos de infraestructura vial, especialmente en contextos urbanos con condiciones geotécnicas complejas. Su implementación puede promover prácticas constructivas sostenibles, fortaleciendo la eficiencia estructural y ambiental de las obras civiles en Bogotá y Cundinamarca.

1. Nombre del producto o servicio.

El producto desarrollado se denomina Geopak Fortisoild, una solución innovadora para la estabilización de suelos en obras de infraestructura, basada en el uso de rellenos sostenibles. El nombre combina las palabras “fortaleza” y “soil” (suelo en inglés), reflejando la resistencia estructural que aporta el sistema al terreno intervenido. Esta propuesta técnica busca posicionarse como una alternativa viable, ecológica y rentable frente a los métodos tradicionales como los gaviones, el concreto o el uso intensivo de acero.

1.1 Imagen del producto o servicio.

El producto Fortisoild se presenta en forma de Geopacks, unidades prefabricadas tipo costal elaboradas en geotextil. Cada uno contiene una mezcla técnica de cal viva y ceniza volante, diseñada para actuar como un núcleo estabilizador de taludes o suelos por estabilizar. Visualmente, el producto se asemeja a un bloque rectangular de gran densidad y color negro del mismo color del geotextil, apilable, con costuras reforzadas visibles.

1.2 Composición del producto o servicio.

Fortisoild está compuesto por una mezcla técnica de un subproducto industrial: ceniza volante y cal, en proporciones optimizadas de acuerdo con pruebas preliminares en laboratorio. Esta mezcla se introduce en un envoltorio de geotextil, el cual no solo actúa como contenedor físico, sino también como refuerzo estructural y medio de confinamiento del material estabilizante. La composición está diseñada para garantizar un comportamiento mecánico adecuado frente a esfuerzos de compresión y flexión.

1.3 Insumos, elementos y componentes del producto o servicio.

Los insumos principales del producto incluyen: ceniza volante tipo F, obtenida de plantas termoeléctricas, la cual aporta propiedades puzolánicas; cal, utilizada por su capacidad de

reacción química con suelos arcillosos; y geotextil no tejido, que conforma Geopack y permite un adecuado confinamiento de la mezcla. Otros componentes necesarios para la producción son Nylon de cierre resistente y pallets de madera para transporte y almacenamiento.

1.4 Especificaciones técnicas del producto.

Cada GeoPack de Fortisoild tiene dimensiones estándar de 0.75 metros de largo por 0.50 metros de ancho, sin una altura fija establecida, ya que su espesor depende del grado de llenado y compactación en obra. Se estima que estos costales, una vez llenos, alcanzan un espesor entre 10 y 20 centímetros, lo cual se traduce en un peso aproximado de entre 18 y 25 kilogramos por unidad, dependiendo del contenido de humedad y la densidad de la mezcla. El geotextil utilizado para contener la mezcla debe cumplir con especificaciones mínimas de resistencia a la tracción superiores a 8 kN/m. La mezcla interna responde a proporciones técnicas calibradas como 70/30 de ceniza/cal. Cada lote cuenta con una etiqueta adherida con la ficha técnica, el número de lote, fecha de producción y recomendaciones para su manipulación y almacenamiento.

1.5. Características físicas, químicas y mecánicas del producto.

Desde el punto de vista físico, el producto es un costal ligeramente deformable, de baja permeabilidad, con buena manejabilidad en obra. Químicamente, se caracteriza por su capacidad de activar reacciones puzolánicas entre la cal y la ceniza, generando silicatos y aluminatos que aumentan la resistencia del material. Mecánicamente, el sistema presenta una mejora en la resistencia a la compresión simple, comportamiento plástico controlado y menor susceptibilidad al hinchamiento en suelos arcillosos.

1.6. Ventajas comparativas.

Fortisoild ofrece ventajas técnicas y ambientales frente a alternativas convencionales como los gaviones o rellenos con concreto. Su mayor eficiencia estructural, derivada de la integración del geotextil y la mezcla cementante, le permite funcionar con menor peso propio. Además, su composición sostenible aprovecha residuos industriales, lo que lo convierte en una solución amigable con el medio ambiente. A esto se suma una mayor rapidez de instalación, reducción en costos logísticos y mejor adaptabilidad a condiciones geotécnicas complejas, como taludes inestables.

1.7. Presentación del producto, dimensiones, modalidades, requisitos, periodicidad, características de uso.

Fortisoild se presenta en costales preelaborados tipo costa, de uso directo en obra. Se entrega en pallets con capacidad para 10 a 12 unidades, listos para ser descargados, acomodados y compactados en campo. Su modalidad de uso incluye aplicaciones en muros de contención, subbases de vías, terraplenes y rellenos estabilizadores. No requiere mezclas adicionales ni maquinaria especializada para su instalación. La periodicidad de uso puede ajustarse a proyectos en ejecución faseada, gracias a su facilidad de acopio, transporte e instalación sin afectar la continuidad de obra.

1.8 Proceso de Producción del producto.

El proceso de producción inicia con la recepción de insumos, verificación de calidad de cal y ceniza volante, y pre mezcla en seco en proporciones definidas. Posteriormente se dosifica el contenido de agua para activar la mezcla, la cual es transportada hacia la estación de llenado. El geotextil, previamente cortado, se llena con la mezcla y es cerrado mediante costura

mecánica. Finalmente, cada costal es apilado sobre pallets, pasando por una inspección visual para verificar integridad, sellado y etiquetado antes del despacho.

1.9 Identificación de las actividades necesarias para el diseño, puesta en marcha y producción.

El desarrollo del sistema Fortisoild ha requerido una planificación técnica y operativa estructurada desde las fases iniciales de diseño hasta su implementación productiva. El proceso comenzó con una investigación técnica y bibliográfica exhaustiva, centrada en identificar el comportamiento físico, químico y mecánico de la ceniza volante y la cal viva en mezclas estabilizadoras, así como su compatibilidad con geotextiles y condiciones geotécnicas propias de la región de Bogotá y Cundinamarca.

Con base en estos fundamentos, se avanzó hacia el diseño experimental del prototipo a escala de laboratorio, definiendo proporciones de mezcla y parámetros de dosificación que permitieran una reacción puzolánica efectiva y una adecuada trabajabilidad del material. Esta etapa contempló el análisis de tres proporciones base (70/30, 60/40 y 75/25), incorporando variaciones en el contenido de humedad y observando el comportamiento de las muestras en cuanto a fraguado, cohesión, textura y resistencia preliminar.

Posteriormente, se realizó la selección técnica del tipo de geotextil no tejido, atendiendo a criterios de resistencia a la tracción, facilidad de sellado y compatibilidad con la mezcla. Esto permitió definir también las dimensiones estándar del producto (0.75 m x 0.50 m), garantizando una modulación eficiente en obra, buena manejabilidad y capacidad de apilamiento para almacenamiento y transporte.

Una vez establecidos los insumos, se diseñó el esquema de infraestructura mínima necesaria para la producción, dando paso a la etapa de preparación de planta piloto, que plantea la adquisición de herramientas como recipientes de mezcla, selladoras, costureras industriales,

estibas y elementos de medición. Paralelamente, se plantea la capacitación del personal, instruyendo en protocolos de mezcla, corte y sellado del geotextil, control de calidad y manipulación segura de materiales como la cal.

La puesta en marcha operativa contempla la elaboración de lotes de prueba en condiciones controladas, verificando el comportamiento físico del material en costales cerrados y evaluando aspectos como estabilidad volumétrica, integridad del geotextil, manipulación en obra y trazabilidad mediante rotulado. En esta etapa también se establece documentar los primeros protocolos internos de producción, incluyendo la dosificación de agua, tiempo de reposo de la mezcla, pesos por unidad y secuencia de llenado y cierre.

Finalmente, se consolida el proceso con la estandarización de un flujo de producción semi estructurado, orientado a una capacidad inicial de fabricación de 28.000 unidades anuales. Esta etapa incluyó la implementación de un sistema de control de calidad visual y físico, trazabilidad por lote, definición de fechas de producción y condiciones de almacenamiento. El proceso concluye con la disposición del producto terminado en pallets, listos para entrega al cliente o transporte a obra bajo condiciones técnicas de manejo previamente definidas.

2. Duración del ciclo productivo.

El ciclo productivo de Fortisoild, desde la recepción de materias primas hasta el almacenamiento del producto final, tiene una duración aproximada de 2 días por lote, dependiendo del volumen de producción y las condiciones de curado. En la primera jornada se realiza la recepción, control y preparación de los materiales, seguida por el procesamiento, mezcla, dosificación y conformado de los GeoPack. El segundo día se enfoca en el proceso de curado en condiciones controladas, mientras se destina a la verificación de calidad, embalaje y disposición en estibas. Este ciclo permite una programación de producción semanal eficiente,

adaptable a proyectos con cronogramas exigentes. En promedio, cada lote alcanza una producción de aproximadamente 233 unidades, lo que permite mantener una distribución estable a lo largo del año.

2.1. Capacidad instalada.

La planta piloto de Fortisoild cuenta con una capacidad instalada proyectada para la producción de aproximadamente 28.000 unidades de GeoPack por año, Esta capacidad responde a un esquema de operación semi automatizado que integra estaciones de mezcla, dosificación manual, corte y sellado de geotextil, inspección técnica y logística de almacenamiento.

El diseño modular del sistema permite escalar la producción mediante la incorporación de nuevos equipos y turnos, en caso de consolidarse la demanda comercial. Además, como parte de la planificación operativa, se contempla mantener un inventario al final de cada año equivalente al 12% de las unidades vendidas, con el fin de garantizar la disponibilidad de producto ante eventuales aumentos de demanda o retrasos logísticos. Esta estrategia permite asegurar la continuidad en la atención de proyectos en curso y facilita la planificación de producción para el siguiente periodo anual, sin incurrir en sobrecostos asociados a paradas de planta o rupturas de stock.

2.2. Proceso de control de calidad.

El control de calidad en Fortisoild se realiza en varias etapas clave del proceso. Inicialmente, las materias primas ceniza volante, cal viva y geotextil son sometidas a inspección visual y verificación de parámetros físicos y químicos mínimos. Durante el proceso de mezcla, se controla la dosificación exacta de materiales y la humedad, ajustando las

proporciones si es necesario. Posteriormente, se verifica la calidad del geotextil en cuanto a resistencia, integridad y costuras, y se inspecciona cada costal después del llenado y sellado para garantizar uniformidad de volumen y peso. Finalmente, el producto pasa por una revisión técnica antes de su almacenamiento. En caso de no conformidades, se contempla la devolución, reproceso o descarte de las unidades.

2.3. Proceso de seguridad industrial.

El proceso productivo incorpora protocolos de seguridad industrial enfocados en la manipulación de cal viva, operación de maquinaria y condiciones ergonómicas del personal. Se exige el uso obligatorio de elementos de protección personal (EPP) como guantes, gafas, tapabocas y overoles en zonas de mezcla, así como señalización adecuada en áreas de corte y manipulación de costales. El almacenamiento de cal y ceniza se realiza en espacios ventilados y alejados de humedad, y se capacita al personal sobre manejo de materiales reactivos, primeros auxilios y rutas de evacuación. Además, se lleva registro de condiciones ambientales y controles periódicos para prevenir accidentes laborales y exposición prolongada al polvo fino.

2.4. Puesta en marcha, en obra o en el mercado.

El sistema Fortisoild está diseñado para una implementación directa en obra, sin necesidad de mezclas adicionales o procesos de adaptación. Los GeoPack se transportan en estibas desde la planta hasta el sitio de instalación, donde pueden ser colocados inmediatamente en muros de contención, plataformas o taludes según las especificaciones del proyecto. Su formato modular permite una ejecución por fases, lo cual es ideal para obras urbanas o con cronogramas progresivos. Además, su facilidad de manipulación y apilamiento optimiza la logística en obra, disminuye tiempos de ejecución y mejora la trazabilidad del producto en

campo. La puesta en el mercado contempla entregas directas a contratistas, gobiernos locales y desarrolladores, con servicio técnico de acompañamiento en sitio.

2.5 Necesidades y requerimientos.

La implementación del sistema Fortisoild requiere una bodega industrial de aproximadamente 460 m², con un valor mensual de \$8.000.000 COP, ubicada estratégicamente en Puente Aranda, Bogotá. Los costos preoperativos estimados para los dos primeros meses ascienden a \$65.890.9567 COP, e incluyen arriendo, servicios, vigilancia, nómina, aseo, dotación de EPP, papelería, capacitación y selección de personal.

En cuanto a equipamiento, se necesitan herramientas básicas y maquinaria menor como mezcladoras, balanzas, selladoras, estanterías y mobiliario de oficina. Además, se deben implementar medidas de seguridad industrial, un sistema inicial de control de calidad y herramientas tecnológicas para la gestión administrativa y de producción. En términos legales, se deben cumplir normativas ambientales, de salud ocupacional y de seguridad industrial, además de los registros de comercialización necesarios.

3. Materias primas e insumos.

El sistema Fortisoild se basa en el uso de materias primas de origen industrial y geotécnico, seleccionadas por su comportamiento mecánico, disponibilidad y bajo impacto ambiental. Las principales materias primas son la ceniza volante tipo F, obtenida de plantas termoeléctricas, y la cal viva, que actúa como agente estabilizante. Estos materiales se combinan y se encapsulan en un costal de geotextil no tejido, que actúa como contenedor y refuerzo estructural. Adicionalmente, se utilizan etiquetas, hilos de sellado, agua en proporciones técnicas y pallets de madera para transporte.

3.1. Pruebas y ensayos.

Se realizaron ensayos preliminares de laboratorio para validar la viabilidad técnica de la mezcla. Las pruebas incluyeron observaciones de resistencia a compresión simple, textura plástica, contenido de humedad óptimo y comportamiento en fraguado. Las proporciones analizadas fueron 70/30, 60/40 y 75/25 de ceniza/cal, determinando que la combinación 70/30 ofrecía mejores resultados estructurales sin comprometer la trabajabilidad. Se validó también la resistencia del geotextil al esfuerzo de tracción y la compatibilidad con la mezcla estabilizante.

Ensayos experimentales preliminares de validación técnica.

Como parte del proceso de validación técnica del sistema Fortisoild, se desarrollaron ensayos experimentales preliminares orientados a observar el comportamiento físico de la mezcla base compuesta por ceniza volante y cal, antes de su incorporación en costales de geotextil. Estas pruebas iniciales tuvieron como finalidad comparar distintas proporciones y condiciones de humedad, evaluar su manipulación, observar reacciones físicas básicas y sentar las bases para futuros ensayos más técnicos.

Las mezclas fueron elaboradas utilizando recipientes medidores de 2000 cc, respetando un volumen total de 1500 cc por muestra. Se probaron tres dosificaciones, que a su vez variaron en el estado de humedad de la ceniza:

- Mezcla 01 – 70/30 con ceniza humedecida: 1050 cc de ceniza previamente humedecida + 450 cc de cal. Se observó buena cohesión al mezclar, sin reacción química visible al contacto con agua. Se detectó buena manejabilidad.
- Mezcla 02 – 60/40 con ceniza humedecida: 900 cc de ceniza húmeda + 600 cc de cal. La mezcla fue más compacta y pastosa. Se evidenció un aumento leve de temperatura, lo que indica una mayor activación química por el contenido de cal.

- Mezcla 03 – 75/25 con ceniza seca: 1125 cc de ceniza seca + 375 cc de cal. Esta mezcla presentó una textura más suelta. Al incorporar agua, se observó una leve efervescencia, posiblemente asociada a la mayor reactividad inicial de la cal con ceniza sin prehidratación.

Cada una fue registrada fotográficamente y etiquetada según su dosificación. Estas pruebas permitieron comparar los efectos de la proporción de cal y el contenido de humedad inicial de la ceniza, lo cual será útil al momento de definir condiciones estándar para el proceso de producción.

Figura 1.

Proporciones de Mezclas con Cal y Ceniza Volante



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Registro de fraguado – Mezcla 01 (70% ceniza, 30% cal)

Como parte de la evaluación de la mezcla 01, se elaboró una muestra con adición controlada de agua para observar su comportamiento durante el proceso de fraguado.

Volumen de mezcla: 1500 cc (1050 cc de ceniza + 450 cc de cal)

Agua añadida: 300 cc

Observación textura cohesiva, color gris oscuro homogéneo.

Condiciones de curado: recipiente plástico, temperatura ambiente, lugar seco, sin exposición directa al sol.

Figura 2.

Mezcla recién hidratada: textura pastosa, cohesiva y manejable



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura 3.

Estado de mezcla después de 7 días de fraguado



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Estas observaciones iniciales permiten evidenciar el potencial técnico de la mezcla 70/30 como componente estructural del sistema Fortisoild. La transformación desde una textura pastosa y cohesiva hasta una masa endurecida con buena integridad interna, observada tras siete días de fraguado, sugiere un comportamiento favorable frente al proceso de curado en condiciones ambientales estándar. Aunque se evidenciaron fisuras superficiales, estas no

comprometieron la compacidad del material en su conjunto. Este comportamiento valida la pertinencia de continuar con pruebas complementarias orientadas a evaluar propiedades mecánicas, resistencia y durabilidad, con el fin de determinar su desempeño en condiciones reales de obra y su aplicabilidad como unidad estabilizadora en contextos de infraestructura urbana.

En seguimiento a esta fase de fraguado, se realizó el registro fotográfico de las muestras obtenidas en cada proporción evaluada. A continuación, se presentan las imágenes correspondientes, que permiten evidenciar el estado físico y la apariencia superficial de las unidades moldeadas tras el proceso de hidratación y curado inicial.

Figura 4.

Muestra de mezcla 75%-25% (ceniza seca) en molde de PVC tras 15 días de fraguado.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura 5.

Muestra de mezcla 70%-30% (ceniza húmeda) en molde de PVC tras 15 días de fraguado.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura 6.

Muestra de mezcla 60%-40% (ceniza húmeda) en molde de PVC tras 15 días de fraguado.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Posterior a la preparación inicial de las mezclas de ceniza volante y cal apagada, se procedió a realizar la hidratación controlada de las tres proporciones seleccionadas: 70% ceniza – 30% cal, 60% ceniza – 40% cal, y 75% ceniza – 25% cal, esta última empleando ceniza seca. Para asegurar la homogeneidad del material y facilitar su manipulación, se incorporó agua en

una proporción estimada cercana al 12% del peso seco de la mezcla. La adición de agua permitió generar una masa trabajable adecuada para el moldeo experimental.

La mezcla hidratada de cada proporción fue vertida en moldes cilíndricos elaborados artesanalmente a partir de tubos de PVC de 4 pulgadas de diámetro. Los moldes fueron sellados en la base y colocados sobre superficies firmes para garantizar un fraguado libre de deformaciones externas. Cada muestra fue etiquetada adecuadamente para mantener la trazabilidad del porcentaje de mezcla utilizado. Una vez moldeadas, las muestras se dejaron fraguar en condiciones ambientales naturales, sin aplicación de acelerantes ni control de temperatura, permitiendo así observar un proceso de endurecimiento comparable al que podría ocurrir en condiciones de obra.

El periodo de fraguado fue de 15 días, tiempo durante el cual se observaron cambios en la textura superficial y en el color de las muestras, indicando procesos de reacción entre los componentes. La fase de fraguado ha permitido obtener cilindros preliminares que serán empleados en las siguientes etapas de caracterización mecánica, donde se evaluarán propiedades como resistencia a la compresión, comportamiento estructural y estabilidad volumétrica. Este procedimiento experimental constituye un avance importante dentro de la validación técnica del sistema Fortisoild como material alternativo para la estabilización de suelos.

Con base en los resultados observados durante el proceso de fraguado inicial, se plantea avanzar hacia la realización de pruebas de caracterización mecánica con el fin de evaluar de manera cuantitativa las propiedades físicas y estructurales de las mezclas desarrolladas. Estas pruebas complementarias permitirán determinar parámetros clave como la resistencia a la compresión simple, comportamiento ante cargas puntuales y estabilidad dimensional,

esenciales para validar el desempeño del sistema Fortisoild como solución técnica en proyectos de infraestructura.

La siguiente etapa experimental será fundamental para consolidar la propuesta como una alternativa técnica viable, sostenible y competitiva dentro del mercado de estabilización de suelos.

Pruebas Mecánicas

Para la realización de las pruebas mecánicas de compresión, fue necesario elaborar un cilindro que cumpliera con las dimensiones y especificaciones establecidas por las normas técnicas aplicables. Con este propósito, se utilizó un molde cilíndrico de acero con un diámetro de 6 pulgadas, el cual sirvió como recipiente para verter la mezcla.

Con base en los resultados obtenidos en los ensayos preliminares, se determinó que la dosificación más adecuada para el prototipo final corresponde a una proporción del **60% de ceniza volante, 20% de cal y 20% de agua**, en volumen. Esta combinación demostró un buen equilibrio entre cohesión, manejabilidad y comportamiento durante el fraguado.

Para garantizar la homogeneidad y compactación del material, el cilindro se construyó sobre una superficie nivelada. Durante el llenado del molde, se aplicaron golpeteos y compactaciones manuales en cada capa con el fin de eliminar burbujas de aire y evitar discontinuidades internas. Este procedimiento busco asegurar una adecuada densidad interna y condiciones óptimas para su posterior ensayo de resistencia a la compresión.

Figura 7.
Fraguado del cilindro



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Luego de 15 días de fraguado en condiciones ambientales, el cilindro alcanzó una consistencia adecuada para el ensayo de compresión. La muestra, con un diámetro de 6 pulgadas (15,25 cm) y una altura de 30 cm, presentó una textura homogénea y endurecida, apta para la aplicación de carga según parámetros técnicos.

Figura 8.
Cilindro Fraguado



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Este cilindro fue sometido a pruebas de compresión tras 15 días de fraguado. Al alcanzar una presión de 600 psi, el cilindro se fracturo, lo que indica que el material por sí solo presenta una resistencia limitada para aplicaciones estructurales.

Figura 9.
Pruebas del Cilindro



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Simultáneamente, se preparó una muestra del sistema Fortisoild con la mezcla dentro del geotextil no tejido, la cual, tras pruebas, alcanzó una resistencia de 2600 psi, demostrando la mejora significativa que aporta el geotextil.

Figura 10.
Pruebas Mecánicas del Geopack



Fuente: Elaboración propia, 2025.

3.2. Tecnología, herramientas, equipos y maquinaria.

La planta piloto de Fortisoild opera con un sistema semi automatizado que incluye: mezcladoras industriales, selladoras mecánicas, básculas para dosificación, estaciones de corte de geotextil, mesas de llenado, y herramientas auxiliares para el cierre y rotulado. La maquinaria fue seleccionada por su facilidad de operación, mantenimiento básico y escalabilidad para producción en serie.

3.3. Pruebas piloto, secuencia de uso, planes de manejo.

El sistema fue probado a través de lotes piloto de producción controlada. Cada lote siguió una secuencia definida: verificación de insumos, mezcla seca, adición de agua, dosificación al geotextil, sellado, inspección, curado y almacenamiento. El plan de manejo contempla el cumplimiento de normas de salud ocupacional para el uso de cal, control de polvo, rutas de circulación interna y almacenamiento bajo cubierta en estibas. Estas pruebas permitieron ajustar la compactación, peso final, sellado hermético y rotulado individual de cada unidad.

3.4. Sistema de presentación, empaque y embalaje.

Fortisoild se comercializa en formato de GeoPack tipo bloque, con dimensiones estándar de 0.75 m x 0.50 m, y un peso aproximado entre 18 kg, según el nivel de compactación. Cada unidad está sellada, rotulada y apilada en estibas de 10 a 12 unidades para facilitar el transporte y la instalación en obra. El sistema de empaque garantiza protección contra humedad, identificación por lote, y manejo ergonómico en campo sin requerir equipos especializados.

3.5. Costos.

El análisis integral de los costos asociados al proyecto Fortisoild contempla cuatro categorías principales: costos pre operativos, costos fijos, costos variables y costos financieros, cada una con un papel fundamental en la estructura económica del sistema.

En primer lugar, los costos preoperativos comprenden todas las erogaciones realizadas antes de iniciar la operación comercial. Incluyen la adecuación de la bodega, adquisición de maquinaria menor, dotación de elementos de protección personal (EPP), capacitación inicial, licencias, papelería y gastos administrativos de apertura. Estos costos fueron estimados en aproximadamente \$65.890.567 COP, necesarios para garantizar un inicio estructurado y seguro del proceso productivo.

Por otro lado, los costos fijos anuales ascienden a \$455.515.960 COP y agrupan los gastos que no dependen directamente del volumen de producción. Entre estos se encuentran el arriendo del espacio industrial, la nómina completa del equipo de trabajo (administrativo, técnico y operativo), el servicio de vigilancia, servicios públicos (agua, energía, internet), mantenimiento rutinario de equipos, aseo, y gestión ambiental (PMA). Estos costos garantizan la sostenibilidad operativa continua del proyecto.

En cuanto a los costos variables, estos están directamente relacionados con el volumen de unidades producidas. El costo variable por unidad de GeoPack Fortisoild ha sido calculado en 6.796 COP, teniendo en cuenta los insumos principales ceniza volante, cal, geotextil, agua, cierre, empaques y pérdidas operativas mínimas. Este valor constituye la base del Análisis de Precios Unitarios (APU) y se ajusta anualmente según el crecimiento en compras y producción.

Finalmente, se contemplan los costos financieros, derivados de la estructura de financiación adoptada para la puesta en marcha del proyecto. Estos incluyen la amortización anual del crédito bancario adquirido con el Banco de Bogotá, los intereses generados por el préstamo, los seguros financieros mensuales exigidos por la entidad bancaria, y la depreciación contable de los activos fijos adquiridos calculada en \$23.9722.000 COP anuales bajo el método de línea recta. Estos egresos, si bien no siempre implican salida inmediata de caja, deben ser registrados como cargas que afectan la utilidad neta y la rentabilidad final del proyecto.

3.6. Precios unitarios. (APU)

El Análisis de Precios Unitarios (APU) determinó que el costo total de producción por cada unidad Fortisoild es de \$6.597 COP, sin incluir gastos fijos no financieros. Este valor considera el uso de materiales, herramientas, empaques y pérdidas operativas mínimas. El análisis APU permite proyectar el punto de equilibrio y definir márgenes para establecer precios de mercado.

3.7. Costos globales de producción.

En el primer año, se proyecta una producción de 31.340 unidades, con una venta efectiva de 28.000 unidades y un inventario final del 12%. El costo global de producción del año 1 es de aproximadamente \$868.048.691 COP, considerando compras de materiales, almacenamiento y rotación de inventario. Esta cifra se ajusta anualmente según las proyecciones de crecimiento del 5% en ventas y compras. Durante el primer año de operación de Fortisoild, se ha proyectado una producción total de 31.340 unidades de GeoPack, cifra que permite cubrir la demanda esperada de ventas y constituir un inventario estratégico para garantizar continuidad operativa. De estas unidades, se espera comercializar 28.000 unidades, mientras que el restante 12%, 3.340 unidades, se mantendrá como inventario final, siguiendo

la política establecida por la empresa para atender eventuales aumentos de demanda o retrasos logísticos en la producción.

El costo global de producción para el año 1 asciende a aproximadamente \$455.515.960 COP, cifra que corresponde a la totalidad de las compras de insumos, costos de almacenamiento, etiquetado, empaques y logística interna asociada a la fabricación de las unidades producidas. Este valor no incluye gastos fijos administrativos ni financieros, sino que representa exclusivamente los costos variables directos necesarios para generar y disponer del volumen completo de unidades en planta.

Esta inversión en producción responde a una estrategia técnica que permite al sistema Fortisoild operar con eficiencia, asegurando la disponibilidad constante de producto en obra sin incurrir en demoras por fabricación bajo demanda. A partir del segundo año, los costos globales de producción se ajustan anualmente, teniendo en cuenta un crecimiento proyectado del 5% en ventas, lo que implica también un incremento proporcional en la producción y en la compra de materiales, así como una ligera variación en el volumen del inventario final.

Este enfoque de producción anticipada y almacenamiento planificado garantiza estabilidad operativa, eficiencia en tiempos de entrega y una mejor negociación con proveedores por compras a volumen, fortaleciendo así la sostenibilidad económica del proyecto a mediano y largo plazo.

3.8. Valor comercial del producto.

El valor comercial del GeoPack Fortisoild ha sido definido en \$31.000 COP por unidad, a partir de una estructura de costos cuidadosamente desglosada que incorpora componentes variables, fijos y financieros, así como una utilidad comercial proyectada del 26%.

El punto de partida del análisis es el APU, que representa el costo variable directo de producción por unidad, estimado en \$6.579 COP. A este valor se suman los costos fijos

distribuidos por unidad, los cuales ascienden a \$16.268 COP, calculados a partir de un costo fijo mensual de \$37.959.663 COP, dividido entre el volumen promedio mensual de producción. Además, se incorporan los intereses anuales del préstamo bancario, que representan un costo financiero de \$1.829 COP por unidad, calculado sobre el total de unidades producidas al año.

Con estos tres componentes; costos variables, costos fijos y financieros. El subtotal por unidad asciende a \$24.695 COP. Sobre este subtotal se aplica un margen de utilidad del 26%, lo cual equivale a \$6.307 COP por unidad, generando así un precio final de venta al público de \$31.000 COP.

Esta estrategia de precio busca un equilibrio entre sostenibilidad financiera, competitividad frente al mercado especialmente comparado con alternativas como los aviones tradicionales, y retorno razonable sobre la inversión. A su vez, permite cubrir los gastos operativos, asegurar una reserva para reinversión y posicionar a Fortisoild como una solución rentable y accesible dentro del sector de obras civiles y estabilización de suelos.

4. CONCLUSIONES

4.1. De la investigación del producto o servicio

Fortisoild se presenta como una alternativa técnica, ambiental y económica superior frente a los métodos tradicionales de estabilización de suelos. Su sistema, basado en ceniza volante, cal hidratada y geotextiles, ofrece alta resistencia, rápida ejecución y estabilidad estructural, siendo ideal para estructuras como terraplenes o rellenos.

Además de mejorar el comportamiento mecánico del suelo, reduce la huella de carbono, reutiliza residuos industriales y minimiza el uso de materiales vírgenes, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Frente a soluciones convencionales, Fortisoild disminuye

costos, agiliza los tiempos de obra y se adapta a condiciones geotécnicas exigentes como las de Bogotá. Su modelo escalable y su rentabilidad en menos de un año confirman su viabilidad técnica y financiera.

4.2. De la empresa.

Fortisoild se proyecta como una empresa con alto potencial de consolidación en el sector de la ingeniería civil y ambiental, gracias a su enfoque en el diseño e innovación de soluciones para la estabilización de suelos. A través del desarrollo de los Geopacks, su producto estrella, la empresa ofrece una alternativa técnica y sostenible frente a los métodos tradicionales, destacándose por el uso de materiales reciclados con la ceniza volante, la Cal y el geotextil.

Este enfoque no solo responde a las necesidades de infraestructura vial y contención, sino que también se alinea con las exigencias actuales del mercado en cuanto a sostenibilidad, eficiencia y responsabilidad ambiental. Por su propuesta de valor diferenciada, Fortisoild tiene la capacidad de posicionarse competitivamente en un referente dentro del sector.

4.3. Del proyecto financiero.

El proyecto Fortisoild presenta una estructura financiera robusta, con proyecciones realistas que reflejan su capacidad para generar valor económico de forma sostenible. A través del análisis de indicadores clave como la rentabilidad, el flujo de caja neto positivo, el punto de equilibrio alcanzable en el corto plazo y una relación costo-beneficio favorable, se demuestra que la propuesta no solo es técnicamente viable, sino también financieramente sólida. Las proyecciones a cinco años evidencian un crecimiento progresivo en ventas, estabilidad en los costos operativos y una utilidad neta creciente, lo que permite respaldar decisiones estratégicas de inversión. En conjunto, estos elementos validan que Fortisoild es una

oportunidad confiable y rentable dentro del mercado de soluciones sostenibles para estabilización de suelos.

5. GLOSARIO DE TÉRMINOS Y VOCABULARIO ESPAÑOL E INGLÉS

5.1. De la investigación del producto o servicio

- **Estabilización de suelos:** Proceso mediante el cual se mejoran las propiedades físicas y mecánicas del suelo, aumento su capacidad portante y reduciendo su deformabilidad
- **Geopacks:** Módulos prefabricados tipo costal elaborados con geotextiles, rellenos con materiales estabilizantes como ceniza volante y cal, que permiten reforzar y estabilizar suelos.
- **Ceniza Volante:** Subproducto de la combustión del carbón en centrales térmicas, caracterizado por sus propiedades puzolánicas y cementales, que mejora la cohesión y resistencia del suelo.
- **Cal Viva:** Oxido de calcio (CaO), material con propiedades químicas que permiten la reacción con el agua y con partículas arcillosas del suelo, generando estabilidad y mejorando la resistencia mecánica.
- **Geotextil no tejido:** Material textil permeable que, aplicado en contacto con el suelo, refuerza y mejora su comportamiento estructural y su durabilidad.
- **Prototipo:** Modelo experimental desarrollado a escala de laboratorio o piloto, que permite evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de la solución propuesta.
- **Compactación:** Proceso de reducción de vacíos en un suelo mediante presión mecánica, mejorando su densidad estructural.
- **Fraguado:** Tiempo que requiere una mezcla para endurecer y adquirir resistencia. En este caso, se da por la reacción entre ceniza y cal en presencia de humedad.

5.2. De la empresa

- **Fortisoild S.A.S.:** Sociedad por acciones simplificada creada para desarrollar, producir y comercializar soluciones sostenibles de estabilización de suelos, basadas en el uso de subproductos industrial.
- **Solución Sostenible:** Alternativa técnica que, además de su funcionalidad, minimiza el impacto Ambiental, fomenta el uso responsable de recursos y se Alinea con la economía circular.
- **Sector Productivo:** Conjunto de actividades económicas vinculadas a la construcción e infraestructura, en las cuales se insertan los productos y servicios de Fortisoild.
- **Clientes Potenciales:** Empresas, entidades públicas y privadas, y profesionales del sector de la construcción que demandan soluciones innovadoras y sostenibles para la estabilización de suelos.
- **Economía Circular:** Modelo de gestión productiva adoptado por la empresa, donde los residuos (como la ceniza volante) se reintegran como materia prima útil, reduciendo el impacto ambiental.

5.3. Del proyecto financiero.

- **Costó Fijo:** Gasto que permanece constante independientemente del volumen de producción (ej.: arriendo, nomina, vigilancia).
- **Plan financiero:** Documento que proyecta la inversión, los ingresos y egresos, el punto de equilibrio, la rentabilidad y la viabilidad económica del proyecto empresarial.
- **Punto de equilibrio:** Nivel de ventas o producción en el que los ingresos cubren los costos totales, sin generar pérdidas ni utilidades.
- **VAN (Valor Actual Neto):** Indicador financiero que permite evaluar la rentabilidad de un proyecto descontando los flujos de caja futuros a valor presente.

- **TIR (Tasa Interna de Retorno):** Tasa de descuento que iguala el valor presente de los ingresos y egresos futuros del proyecto, expresando su rentabilidad esperada.
- **Tiempo de recuperación de la inversión:** Periodo necesario para que los flujos de caja generados por el proyecto permitan recuperar la inversión inicial.
- **Liquidez:** Capacidad de la empresa para cubrir sus obligaciones financieras de corto plazo con sus activos disponibles.

6. MARCO TERMINOLÓGICO EN INGLES

6.1. De la investigación del producto o servicio

- **Soil stabilization:** Process through which the physical and mechanical properties of the soil are improved, increasing its bearing capacity and reducing its deformability.
- **Geopacks:** Prefabricated sack-type modules made with geotextiles and filled with stabilizing materials such as fly ash and lime, which reinforce and stabilize soils.
- **Fly ash:** Byproduct of coal combustion in thermal power plants, characterized by its pozzolanic and cementing properties, which improve soil cohesion and strength.
- **Quicklime:** Calcium oxide (CaO), a material with chemical properties that allow it to react with water and clay particles in the soil, generating stability and improving mechanical resistance.
- **Geotextile:** A permeable textile material that, when applied in contact with the soil, reinforces and improves its structural behavior and durability.
- **Prototype:** An experimental model developed at laboratory or pilot scale, allowing the technical, economic, and environmental feasibility of the proposed solution to be evaluated.
- **Compaction:** Process of reducing voids in soil through mechanical pressure, improving its structural density.

- **Setting (or Curing):** Time required for a mixture to harden and gain strength. In this case, it occurs due to the reaction between ash and lime in the presence of moisture

6.2.De la empresa

- **Fortisoild S.A.S.:** Simplified joint-stock company created to develop, produce, and market sustainable soil stabilization solutions based on the use of industrial by-products.
- **Sustainable solution:** Technical alternative that, in addition to its functionality, minimizes environmental impact, promotes the responsible use of resources, and aligns with the circular economy.
- **Productive sector:** Set of economic activities linked to construction and infrastructure, in which Fortisoild's products and services are integrated.
- **Potential customers:** Companies, public and private entities, and construction sector professionals who demand innovative and sustainable solutions for soil stabilization.
- **Circular Economy:** A productive management model adopted by the company, in which waste (such as fly ash) is reintegrated as a useful raw material, reducing environmental impact.

6.3.Del proyecto financiero

- **Fixed Cost:** Expense that remains constant regardless of the production volume (e.g., rent, payroll, security).
- **Financial plan:** Document that projects investment, income and expenses, the break-even point, profitability, and the economic viability of the business project.
- **Break-even point:** Level of sales or production at which revenues cover total costs, without generating profits or losses.

- **NPV (Net Present Value):** Financial indicator used to evaluate a project's profitability by discounting future cash flows to their present value.
- **IRR (Internal Rate of Return):** Discount rate that equates the present value of a project's future cash inflows and outflows, reflecting its expected profitability.
- **Payback period:** Time required for the cash flows generated by the project to recover the initial investment.
- **Liquidity:** The company's ability to cover its short-term financial obligations with available assets.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2022). Participación del sector construcción en el PIB nacional. Solunion. Recuperado de <https://www.solunion.co/blog/6-maneras-en-las-que-influye-el-sector-de-la-construccion-en-la-economia/>

ICONTEC. (s.f.). Certificación Sello Ambiental Colombiano. Recuperado de https://www.icontec.org/eval_conformidad/certificacion-sello-ambiental-colombiano-2/

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente). (2025). Beneficios tributarios para empresas que implementan prácticas sostenibles. Recuperado de <https://www.minambiente.gov.co/conozca-los-beneficios-tributarios-para-empresas-que-ayuden-a-proteger-el-medio-ambiente/>

Oikos. (2022). Sector de la construcción y su impacto en la economía colombiana. Recuperado de <https://www.oikos.com.co/constructora/noticias-constructora/sector-de-constructoras-en-economia-de-colombia>

Álvarez Builes, J. D., & Daza Rojas, R. (2006). Análisis y proposición de una alternativa para medios de pagos electrónicos en Colombia. Repositorio EAFIT. Recuperado de https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/2503/AlvarezBuiles_JuanDavid_2006.pdf?sequence=1

Bravo Palma, M. I. (2024). Análisis estratégico de mercado de medios de pago digital y cómo incide en la nueva estrategia de BCI. Repositorio Universidad de Chile. Recuperado de <https://repositorio.uchile.cl/xmlui/bitstream/handle/2250/200648/Analisis-estrategico-de-mercado-de-medios-de-pago-digital-y-como-incide-en-la-nueva-estrategia-de-BCI.pdf?sequence=1>

Andrés Felipe Gallego. (2025, January 13). *Informe Semanal La construcción en su laberinto*. Investigaciones Económicas Corficolombiana. Retrieved April 16, 2025, from <https://investigaciones.corfi.com/documents/38211/0/250113%20Sectores.pdf/0f1e0d34-c9a2-be16-f2bb-2092f41703c6>

Arcus Global. (2024, Enero 4). *El Ladrillo retoma importancia en la construcción en Colombia*. https://www.arcus-global.com/wp/el-ladrillo-retoma-importancia-en-la-construccion-en-colombia/?utm_source

Argos. (2025). *Tendencias de construcción para 2025*. Cementos Argos Colombia. Retrieved April 17, 2025, from <https://colombia.argos.co/preparado-para-innovar-estas-son-las-tendencias-de-construccion-para-2025/>

BBVA. (2025, March 17). *BBVA Research prevé PIB en Colombia de 2,5% en 2025 y 2,6% en 2026*. BBVA. Retrieved April 11, 2025, from <https://www.bbva.com/es/economia-y-finanzas/bbva-research-preve-un-crecimiento-del-pib-de-colombia-del-25-en-2025-y-29-en-2026/>

Camacol. (2023). *Transformación para construir futuro*. Cámara Colombiana de la Construcción. <https://camacol.co/publicaciones/informes-de-gestion>

El Heraldo. (2021, marzo 14). *Tecnoglass, epicentro de la industria del vidrio en las Américas*. Tecnoglass. <https://www.tecnoglass.com/es/news/tecnoglass-epicentro-de-la-industria-del-vidrio-en-las-americas/>