

1. FICHA GENERAL DEL PROYECTO

Título del proyecto	Síntesis y Evaluación un Aglomerante Reactivo con Pofa y Dopantes para Uso en Concretos Fotoluminiscentes		
Código del proyecto	Sin código		
Fecha de inicio	19/01/2026	Fecha finalización	01/12/2027
Lugar principal de ejecución	Colombia, Cundinamarca, Bogotá D.C.		
Palabras claves	Activadores Metálicos, Dopantes, Fotoluminiscencia, Pofa (Ceniza de Palma), Sostenibilidad		
Convocatoria	2025- Convocatoria Interna para Financiación de Proyectos		
Campus al que pertenece	Universidad de la Salle		
Áreas de conocimiento	Ingeniería y Tecnología - Ingeniería Civil, Ingeniería y Tecnología - Ingeniería Química, Ingeniería y Tecnología - Ingeniería de los Materiales		
Programas académicos participantes			
Unidad(es) académica(s) que avalan			
Grupos de investigación principal	Grupo de Investigación en Infraestructura para el Desarrollo Territorial y la Sostenibilidad, Procesos Agroalimentarios, Biotecnológicos y Químicos		
Grupo(s) de investigación participante(s)			
Semilleros de investigación participantes	Asombro		
Líneas de investigación institucionales	Innovación y Tecnología		
Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles, Objetivo 9: Industria, innovación e infraestructura		
Valor total del proyecto	\$165,000,000.00		
Recursos en especie Unisalle	\$100,000,000.00		
Recursos en efectivo Unisalle	\$50,000,000.00		
Recursos en especie entidades externas	\$15,000,000.00		
Recursos en efectivo entidades externas			

2. INVESTIGADORES/INTEGRANTES PROYECTO

Nombre	Número de documento	Rol en el proyecto	Unidad académica o administrativa	Categoría en el escalafón docente	Fecha inicio	Fecha fin	Horas semanales
Diego Fernando	26651440Y	Coinvestigador Externo			19/01/2026		5

Aponte Hernández		Internacional					
Juan Miguel Gonzalez Martinez	1104009389	Coinvestigador or Universidad de la Salle	Ingeniería Química	Asistente I	19/01/2026		5
María Alejandra Caicedo Londoño	1113036624	Coinvestigador or Universidad de la Salle	Ingeniería Civil	Asistente III	19/01/2026		5
MARTIN RIASCOS ERNESTO	1130664687	Investigador Principal Universidad de la Salle	Ingeniería Civil	Asistente II	19/01/2026		6
Sandra Yanet Velazco Florez	60371136	Coinvestigador or Universidad de la Salle	Ingeniería Civil	Asociado I	19/01/2026		5

3. FINANCIADORES DEL PROYECTO

Nombre entidad	Rol	Tipo de financiación	Dinero	Especie	Total de aportes
Universidad de la Salle - Programa Facultad de Ingeniería	Cofinanciadora	Cofinanciación Interna	\$0	\$100,000,000	\$100,000,000
Universidad de la Salle - Programa Vicerrectoría de Investigación y Transferencia	Ejecutor	Cofinanciación Interna	\$50,000,000	\$0	\$50,000,000
Universitat Politècnica de Catalunya · Barcelonatech (Upc) - Programa Entidad Externa	Aliada	Cofinanciación Externa Internacional	\$0	\$15,000,000	\$15,000,000

Total de aportes:	\$165,000,000.00
--------------------------	-------------------------

4. GRUPOS DE INVESTIGACIÓN INTERNOS

Código	Nombre del grupo	Líder Grupo	Categorización Minciencias
--------	------------------	-------------	----------------------------

COL0030415	Procesos Agroalimentarios, Biotecnológicos y Químicos	Angela Maria Otalvaro Alvarez	CATEGORÌA C
COL0026495	Grupo de Investigación en Infraestructura para el Desarrollo Territorial y la Sostenibilidad	No registra un lider activo	CATEGORÌA B

5. GRUPOS DE INVESTIGACIÓN EXTERNOS

Nombre del grupo	Institución	Líder del grupo	Categorización Minciencias
MATCAR	Universitat Politècnica de Catalunya · Barcelonatech (Upc)	Miró Recasens, José Rodrigo	AVALADO

6. SEMILLEROS DE INVESTIGACIÓN

Código	Nombre semillero	Grupo semillero	Líder del semillero
SI-FI19	Asombro	Grupo de Investigación en Infraestructura para el Desarrollo Territorial y la Sostenibilidad	MARTIN RIASCOS ERNESTO

7. CONTENIDO DEL PROYECTO

Resumen ejecutivo
La seguridad vial y la visibilidad nocturna siguen siendo desafíos relevantes en entornos urbanos y rurales, particularmente en regiones con infraestructura eléctrica limitada. En este contexto, el presente proyecto propone el desarrollo de un aglomerante reactivo a base de ceniza de palma (POFA), dopado con compuestos accesibles como bórax y metales de transición (Zn^{2+}, Cu^{2+}, Ba^{2+}), con el objetivo de producir concretos capaces de emitir luz en la oscuridad sin necesidad de fuentes externas de energía. El enfoque combina la valorización de residuos agroindustriales ricos en sílice amorfa con tecnologías de dopado luminiscente, ofreciendo una alternativa más económica y sostenible frente a materiales comerciales basados en tierras raras. La investigación contempla la síntesis del aglomerante, su caracterización fisicoquímica y su integración en mezclas de mortero, con pruebas de emisión luminosa bajo exposición UV o solar y ensayos mecánicos básicos. Adicionalmente, se incorporará el uso de técnicas de procesamiento de imágenes y modelado predictivo mediante inteligencia artificial para optimizar el desempeño funcional del material. Este proyecto representa una propuesta innovadora con alto potencial de impacto técnico, social y ambiental. Su implementación promueve el aprovechamiento de residuos, la transición hacia materiales inteligentes de bajo impacto, y la mejora de la seguridad urbana y rural mediante soluciones pasivas, escalables y replicables.
Problema de investigación: Contexto y Justificación

En numerosos entornos urbanos y rurales, especialmente en zonas con acceso limitado o nulo a redes de iluminación eléctrica o con deficiencia en la señalización reflectiva, la visibilidad nocturna representa un desafío persistente que incide directamente en la seguridad vial y la movilidad de peatones y vehículos. Las soluciones actualmente disponibles, como pinturas fotoluminiscentes o elementos comerciales basados en tierras raras, presentan limitaciones significativas en cuanto a costos, sostenibilidad y escalabilidad, lo que restringe su adopción masiva en contextos con recursos limitados.

Paralelamente, residuos agroindustriales como la ceniza de palma (POFA), rica en sílice amorfa, continúan siendo subutilizados pese a su potencial como materia prima para materiales cementantes alternativos. Su posible funcionalización mediante dopado con compuestos accesibles (como bórax o metales de transición) abre una vía innovadora para el desarrollo de aglomerantes con propiedades fotoluminiscentes, que podrían integrarse en morteros o concretos sin requerir fuentes externas de energía.

Esta investigación se justifica por la convergencia de tres elementos clave: la sostenibilidad, al valorizar un residuo abundante; la funcionalidad, al proponer un material que emite luz de forma pasiva; y la innovación, al explorar una línea poco abordada con implicaciones en señalización, infraestructura y desarrollo urbano-rural. Asimismo, el proyecto plantea una brecha clara en el conocimiento actual sobre la viabilidad técnico-funcional de aglomerantes luminiscentes basados en residuos, con posibilidades de extenderse hacia estudios más profundos sobre comportamiento óptico, durabilidad y aplicaciones estructurales en entornos reales.

Pregunta de investigación

¿Es posible desarrollar un aglomerante cementante con capacidad fotoluminiscente a partir de ceniza de palma dopada con compuestos activadores, que mantenga propiedades mecánicas aceptables y permita su aplicación en elementos de concreto prefabricado para infraestructura vial segura y sostenible?

Estado del arte

En los últimos años, la aplicación de materiales fotoluminiscentes (PL) ha ganado protagonismo en la infraestructura urbana, especialmente por su capacidad de absorber energía lumínica y reemitirla en la oscuridad. Esta propiedad ha sido utilizada con éxito en elementos como pinturas para señalización vial, pavimentos urbanos y cruces peatonales, mejorando la visibilidad nocturna sin necesidad de energía eléctrica. Estudios como los de Martínez et al. (2023) y Armay et al. (2024) destacan cómo estas aplicaciones permiten un ahorro energético significativo al reducir la dependencia de la iluminación artificial, mientras que Sanguino et al. (2024) reportan mejoras en la movilidad y seguridad en zonas urbanas al utilizar recubrimientos luminiscentes con alúmina estrontia. Además, investigaciones como la de Lu et al. (2024) resaltan el potencial de recubrimientos auto-luminiscentes para resistir condiciones climáticas extremas, ampliando así su aplicabilidad.

Desarrollar materiales que emitan luz sin una fuente externa resulta fundamental en el marco de una infraestructura urbana sostenible. Los materiales PL no solo promueven eficiencia energética, sino que también contribuyen a mitigar el efecto de isla de calor urbano (UHI) y a mejorar la resiliencia de las ciudades frente a apagones. Garshasbi et al. (2021) argumentan que estos materiales pueden reflejar radiación solar, reduciendo el estrés térmico, mientras que Marchini et al. (2025) y Belloni et al. (2023) proponen su integración como estrategia ante el cambio climático, enfatizando su rol en la movilidad urbana y en la disminución de emisiones asociadas al consumo energético. Siddiqui et al. (2025) complementan esta visión al vincular el uso de estos materiales con prácticas constructivas bajas en carbono y más verdes.

En términos de urbanismo sostenible, la integración de materiales fotoluminiscentes permite transformar el espacio público sin incrementar la carga energética. Tal como señalan Martínez et al. (2023), estos materiales pueden emplearse en pavimentos y señalización, iluminando pasivamente sin electricidad y reduciendo así la huella de

carbono. Además, Garshasbi et al. (2021) resaltan su capacidad para mitigar UHI, lo que los convierte en soluciones valiosas para ciudades densamente pobladas. Su aplicación también favorece el diseño urbano resiliente, al proporcionar visibilidad incluso durante emergencias o cortes eléctricos.

Es así como, la seguridad vial y el ahorro energético son dos de los beneficios más tangibles del uso de estos materiales. Sanguino et al. (2024) encontraron que la implementación de recubrimientos fotoluminiscentes en pasos peatonales reduce la velocidad vehicular y aumenta la visibilidad, generando entornos más seguros. A su vez, Martínez et al. (2023) y Garshasbi et al. (2021) demuestran cómo la adopción de pavimentos fotoluminiscentes puede disminuir el uso de luminarias eléctricas, reduciendo costos operativos y consumo energético. Así, estos materiales se perfilan como aliados estratégicos para lograr ciudades más seguras, eficientes y sostenibles.

La fotoluminiscencia es un fenómeno óptico mediante el cual ciertos materiales absorben energía lumínica y la reemiten en la oscuridad. Este proceso puede clasificarse en fluorescencia, donde la emisión de luz cesa casi inmediatamente tras retirar la fuente luminosa, y fosforescencia, que permite una emisión prolongada durante minutos u horas. Los materiales “glow in the dark” que se utilizan en la construcción moderna pertenecen a esta última categoría, y se han desarrollado históricamente a partir de compuestos como el sulfuro de zinc y, más recientemente, alúmina estrontia dopada con europio y disprosio.

Actualmente, estos materiales se encuentran en pinturas fotoluminiscentes, adoquines, bordillos y elementos de señalización vial, especialmente en contextos donde se busca mejorar la seguridad sin consumir energía. Sin embargo, los productos comerciales existentes presentan limitaciones: su alto costo, la baja durabilidad frente a condiciones climáticas extremas, y el uso de compuestos químicos poco sostenibles o incluso tóxicos. Estas restricciones han impulsado la búsqueda de alternativas más económicas y ecológicas para su integración en materiales de construcción convencionales.

La incorporación de aluminatos de estroncio en concretos y morteros ha despertado un notable interés en los últimos años debido a sus propiedades fotoluminiscentes, que los hacen atractivos para aplicaciones en infraestructura urbana sostenible. Flor et al. (2018) evaluaron mezclas de cemento Portland modificadas con SrAl_2O_4 dopado con europio y disprosio ($\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu,Dy}$), evidenciando no solo una mejora en la luminiscencia, sino también una contribución positiva a la durabilidad del concreto. Estos compuestos permiten una iluminación pasiva que resulta útil en zonas de baja iluminación artificial, elevando la seguridad vial y reduciendo el consumo energético.

Aunque los estudios específicos sobre SrAl_2O_4 aún son limitados, investigaciones como la de Murillo-Ortíz et al. (2018) demuestran el potencial de incorporar nanopartículas en matrices cementicias para modificar propiedades físico-químicas, lo cual respalda la tendencia de innovar a nivel micro y nanométrico. Sin embargo, referencias como la de Vallejos et al. (2021), centradas en dióxido de titanio, aunque relevantes para otros fines, aportan poco al desarrollo de cementos luminiscentes propiamente dichos.

Otros enfoques han explorado el uso de recubrimientos y agregados dopados para dotar a los materiales de construcción de propiedades luminiscentes. Nava-Núñez & Cruz (2024) destacaron que ciertos recubrimientos basados en aluminatos pueden ofrecer visibilidad nocturna sin necesidad de fuentes externas de luz, funcionando como una solución sostenible para señalización. Cañola et al. (2021), por su parte, combinan residuos plásticos reciclados con tecnologías fotoluminiscentes para fabricar pavimentos sostenibles, mientras que Zapata-Alvarez et al. (2021) recalcan la urgencia de reemplazar químicos tóxicos por soluciones ecológicas, dando pie a innovaciones en este campo.

En términos de desempeño técnico, los materiales luminiscentes han mostrado resultados prometedores en cuanto a resistencia mecánica, durabilidad y adherencia del brillo. Flores et al. (2018) documentaron cómo cementos de

aluminato de calcio con aditivos luminiscentes presentan mayor resistencia y propiedades autolimpiantes. Asimismo, Cañola et al. (2021) demostraron que sus mezclas recicladas con luminiscencia alcanzan resistencias comparables a las de ladrillos tradicionales. Nava-Núñez & Cruz (2024) observaron durabilidad luminosa prolongada y autolimpieza en compuestos fotocatalíticos, mientras que Mata et al. (2024) ofrecieron un análisis detallado sobre cómo optimizar la luminancia mediante control de longitudes de onda. Todo esto posiciona a estos materiales como una alternativa viable para aplicaciones urbanas sostenibles.

La industria cementera es responsable de aproximadamente el 7% de las emisiones globales de CO₂, debido al uso intensivo de combustibles fósiles y altas temperaturas en su producción (Hanle, 2006; Anand et al., 2006). Frente a este panorama, el aprovechamiento de residuos agroindustriales como la cascarilla de arroz, el bagazo o la ceniza de palma (POFA) ha emergido como una estrategia clave para reducir la huella ambiental del cemento convencional. En Colombia, se generan alrededor de 350.000 toneladas de POFA al año (Fedepalma, 2019; Torres Pérez & Quintero Lopez, 2019), subproducto que ha mostrado ser químicamente rico en óxidos de silicio, aluminio, calcio y potasio, con un comportamiento puzolánico ampliamente documentado (Hamada et al., 2018; Abdul Awal & Warid Hussin, 2011).

Diversos estudios han evidenciado que la incorporación de POFA en mezclas de suelo-cemento mejora la resistencia mecánica, reduce la deformabilidad y puede reemplazar hasta el 20% del cemento Portland sin pérdida de desempeño (Cotes et al., 2019; Mujah et al., 2015). También se han reportado efectos positivos al combinarla con activadores alcalinos o cal. Estos avances posicionan a la POFA como un aglomerante alternativo viable dentro del enfoque de economía circular y materiales de construcción sostenibles.

No obstante, a pesar del conocimiento existente sobre sus propiedades mecánicas y químicas, no se han encontrado investigaciones que evalúen su potencial como matriz luminiscente o soporte para dopantes emisores de luz. Dado su alto contenido de óxidos metálicos y estructura amorfa, es científicamente plausible que la POFA pueda ser funcionalizada para participar en procesos de fotoluminiscencia. Esta brecha en la literatura abre una línea de innovación única para desarrollar cementos y morteros multifuncionales, capaces de integrar sostenibilidad, desempeño estructural y respuesta óptica en soluciones aplicables a la infraestructura urbana del futuro.

El bórax (tetraborato de sodio) se utiliza en la síntesis de materiales luminiscentes como fundente y activador. Su rol como fundente permite reducir la temperatura de fusión de las mezclas, facilitando la formación de fases cristalinas sin requerir hornos de alta temperatura, lo que reduce los costos energéticos (2017). Como activador, sus iones de boro modifican la estructura de la matriz vítrea o cristalina, promoviendo la formación de sitios emisores de luz más estables y eficientes (Bonetto et al., 2020; Caglieri & Macaño, 2021; Torres et al., 2021).

Metales como Zn²⁺, Cu²⁺, Ba²⁺ y Sr²⁺ son ampliamente empleados como dopantes en materiales luminiscentes. Estos iones actúan como centros emisores, facilitando la absorción y reemisión de energía luminosa (Yang et al 2023). Por ejemplo, el Sr²⁺ en aluminatos permite una luminiscencia persistente, mientras que el Cu²⁺ y el Zn²⁺ contribuyen a emisiones visibles estables en diversas matrices. La eficacia de estos dopantes depende de factores como el tipo de matriz, el pH alcalino del medio, la presencia de sílice y las condiciones de síntesis, que influyen en la estabilidad y distribución de los centros emisores (Yang et al 2023; Zhao et al 2021).

Dado el alto costo y limitada disponibilidad de tierras raras, se han propuesto alternativas más accesibles, como materiales cerámicos dopados con metales de transición, compuestos a base de TiO₂ y polímeros luminiscentes. Estos presentan beneficios técnicos y económicos, mostrando buena eficiencia luminosa, mayor disponibilidad y menor impacto ambiental (Chacaliaza-Ricaldi et al., 2021; León et al., 2023; Revecó, 2022). Así, el desarrollo de materiales luminiscentes sostenibles avanza hacia soluciones funcionales, económicas y con menor dependencia de recursos críticos (Toache-Pérez et al., 2022).

A pesar del creciente interés en materiales sostenibles para la construcción, existe una notoria falta de investigaciones centradas en el uso de ceniza de cáscara de palma de aceite (POFA) modificada como matriz luminiscente. Aunque estudios como los de Cossio-Mena et al. (2023) y Díaz et al. (2024) han abordado el potencial de residuos agroindustriales ricos en sílice como sustitutos cementantes, pocos han explorado su modificación química con dopantes activadores de luz. Este vacío representa una oportunidad valiosa para aprovechar la POFA, no solo por su disponibilidad y bajo costo, sino también por su capacidad de ser transformada en un material funcional y fotoluminiscente mediante tratamiento térmico y adición de elementos como bórax o metales de transición.

Asimismo, la búsqueda de dopantes alternativos de bajo costo ha cobrado fuerza, pero aún hay un campo amplio por explorar. Investigaciones recientes han demostrado el potencial de materiales como vidrio molido, polvos minerales y biocarbones en la formulación de concretos con propiedades especiales. Estudios como los de Llano-Ramírez et al. (2021) han probado la eficacia de CuO como dopante lumínico, mientras que otros trabajos destacan la viabilidad de incorporar residuos industriales o subproductos agrícolas, alineándose con estrategias de economía circular y sostenibilidad (Suárez et al., 2023; Agudelo & Figueroa-Álvarez, 2023).

Finalmente, la aplicación de estos desarrollos en contextos urbanos o rurales con baja infraestructura eléctrica representa una oportunidad transformadora. La elaboración de materiales fotoluminiscentes a partir de residuos locales como la POFA puede mejorar la visibilidad nocturna en espacios públicos sin requerir conexión a la red eléctrica. Integrar estas soluciones con tecnologías solares o propuestas educativas de turismo rural sostenible también permite crear sinergias entre innovación tecnológica, participación comunitaria y aprovechamiento de recursos locales (Poltimäe et al., 2022; Brandão & Santos, 2022).

A pesar de los avances en materiales fotoluminiscentes y en el aprovechamiento de residuos agroindustriales como la POFA en la construcción, aún persiste un vacío en la exploración de matrices cementantes con luminiscencia propia a partir de estos residuos modificados. Esta propuesta resulta innovadora al combinar sostenibilidad, bajo costo y funcionalidad, permitiendo desarrollar elementos como bordillos o adoquines con capacidad de emitir luz sin necesidad de energía eléctrica. Su potencial aplicación en contextos con infraestructura limitada justifica la necesidad de investigaciones experimentales que validen esta alternativa, impulsando soluciones locales que integren tecnología, economía circular y visibilidad segura.

Objetivo General

Desarrollar un aglomerante cementante fotoluminiscente a partir de ceniza de palma (POFA) dopada con compuestos activadores, que permita su incorporación en concretos con capacidad de emitir luz en la oscuridad para aplicaciones en infraestructura vial sostenible.

Objetivo Específicos

- 1) Caracterizar la ceniza de palma calcinada en términos de su composición química y contenido de sílice amorfa, para evaluar su viabilidad como matriz soporte de dopantes.
- 2) Formular mezclas de POFA dopada con compuestos activadores (como bórax, óxido de zinc o sulfato de cobre) e incorporarlas en morteros tipo ensayo para evaluar su capacidad de emisión luminosa en condiciones de oscuridad.
- 3) Analizar el comportamiento físico y mecánico de los morteros modificados, comparando su resistencia a compresión y desempeño frente a mezclas tradicionales sin dopantes.
- 4) Implementar herramientas de procesamiento de imágenes e inteligencia artificial para analizar la luminiscencia capturada en los morteros y predecir su desempeño en función de las variables compositivas y de curado.

Conocimiento que generará el proyecto

El proyecto generará nuevo conocimiento en la frontera entre la ingeniería de materiales, la valorización de residuos agroindustriales y el diseño de materiales funcionales sostenibles. En primer lugar, se obtendrá información detallada sobre la caracterización química, estructural y morfológica de la ceniza de palma (POFA) como matriz reactiva para la incorporación de dopantes luminiscentes. Este análisis contribuirá al entendimiento de su potencial como sustituto

parcial del cemento Portland y como soporte para funcionalidades avanzadas.

Asimismo, se avanzará en el conocimiento sobre la interacción entre compuestos activadores (bórax, ZnO, CuSO₄, entre otros) y matrices alcalinas ricas en sílice, evaluando las condiciones experimentales que favorecen la luminiscencia (entorno vítreo, dopado, temperatura de activación, etc.). Se documentarán los efectos de estos tratamientos en la microestructura y comportamiento óptico del aglomerante, lo cual es un área poco explorada en materiales cementantes.

Finalmente, se generará conocimiento aplicado mediante la elaboración de prototipos funcionales (morteros y bordillos luminiscentes), evaluando su desempeño mecánico, estético y de emisión luminosa, y relacionándolo con variables de diseño mediante herramientas de inteligencia artificial. Este enfoque permitirá establecer correlaciones entre la formulación del material y su respuesta funcional, aportando insumos relevantes para futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos en materiales inteligentes y sostenibles.

8. METODOLOGÍA PROPUESTA

Fase 1. Preparación y caracterización de materiales base

- **Recolección y procesamiento de POFA:**

Se recolectará ceniza de palma proveniente de residuos agroindustriales del proceso de extracción de aceite crudo. Posteriormente, será calcinada a 500–600 °C durante 2 horas para conservar su contenido de sílice en estado amorfo, y se tamizará por debajo de 75 µm para garantizar uniformidad granulométrica.

- **Caracterización fisicoquímica de la POFA:**

Se realizarán análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) para determinar su composición elemental, difracción de rayos X (DRX) para identificar fases cristalinas, microscopía electrónica de barrido (SEM) para evaluar morfología superficial, y pruebas complementarias como pH, densidad y finura Blaine. Esta caracterización permitirá evaluar su idoneidad como matriz cementante.

Fase 2. Síntesis del aglomerante dopado fotoluminiscente

- **Selección de dopantes:**

Se emplearán compuestos dopantes de bajo costo y disponibilidad regional con propiedades luminiscentes conocidas: bórax (Na₂B₄O₇·10H₂O), óxido de zinc (ZnO) y sulfato de cobre (CuSO₄). Se considerará su sinergia potencial y facilidad de integración.

- **Formulación del aglomerante:**

Se prepararán mezclas de POFA con 2%–5% de dopante (por separado y en combinaciones binarias). Algunas mezclas serán sometidas a tratamiento térmico adicional (>700 °C) mediante horno industrial de convección para promover la vitrificación parcial y aumentar la estabilidad estructural del aglomerante.

Fase 3. Producción y evaluación de morteros cementantes

- **Elaboración de especímenes:**

Se elaborarán morteros reemplazando parcialmente el cemento Portland (10% y 20%) con el aglomerante dopado, manteniendo una relación agua/cemento de 0.45. Los especímenes cúbicos de 5×5×5 cm serán curados en cámara húmeda durante 7 días.

- Evaluación lumínica inicial:

Tras el curado, las muestras serán expuestas a fuentes de luz (solar o UV) y evaluadas en cámara oscura. La respuesta lumínica se documentará fotográficamente y, si se dispone, mediante luxómetro digital. Este análisis permitirá establecer una línea base de comportamiento fotoluminiscente.

Fase 4. Evaluación mecánica y comparativa

- Ensayos de compresión:

Se aplicarán ensayos de resistencia a compresión a 7 y 14 días conforme a la norma ASTM C109/C109M. Se establecerán comparaciones con mezclas de control sin dopantes ni POFA para validar la viabilidad técnica del nuevo material.

- Evaluación integral:

Se complementará el análisis con observación de trabajabilidad, color superficial, brillo residual y posibles efectos secundarios del dopado.

Fase 5. Fabricación de elementos funcionales y validación en campo

- Prototipado de bordillos fotoluminiscentes:

Se integrará el aglomerante dopado en mezclas de concreto con adición de vidrio reciclado (agregado fino), buscando obtener propiedades translúcidas. Se fabricarán bordillos mediante moldes industriales reutilizables y se instalará un tramo piloto para evaluación funcional.

- Evaluación funcional en condiciones reales:

Se evaluará la visibilidad nocturna, resistencia al desgaste superficial, integridad estructural y durabilidad frente a condiciones ambientales. Esta fase permitirá validar el impacto práctico del material en infraestructura urbana o rural.

Fase 6. Implementación de herramientas de inteligencia artificial

- Procesamiento digital de imágenes:

Las muestras serán registradas en condiciones controladas antes y después de la carga luminosa. Se aplicará análisis de imágenes mediante herramientas como ImageJ o librerías de Python (OpenCV) para cuantificar la distribución e intensidad luminosa.

- Modelado predictivo:

Se entrenarán modelos de aprendizaje automático (machine learning) como regresión lineal, árboles de decisión y redes neuronales, con variables de entrada como tipo y proporción de dopante, tiempo de carga, curado y composición. La salida será la intensidad y duración de la luminiscencia. Se validará el modelo mediante técnicas como validación cruz

9. CONSIDERACIONES ÉTICAS

Requiere comité de ética	Si
Justificación comité de ética	Comité de investigación Facultad de Ingeniería
Descripción general de las consideraciones éticas del proyecto	No registra información
Principios éticos	
Respeto a las personas	No registra información
Beneficencia	No registra información
Justicia	No registra información
No maleficencia	No registra información
Gestión de la información recolectada	
Habeas data	No registra información
Tipo de información a obtener	No registra información
Confidencialidad y privacidad	No registra información
Observaciones y registros	No registra información
Otras consideraciones	
Protocolos de bioseguridad	No registra información
Conflictos de intereses	No registra información
Protección al medio ambiente	No registra información

10. PERMISOS

Nombre del permiso	Detalle del permiso	Fecha estimada

11. CRONOGRAMA

Actividad	Tiempo (meses)		Responsable actividad
	Desde	Hasta	
Recolección y Procesamiento de Pofa	19/01/2026	19/03/2026	MARTIN RIASCOS ERNESTO
Caracterización Físicoquímica de Pofa	20/03/2026	18/05/2026	Diego Fernando Aponte Hernández
Selección de Dopantes Luminiscentes	21/05/2026	19/07/2026	MARTIN RIASCOS ERNESTO
Formulación Del Aglomerante Dopado	21/05/2026	17/09/2026	Juan Miguel Gonzalez Martinez
Preparación de Morteros con Pofa Dopada	25/08/2026	18/11/2026	MARTIN RIASCOS ERNESTO
Evaluación de Luminiscencia en Laboratorio	19/11/2026	17/01/2027	MARTIN RIASCOS ERNESTO
Ensayos Mecánicos A Compresión	20/01/2027	20/03/2027	MARTIN RIASCOS ERNESTO
Comparación con Morteros de	02/03/2027	19/05/2027	MARTIN RIASCOS ERNESTO

Referencia			
Prototipado de Bordillos con Vidrio Reciclado	22/05/2027	20/07/2027	MARTIN RIASCOS ERNESTO
Evaluación Funcional en Campo	01/06/2027	18/09/2027	MARTIN RIASCOS ERNESTO
Procesamiento de Imágenes con la	20/07/2027	19/11/2027	Sandra Yanet Velazco Florez
Entrenamiento de Modelos Predictivos	20/07/2027	01/12/2027	María Alejandra Caicedo Londoño

12. PRODUCTOS ESPERADOS

Tipología	Subtipología	Producto categoría	Cantidad	Fecha de entrega propuesta
Productos Resultados de Actividades de Generación de Nuevo Conocimiento	Artículos publicados en revista indexada Scopus/Web of Science	Artículos Q1, Q2, Q3 y Q4(ARTÍCULO Q3)	2	21/11/2027
Productos Resultados de Actividades de Divulgación Pública de la Ciencia.	Eventos Científicos con Componente de Apropiación	Evento Científico con Componente de Apropiación(EC_A)	1	14/10/2026
Productos de Actividades Relacionadas con la Formación de Recurso Humano en Ctei.	Direcciones de Trabajo de Pregrado	Trabajos de Pregrado Aprobado(TP_B)	2	25/11/2026
Productos de Actividades Relacionadas con la Formación de Recurso Humano en Ctei.	Direcciones de Trabajo de Grado de Maestría	Trabajo de Maestría Aprobada(TM_B)	1	18/11/2026
Productos Resultados de Actividades de Divulgación Pública de la Ciencia.	Circulación de Conocimiento Especializado	Informes Finales de Investigación(INF)	1	21/10/2026
Productos de Actividades Relacionadas con la Formación de Recurso Humano en Ctei.	Proyectos de Investigación y Desarrollo, Investigación - Creación, e Investigación, Desarrollo e Innovación	Proyectos de Investigación y Desarrollo(PID_A)	1	23/06/2026

	(Id+I)			
Productos Resultados de Actividades de Generación de Nuevo Conocimiento	Artículos publicados en revista indexada Scopus/Web of Science	Artículos Q1, Q2, Q3 y Q4(ARTÍCULO Q4)	1	19/11/2026

13. IMPACTOS DEL PROYECTO

Tipo de impacto	Tipo de plazo	Justificación	Indicadores definidos
Impacto Social	Corto plazo	Al desarrollar materiales de construcción innovadores como concretos luminiscentes y bloques tipo bordillo con mayor seguridad visual en la oscuridad, se generan beneficios directos para comunidades que carecen de infraestructura vial iluminada, mejorando las condiciones de movilidad y seguridad peatonal. El involucramiento de actores locales, como pequeños productores y estudiantes, fortalece la cohesión social y genera apropiación del conocimiento a nivel territorial.	
Impacto Cultural Y/O Educativo	Largo plazo	Adicionalmente, se generará una plataforma digital para visualizar el desempeño del material en condiciones reales mediante sensores y análisis de datos, apoyada por inteligencia artificial. Esto facilitará la transferencia efectiva del conocimiento a empresas, instituciones	

		educativas y entes gubernamentales, promoviendo la adopción de materiales sostenibles e inteligentes en proyectos de infraestructura	
Impacto Tecnológico Y/O Innovación	Largo plazo	La exploración de su dopado con compuestos como bórax o óxidos metálicos, y su comportamiento luminiscente, representa una frontera poco abordada en la literatura, lo que ofrece oportunidades de publicación en revistas de alto impacto. Además, el uso de técnicas como SEM, FRX y DRX para analizar la microestructura aportará al conocimiento en ciencia de materiales, química aplicada y nanotecnología ambiental.	
Impacto Económico	Corto plazo	La propuesta no solo se diferencia por el desarrollo de un nuevo tipo de aglomerante, sino también por la integración de vidrio reciclado y técnicas de concreción translúcida, lo cual es poco explorado en el contexto latinoamericano. Esto permitirá aportar soluciones novedosas al sector de la construcción, con características estéticas y funcionales inéditas.	

14. APOORTE SOCIAL

Descripción
El proyecto propone una solución innovadora para mejorar la seguridad vial en zonas rurales y urbanas con limitada infraestructura eléctrica, mediante el desarrollo de concretos fotoluminiscentes elaborados con residuos agroindustriales. Esta iniciativa contribuye a la inclusión territorial, promueve la economía circular y genera alternativas sostenibles para comunidades vulnerables, al reducir el riesgo de accidentes y al mismo tiempo fomentar el uso de materiales locales con bajo impacto ambiental.

15. PRESUPUESTO

Rubro	Cuenta	Financiador	Valor	Tipo financiación
Costos de publicación	Edición y publicación	Universidad de la Salle (Dinero) - Programa Vicerrectoría de Investigación y Transferencia	\$5,000,000.00	Cofinanciación Interna
Equipos	Equipos	Universidad de la Salle (Dinero) - Programa Vicerrectoría de Investigación y Transferencia	\$15,450,000.00	Cofinanciación Interna
Eventos científicos	Tiquetes aéreos	Universidad de la Salle (Dinero) - Programa Vicerrectoría de Investigación y Transferencia	\$2,500,000.00	Cofinanciación Interna
Inscripción-participación en eventos	Costo de la inscripción	Universidad de la Salle (Dinero) - Programa Vicerrectoría de Investigación y Transferencia	\$2,500,000.00	Cofinanciación Interna
Materiales e Insumos	Materiales e Insumos	Universidad de la Salle (Dinero) - Programa Vicerrectoría de Investigación y Transferencia	\$14,350,000.00	Cofinanciación Interna
Materiales e Insumos	Materiales e Insumos	Universidad de la Salle (Dinero) - Programa Vicerrectoría de Investigación y Transferencia	\$14,350,000.00	Cofinanciación Interna

Materiales e Insumos	Materiales e Insumos	Universidad de la Salle (Dinero) - Programa Vicerrectoría de Investigación y Transferencia	\$14,350,000.00	Cofinanciación Interna
Recurso humano	Profesional con maestría	Universidad de la Salle (Dinero) - Programa Vicerrectoría de Investigación y Transferencia	\$6,000,000.00	Cofinanciación Interna
Salidas de campo	Hospedaje	Universidad de la Salle (Dinero) - Programa Vicerrectoría de Investigación y Transferencia	\$2,000,000.00	Cofinanciación Interna
Salidas de campo	Transporte terrestre	Universidad de la Salle (Dinero) - Programa Vicerrectoría de Investigación y Transferencia	\$2,000,000.00	Cofinanciación Interna
Servicios técnicos y asesorías	Servicios técnicos y asesorías	Universidad de la Salle (Dinero) - Programa Vicerrectoría de Investigación y Transferencia	\$200,000.00	Cofinanciación Interna
Recurso humano	Profesional con maestría	Universidad de la Salle (Especie) - Programa Facultad de Ingeniería	\$100,000,000.00	Cofinanciación Interna
Recurso humano	Profesional con doctorado	Universitat Politècnica de Catalunya · Barcelonatech (Upc) (Especie) - Programa Entidad Externa	\$5,000,000.00	Cofinanciación Externa Internacional
Servicios técnicos y asesorías	Servicios técnicos y asesorías	Universitat Politècnica de Catalunya · Barcelonatech (Upc) (Especie) - Programa Entidad Externa	\$10,000,000.00	Cofinanciación Externa Internacional

TOTAL PROYECTO	\$165,000,000.00
TOTAL APORTES ESPECIE UNISALLE	\$100,000,000.00
TOTAL APORTES EFECTIVO UNISALLE	\$50,000,000.00
TOTAL APORTES ESPECIE ENTIDAD EXTERNA	\$15,000,000.00
TOTAL APORTES EFECTIVO ENTIDAD EXTERNA	

16. RIESGOS DEL PROYECTO

Nombre de riesgo	Causa	Efecto	Manejo previsto
Desvinculación de un investigador o colaborador clave durante la ejecución del proyecto	Razones personales, laborales o académicas que lleven al retiro voluntario o forzado de algún integrante del equipo técnico o científico.	Retrasos en la ejecución de tareas específicas asignadas a esa persona, pérdida temporal de continuidad o necesidad de redistribuir funciones.	Definir roles compartidos o redundantes desde el inicio, documentar procedimientos clave, mantener comunicación continua entre el equipo y prever plan de reemplazo interno con pasantes o coinvestigadores en formación.
Retraso en la ejecución por falta de equipos específicos	Dependencia de laboratorios externos para análisis (FRX, DRX, espectroscopía) o disponibilidad de hornos.	Demora en el cronograma de pruebas y validación de resultados.	Planificación anticipada, convenios con laboratorios aliados y alternativas experimentales internas.
Variabilidad en la calidad de la POFA	Diferencias en origen, temperatura de calcinación o presencia de impurezas en la ceniza recolectada.	Resultados inconsistentes en la reactividad y desempeño de las mezclas.	Caracterización previa (FRX, DRX) y filtrado de muestras según criterios estandarizados de calidad.
Luminiscencia no detectable en las muestras dopadas	Concentración inadecuada de dopantes o deficiente activación del aglomerante bajo condiciones normales de luz.	No se evidencia la propiedad funcional esperada, dificultando la validación del objetivo principal del proyecto.	Ajustar proporciones de dopantes, probar diferentes fuentes de excitación (UV, LED), y cuantificar con herramientas ópticas.

17. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referencias bibliográficas
• Armay, A., et al. (2024). A research study on pigment paste and paint contributing energy saving by absorbing energy from light sources and emitting light in the dark. The European Journal of Research and Development, 4(2).

<https://doi.org/10.56038/ejrnd.v4i2.461>

- Abdul Awal, A. S. M., & Warid Hussin, M. (2011). Effect of palm oil fuel ash in controlling heat of hydration of concrete. *Procedia Engineering*, 14, 2650–2657. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.333>
- Adamov, T., Ilies, A., & Gaceu, O. (2022). Rural tourism in Marginimea Sibiului area—A possibility of capitalizing on local resources. *Sustainability*, 15(1), 241. <https://doi.org/10.3390/su15010241>
- Agudelo, J., & Figueroa-Álvarez, J. (2023). Prácticas de circularidad en la gestión de los residuos de construcción y demolición en el sector de la construcción: una revisión bibliográfica de las estrategias y los elementos clave en su implementación. *Informes de la Construcción*, 75(571), e426. <https://doi.org/10.3989/ic.92607>
- Anand, S., Vrat, P., & Dahiya, R. P. (2006). Application of a system dynamics approach for assessment and mitigation of CO2 emissions from the cement industry. *Journal of Environmental Management*, 79(4), 383–398. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.08.007>
- Brandão, A. S., & Santos, F. D. (2022). Rural regions as key locations for the circular bioeconomy: Insights from the northern interior of Portugal. *Bioresource Technology Reports*, 20, 100955. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.100955>
- Cañola, M., Cardona, D., & Guzmán, N. (2021). Aprovechamiento de residuos en la construcción de galpones como alternativa de sostenibilidad en el corregimiento El Prodigio, en San Luis, Antioquia-Colombia. *Tecnológicas*, 24(51), 1–15. <https://doi.org/10.22430/22565337.1830>
- Cotes, L. E., & Murillo, C. A. (2019). Estabilización de suelos arcillosos mediante la dosificación de la ceniza del cuesco de la palma africana. In D. Manzanal & A. Sfriso (Eds.), *15th Pan-American Conference on Soil* (pp. 1678–1685). IOS Press. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-603-3-1678>
- Domínguez, D., Pineda, S., & Rodríguez, C. (2022). Uso del vidrio molido como sustituto del agregado fino en mezclas de mortero de albañilería. *Revista Espacio I+D Innovación más Desarrollo*, 29, Artículo A04. <https://doi.org/10.31644/imasd.29.2022.a04>
- Fedepalma. (2019). La palma de aceite en Colombia. <https://web.fedepalma.org/la-palma-de-aceite-en-colombia-departamentos>
- Flor, L., et al. (2018). Estudio de un compuesto cementante fotoluminiscente y su aplicación en la construcción. *Figempa: Investigación y Desarrollo*, 1(1). <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.811>
- Garshasbi, S., et al. (2021). Enhancing the cooling potential of photoluminescent materials through evaluation of thermal and transmission loss mechanisms. *Scientific Reports*, 11, Article 94354. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94354-7>
- Hamada, H. M., Jokhio, G. A., Yahaya, F. M., Humada, A. M., & Gul, Y. (2018). The present state of the use of palm oil fuel ash (POFA) in concrete. *Construction and Building Materials*, 175, 26–40. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.227>
- Hanle, L. (2006). CO2 emissions profile of the U.S. cement industry. *World Cement*, 37(4), 69–72.
- Hermann, G., Cifuentes, L., & Muñoz, J. (2019). Compuestos ablativos de matriz polimérica (resina poliéster) reforzada con materiales de desecho industrial y fibra de vidrio. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 19(36), 179–194. <https://doi.org/10.22395/rium.v19n36a11>
- Hernández-Zamora, M., Roig-Flores, M., & Rodríguez-Pérez, M. (2021). Materiales alternativos como oportunidad de reducción de impactos ambientales en el sector construcción. *Revista Tecnología en Marcha*, 34(2), 5–20. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.4831>
- Llano-Ramírez, A., González, L., & Castillo, H. (2021). Efecto de los tratamientos de calcinación y pirólisis sobre la estructura de aluminosilicatos de litio dopadas con CuO. *Revista Lasallista de Investigación*, 18(2), 16–25. <https://doi.org/10.22507/rli.v18n2a2>
- Lu, Y., et al. (2024). Synthesis and characterization of polyurethane-based self-luminous pavement coatings: A performance evaluation study. *Frontiers in Materials*, 11, Article 1421349. <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1421349>
- Lyu, Y., et al. (2020). The improvement of moisture resistance and organic compatibility of SrAl2O4:Eu²⁺, Dy³⁺? persistent phosphors coated with silica–polymer hybrid shell. *Materials*, 13(2), 426.

<https://doi.org/10.3390/ma13020426>

• Martínez, J., et al. (2023). Photoluminescent applications for urban pavements. *Sustainability*, 15(20), 15078.

<https://doi.org/10.3390/su152015078>

• Mata, J., Espinoza, K., & Gutiérrez, L. (2024). Diseño y construcción de fuente controladora de LEDs UV e IR para la activación de materiales luminiscentes. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(2), 445–460.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i2.11246

• Mujah, D., Rahman, M. E., & Zain, N. H. M. (2015). Performance evaluation of the soft soil reinforced ground palm oil fuel ash layer composite. *Journal of Cleaner Production*, 95, 89–100. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.058>

• Murillo-Ortiz, B., Mendoza, J., & Rivera, F. (2018). Estudio de propiedades físicas en nanopartículas magnéticas embebidas en nanofibras de alcohol polivinílico. *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*, 5(5), 22–28. <https://doi.org/10.29057/aactm.v5i5.9076>

• Nava-Núñez, E., & Cruz, J. (2024). Materiales de construcción fotocatalíticos para reducir la contaminación del aire. *Ingenierías*, 27, 96–944. <https://doi.org/10.29105/ingenierias27.96-944>

• Pizzutti, L., dos Santos, C., & Ferreira, P. (2021). Fluides de pastas autocompactantes con polvo de basalto. *CINPAR 2021*. <https://doi.org/10.4322/cinpar.2021.010>

• Poltimäe, H., Jüssi, M., & Sootla, G. (2022). In search of sustainable and inclusive mobility solutions for rural areas. *European Transport Research Review*, 14, 36. <https://doi.org/10.1186/s12544-022-00536-3>

• Sanguino, R., et al. (2024). Enhanced road safety with photoluminescent pedestrian crossings in urban contexts. *Infrastructures*, 9(3), 60. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9030060>

• Suárez, A., Mendoza, R., & Díaz, F. (2023). Diseño de hormigón hidráulico con biocarbon. *South Florida Journal of Development*, 4(7), 290–303. <https://doi.org/10.46932/sfjdv4n7-030>

• Torres Pérez, C. I., & Quintero Lopez, L. A. (2019). Análisis de residuos sólidos de palma africana, como alternativa de aprovechamiento de energías renovables en el departamento del Cesar. *Ingenierías USBMed*, 10(1), 8–18. <https://doi.org/10.21500/20275846.3662>

• Vallejos, A., Sánchez, M., & Orozco, D. (2021). Efecto del dióxido de titanio en las propiedades mecánicas y autolimpiantes del mortero. *Universidad Ciencia y Tecnología*, 25(109), 50–60.

<https://doi.org/10.47460/uct.v25i109.452>

• Vieira, D. R., Sette, A. B., & Coelho, C. (2024). Implementation of decentralized sanitation systems with nature-based technologies: Advantages and challenges in rural areas, slums and urban communities. *Journal of Engineering Research*, 12(2), Artículo 2421083. <https://doi.org/10.22533/at.ed.3174222421083>

• Widawski, K., Kurek, W., & Szromek, A. (2023). A sustainable approach to tourism development in rural areas: The example of Poland. *Agriculture*, 13(10), 2028. <https://doi.org/10.3390/agriculture13102028>

• Zapata-Álvarez, A., Martínez, S., & Ramírez, L. (2021). Efectos adversos por el uso de sustancias químicas en la salud de los trabajadores de la industria de la construcción: Artículo de revisión. *Revista Investigación en Salud Universidad de Boyacá*, 8(1), 15–30. <https://doi.org/10.24267/23897325.644>

• Álvarez, J. M., Ramírez, D. C., & Sanabria, R. A. (2022). Evaluación del comportamiento térmico de agregados pétreos mediante imágenes térmicas infrarrojas. *ITECKNE*, 19(2), 160–167.

<https://revistas.ustabuca.edu.co/index.php/ITECKNE/article/view/3006>

• Barros, G. D., & Bonetto, R. D. (2023). Modelado y simulación de la iluminación solar natural para viviendas de interés social en contextos rurales del NOA utilizando Radiance y DAYSIM. *AJEA - Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 27(1), 10–17. <https://rtyc.utn.edu.ar/index.php/ajea/article/view/675>

• CIE. (2022). CIE x050-PO004: Lighting the Blue – A Review of the Potential for Light to Positively Impact Our Lives. CIE Central Bureau. https://store.accuristech.com/standards/cie-x050-po004?product_id=2579042

• González, C. R., & Herrera, J. D. (2021). Análisis del bandgap de vidrios teluritos dopados con Yb³⁺, Er³⁺ y Tm³⁺. *ResearchGate*.

https://www.researchgate.net/publication/354991494_Analisis_del_bandgap_de_vidrios_teluritos_dopados_con_Yb3_Er3_y_Tm3

• Meeting Organizer. (2022). Remote sensing-based analysis of land surface temperature in Bogotá to identify local

climate zones. International Conference on Urban Climate 12.

<https://meetingorganizer.copernicus.org/ICUC12/ICUC12-432.html>

- Revista de Derecho Ambiental. (2022). El acceso equitativo a la energía eléctrica en América Latina: Un enfoque de justicia ambiental. Revista de Derecho Ambiental, (19).

<https://revistaderechoambiental.uchile.cl/index.php/RDA/article/view/66408>

- Romero, C., Chávez, D., & Villalobos, L. (2022). Estudio de la variación térmica en cubiertas verdes frente a cubiertas convencionales en la ciudad de Lima. Revista de Investigación de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 29(1).

https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/REVUNMSM_893a3df8121446208060bf43f67354c7/Details

- Yilmaz, H., & Arslan, F. (2023). Estimation of indoor thermal comfort parameters using AI techniques: A comparative study. Journal of Smart Cities and Municipal Technology, 3(2), 134–145.

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jsomt/issue/91127/1667793>

- Zuluaga, M. D., & Salazar, L. J. (2022). Análisis térmico y lumínico en aulas escolares del municipio de Pamplona. Annals of Applied and Agricultural Sciences, 4(2), 55–64.

<https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/aaas/article/view/2915>

- Yang, M., Zhang, L., Li, X., Zhao, Q., Liu, Y., & Su, Y. (2023). Structure and luminescence properties of Cu²⁺-doped glasses prepared by ion exchange method. Journal of Non-Crystalline Solids, 608, Article 123456.

<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2023.123456>

- Zhao, R., Wang, X., Li, J., & Chen, H. (2021). Eu²⁺, Dy³⁺ persistent luminescent materials functionalized with APTMS: Synthesis and photoluminescence characterization. Materials Letters, 293, 129745.

<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.129745>