

Riesgo Fúngico en la Gestión de Activos Poliméricos:

Implicaciones para la Confiabilidad de las Redes de Gas Domiciliario

¹María Andrea Reyes Reyes, ²Rene Alexander Paredes Dorado, ²Robert Alexei Vargas Castro, ¹José Miguel Jiménez Martínez, ¹Natalia Alejandra Rodríguez Serrano, ¹Giovanni Juzga León, ¹Jorge Hernando Panqueva Álvarez

¹Corporación para la Investigación de la Corrosión

²Vanti S. A. E.S.P.

Resumen

Las redes de distribución de gas domiciliario en Colombia dependen del uso de tuberías poliméricas, reguladas por la NTC 1746 para tuberías de polietileno y la NTC 6105 para poliamida, materiales seleccionados por su alta durabilidad, flexibilidad y estabilidad frente a condiciones ambientales adversas. No obstante, la exposición prolongada a condiciones subterráneas tropicales puede inducir mecanismos de degradación poco documentados, con implicaciones directas sobre la integridad, comprometiendo la confiabilidad operativa de los sistemas de gas. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la biodegradación fúngica sobre la integridad de tuberías poliméricas empleadas en redes de gas domiciliario, así como su impacto en la gestión del riesgo y la vida útil de los activos. Se realizó un análisis de falla (AFA) sobre una tubería de polietileno con 39 años de servicio que presentó alteraciones superficiales. Se realizaron ensayos físicos, químicos y mecánicos, para evaluar los cambios morfológicos, estructurales y de desempeño del material. Adicionalmente, se efectuó una evaluación de resistencia fúngica (ASTM G21) en tuberías de polietileno y poliamida nuevas con diferentes pigmentos bajo condiciones controladas, empleando cepas de hongos filamentosos nativos del suelo previamente aisladas. Los resultados del AFA evidenciaron

alteraciones en la matriz polimérica, pérdida de homogeneidad superficial y señales de oxidación, compatibles con procesos de biodegradación inducidos por hongos. La prueba de resistencia fúngica mostró diferencias en la colonización micelial dependiendo del pigmento, lo que sugiere que ciertos aditivos pueden modificar la susceptibilidad del material. Estos hallazgos resaltan la importancia de integrar el riesgo biológico en la gestión de activos poliméricos críticos. Asimismo, se hace un llamado a los organismos de normalización a desarrollar lineamientos específicos de gestión de integridad para tuberías poliméricas enterradas, con el propósito de mejorar la confiabilidad, prolongar la vida útil y garantizar la sostenibilidad operativa de las infraestructuras.

Introducción

En Colombia, la infraestructura de distribución de gas domiciliario utiliza de forma predominante tuberías poliméricas, principalmente polietileno (PE) y poliamida 12 (PA12), conforme a lo establecido en la NTC 1746 [1] y la NTC 6105 [2] respectivamente, normas que regulan su identificación, diseño e instalación para la conducción de combustibles gaseosos. Estos materiales han sido adoptados por su durabilidad, flexibilidad y desempeño ante exigencias operativas. Sin embargo, su

instalación enterrada en suelos tropicales expone los activos a interacciones complejas con el entorno físico, químico y biológico, cuya influencia sobre la integridad a largo plazo aún es limitada en la literatura técnica y en los esquemas normativos vigentes. Actualmente, la gestión de integridad de tuberías en Colombia se encuentra ampliamente desarrollada para infraestructuras metálicas, mientras que para tuberías poliméricas no existen lineamientos específicos que incorporen mecanismos de degradación distintos a los tradicionalmente considerados. Esta brecha normativa genera una oportunidad crítica para fortalecer los modelos de gestión de activos, particularmente en activos con décadas de operación, donde los mecanismos de deterioro pueden manifestarse de forma acumulativa y no evidente. Este aspecto adquiere mayor relevancia en el contexto de la transición energética y la proyección del uso de hidrógeno en mezclas con gas natural, dado que la ausencia de una adecuada identificación, control y gestión de los mecanismos de daño actualmente presentes limita la evaluación segura de escenarios futuros de operación. En este marco, se ha evidenciado una tendencia creciente a la implementación de tuberías de polietileno de alta densidad (HDPE) formuladas con aditivos de negro de humo, ya sea como sustitución de tuberías de acero convencionales o en configuraciones híbridas con camisas metálicas externas, motivada por su mayor compatibilidad con el fluido transportado y su resistencia frente a mecanismos electroquímicos, lo que refuerza la necesidad de incorporar criterios específicos de degradación para materiales poliméricos en los esquemas de gestión de integridad.

La identificación temprana y el análisis de mecanismos de deterioro poco documentados son determinantes para la gestión eficiente del ciclo de vida de los activos, la planificación del mantenimiento y la toma de decisiones basada en riesgo. En este contexto, el presente estudio evaluó el efecto de la biodegradación fúngica sobre la integridad de tuberías poliméricas

utilizadas en redes de gas domiciliario, examinando su impacto en la gestión del riesgo y proponiendo criterios que también resulten útiles para otros sectores industriales que emplean tuberías plásticas enterradas como activos críticos.

Degradación de polímeros y mecanismos biológicos

La degradación de materiales poliméricos puede estar asociada a fenómenos físicos, químicos y mecánicos que alteran la integridad de la matriz polimérica. Cambios en la morfología superficial, modificaciones en enlaces químicos y reducción de propiedades mecánicas han sido reportados como indicadores de envejecimiento y deterioro del material [3], [4], [5]. En ambientes enterrados, estos procesos pueden acelerarse o modificarse por la interacción con el suelo, la humedad y la presencia de organismos vivos, lo que introduce variables adicionales al comportamiento esperado del material a largo plazo [6], [7], [8], [9].

Gestión de activos e integridad de tuberías no metálicas

La gestión moderna de activos enfatiza la identificación de modos de falla y amenazas emergentes para aumentar la confiabilidad operativa y optimizar la vida útil de los componentes del sistema. Tradicionalmente, los modelos de gestión de integridad han sido desarrollados para la infraestructura metálica e incorporan mecanismos bien definidos de deterioro, como la corrosión y la fatiga. En contraste, los mecanismos de degradación de tuberías poliméricas enterradas, especialmente los influenciados por factores biológicos, no están reflejados explícitamente en la normativa ni en los criterios tradicionales de evaluación de riesgo, lo que limita la capacidad predictiva de los programas de mantenimiento. El concepto de “otros mecanismos de degradación” incluido en estándares de gasoductos metálicos, como la NTC 5747 [10] brinda un marco para extender el análisis de integridad a activos no metálicos

cuando se identifican amenazas poco convencionales. La incorporación de este enfoque dentro de modelos de gestión de activos permite ampliar la cobertura de modos de falla y fundamentar decisiones operativas y de mantenimiento basadas en datos experimentales y riesgos reales, aumentando la sostenibilidad y fiabilidad de instalaciones críticas que emplean materiales poliméricos enterrados.

Metodología

El estudio se desarrolló bajo un enfoque experimental y aplicado. La metodología integró el análisis de falla (AFA) de un caso real de servicio prolongado, ensayos de caracterización del material y pruebas controladas de resistencia biológica, complementadas con criterios de gestión de activos.

Caso de estudio

Se seleccionó como caso de estudio una tubería de polietileno de media densidad (PEMD) con aproximadamente 39 años de servicio, recuperada de una red de distribución de gas domiciliario en la Zona Andina de Colombia. La selección se basó en la presencia de alteraciones superficiales visibles, incluyendo cambios de coloración, pérdida localizada de espesor, aumento de la rugosidad superficial y heterogeneidades morfológicas, así como en su representatividad como activo envejecido (**Figura 1**). La tubería fue inspeccionada visualmente y se realizó un análisis de falla considerando su historial operativo, condiciones de instalación y entorno de enterramiento.

Figura 1. Tubería de polietileno deteriorada



Hipótesis de trabajo

El AFA se desarrolló considerando las siguientes hipótesis como posibles factores contribuyentes al deterioro observado: a) fuerzas externas, b) especificación del material, c) procesos de manufactura, y d) procesos de biodegradación. Para este artículo se seleccionaron tres ensayos representativos, uno por cada dominio de análisis, con el fin de sustentar el mecanismo principal evaluado. Ensayo mecánico: ensayo de tracción (ASTM D638) [11] para evaluar cambios en la ductilidad y capacidad de resistencia del material. Ensayo físico: microscopía electrónica de barrido (SEM), para analizar alteraciones morfológicas y heterogeneidades superficiales. Ensayo químico: espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), para identificar modificaciones químicas en la matriz polimérica. Las muestras fueron preparadas siguiendo procedimientos estándar de laboratorio para garantizar la reproducibilidad de los resultados. Otros ensayos físicos, químicos y mecánicos realizados como parte integral del caso de estudio no se incluyen en el presente artículo y serán presentados de manera detallada en una publicación posterior dedicada exclusivamente a la caracterización integral del activo.

Evaluación de resistencia fúngica

De manera complementaria, se realizó una evaluación de resistencia fúngica en tuberías de polietileno con diferentes pigmentos, empleadas comúnmente en redes enterradas. Las probetas fueron preparadas en fragmentos de aproximadamente 2 cm × 2 cm para su posterior evaluación (**Figura 2**).

Figura 2. Muestras de tuberías poliméricas nuevas



Para el ensayo se utilizaron cepas fúngicas comerciales ATCC (por sus siglas en inglés, *American Type Culture Collection*) del laboratorio de Biorrosión y Biotecnología de la CIC. Adicionalmente, se incluyeron en el estudio cepas fúngicas nativas del género *Fusarium*, aisladas por CIC de tuberías de polietileno biodegradadas. El ensayo se realizó según los lineamientos de la norma ASTM G 21-15 de 2021 “*Standard practice for determining resistance of synthetic polymeric materials to fungi*” con algunas modificaciones [12].

Tabla 1. Puntaje de colonización establecido por el estándar ASTM G21-15

Crecimiento	Porcentaje de superficie	Ponderación
Sin crecimiento	0%	0
Trazas de crecimiento	1% a 10%	+
Crecimiento liviano	10% a 30%	++
Crecimiento medio	30% a 60%	+++
Crecimiento pesado	60% a 100%	++++

Integración con la gestión de integridad

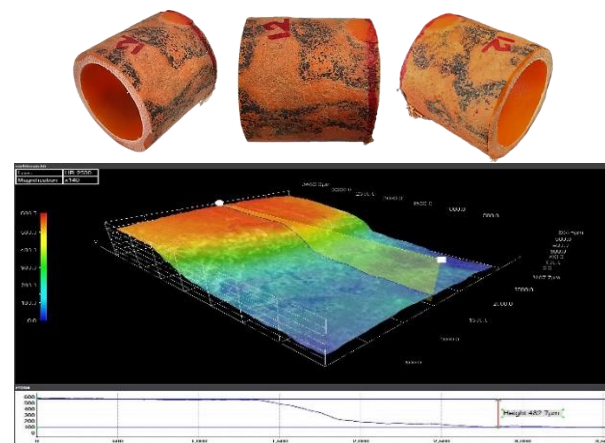
Ante la ausencia de una normativa específica para la gestión de integridad de tuberías poliméricas, los resultados fueron analizados empleando como referencia la NTC 5747[10] aplicable a gasoductos de acero, particularmente en el apartado correspondiente a “otros mecanismos de degradación”. Este enfoque permitió integrar los hallazgos experimentales en un marco de gestión del riesgo, orientado a la identificación de zonas de mayor susceptibilidad y a la definición de estrategias de monitoreo diferenciado para activos poliméricos enterrados.

Resultados y discusión

El análisis integrado del segmento tubular de polietileno evidenció un deterioro heterogéneo y localizado, caracterizado por la coexistencia de zonas con aparente integridad superficial y regiones severamente afectadas. La reconstrucción del perfil tridimensional (3D) permitió identificar una “isla” de material sin afectación aparente, rodeada por áreas con pérdida significativa de espesor, lo que sugiere un proceso de degradación selectivo y no uniforme, consistente con la acción localizada de agentes ambientales y biológicos (**Figura 3**).

Esta reducción de espesor implica un decremento efectivo de la sección transversal resistente, esto compromete la capacidad del segmento tubular para soportar las condiciones de presión operacional y aumenta la probabilidad de modos de falla asociados a fuga o pérdida de contención localizada.

Figura 3. Reconstrucción 3D del daño



La pérdida máxima de espesor cuantificada alcanzó 482,7 µm, lo que, para un periodo de 39 años en servicio, corresponde a una velocidad media de degradación de 12,37 µm/año (0,01237 mm/año). Desde el punto de vista químico, los espectros FTIR obtenidos en zonas afectadas mostraron diferencias claras entre la cara interna y externa de la tubería, ver **Tabla 2**.

Tabla 2. Resultados del ensayo de FTIR

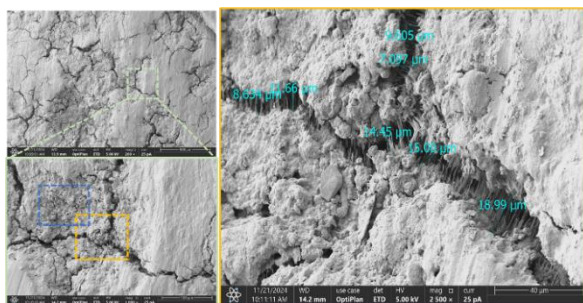
Interna	Externa	Asignación
-----	3694-3631	Estiramiento OH especialmente en compuestos fenólicos.
-----	3406	Estiramiento OH
2915-2847	2918-2848	Tensión enlace C-H (alifáticos)
-----	1738	Estiramiento C=O
-----	1654	Doblamiento - CONH2 en amidas, tensión -C=CH-
1469	1459	Estiramiento C-O en alcoholes, éteres y ésteres, estiramientos S-O, tensión C-F
-----	1031-1003	Flexión C-H en aromáticos o alquenos, Tensión C-S
-----	912-790	Estiramiento C-H, o Flexión C-S, C-Br, C-Cl
718	-----	

En la cara externa, se identificaron bandas asociadas al estiramiento O–H ($3694\text{--}3631$ y 3406 cm^{-1}), indicativas de procesos de oxidación y posible incorporación de grupos hidroxilo, así como una señal en 1738 cm^{-1} atribuida al estiramiento C=O, comúnmente asociada a productos de oxidación del polietileno. Estos resultados coinciden con reportes de biodegradación a causa de microorganismos como bacterias y hongos, mediante la producción de enzimas extracelulares con capacidad de romper las cadenas poliméricas [13], [14], [15]. La presencia de bandas en 1654 cm^{-1} sugiere la aparición de estructuras insaturadas o grupos amida, compatibles con procesos de escisión de cadena y reordenamientos químicos inducidos por envejecimiento ambiental. Estas modificaciones contrastan con la cara interna, donde predominan las bandas características del PE no degradado, lo que refuerza la influencia

del entorno de enterramiento como factor determinante del deterioro externo.

El SEM confirmó la presencia de microfisuramientos ramificados con estructuras compatibles con hifas fúngicas embebidas en el interior de las grietas, con longitudes de hasta $18,99\text{ }\mu\text{m}$, además de montículos porosos asociados a material degradado, ver **Figura 4**. Esta morfología evidenciada es compatible con lo reportado por Spina y colaboradores, 2021 en la degradación de polietileno de baja densidad (LDPE) luego del ataque de hongos filamentosos[16]. Al igual que lo publicado por Gupta y colaboradores, 2020 en la superficie de LDPE con bacterias como *Pseudomonas aeruginosa* [17].

Figura 4. Imágenes de SEM



Este resultado, sumado al aislamiento de hongos filamentosos nativos pertenecientes a distintos géneros (**Figura 5**) y compatibles con reportes de microorganismos potencialmente degradadores de polímeros [18], [19], [20], [21], [22] evidencia que el daño observado no corresponde únicamente a envejecimiento físico-químico, sino que incluye un proceso de biodegradación activa mediada por hongos del suelo.

Figura 5. Cultivo de hongos filamentosos aislados de suelo



El ensayo de tensión evidenció una respuesta mecánica dispersa coherente con la variabilidad morfológica de las probetas, con deformación a rotura entre 278,56 % y 632,32 % (promedio 426,88 %), cumpliendo en promedio el criterio de la NTC 1746 (>400 %) [1] aunque con pérdida localizada de ductilidad en las muestras más deterioradas. Este comportamiento se asocia a un aumento de la rigidez efectiva del material, lo que reduce su capacidad de deformación frente a deslizamientos del terreno, acciones externas o incrementos en las cargas distribuidas sobre la tubería, incrementando así su susceptibilidad a fallas por ruptura frágil o pérdida de integridad estructural. El esfuerzo máximo se ubicó entre 2393,36 psi y 2777,84 psi (promedio 2655,58 psi), por debajo del mínimo de referencia (2900,75 psi; 20 MPa), evidenciando una reducción sistemática de la capacidad resistente y un debilitamiento progresivo de la matriz polimérica. Este comportamiento es consistente con mecanismos micromecánicos asociados a escisión de cadenas, oxidación y cambios en cristalinidad reportados para polímeros sometidos a envejecimiento ambiental [3], [4], [23].

En conjunto con la evidencia morfológica y química respalda un proceso de degradación multifactorial donde el envejecimiento favorece cambios iniciales y la colonización fúngica contribuye a la propagación del daño y la pérdida de desempeño [24], [25]. Desde la gestión de integridad, estos resultados sustentan la incorporación del riesgo biológico en la evaluación de tuberías poliméricas enterradas y el reforzamiento del monitoreo en zonas de mayor incidencia, especialmente en activos de larga permanencia en servicio.

Resistencia fúngica

El ensayo de resistencia fúngica evidenció una susceptibilidad diferenciada de las tuberías poliméricas a la colonización micelial, asociada al tipo de material y a su pigmentación (**Tabla 3**).

Tabla 3. Resultados resistencia fúngica

Materiales	Cepas Fúngicas		
	Control Negativo	Cepas ATCC	Cepas <i>Fusarium</i>
Control Positivo (Bajalenguas)	0	++++	++++
Tubería Amarilla (PE80)	0	+++	+++
Tubería Naranja (PE100)	0	+++	++
Tubería Negra (PE)	0	++	++
Tubería Amarilla (Poliamida)	0	+++	+++

El control negativo no presentó crecimiento, validando el ensayo, mientras que el control positivo mostró colonización severa (++++). Las tuberías de polietileno pigmentado (PE80 amarillo y PE100 naranja) y la poliamida amarilla (PA12) presentaron crecimiento alto (+++) frente a cepas ATCC y nativas de *Fusarium*, indicando una interacción biológica significativa. En contraste, la tubería de PE negro exhibió un menor grado de colonización (++) , lo que sugiere un efecto mitigador asociado a su formulación, posiblemente relacionado con el uso de negro de humo. Estos resultados confirman que la resistencia fúngica no es homogénea entre materiales poliméricos y resaltan la importancia de considerar pigmentos y aditivos como variables críticas en la gestión del riesgo y la selección de tuberías enterradas.

Gestión de integridad basada en riesgo en tuberías poliméricas enterradas

La integración de los resultados del AFA y de la evaluación de resistencia fúngica en un marco de gestión de integridad permitió identificar el riesgo biológico como un mecanismo de degradación relevante en tuberías poliméricas enterradas, no contemplado explícitamente en la normativa vigente. Ante esta brecha, la aplicación conceptual de la NTC 5747,

particularmente en el apartado de otros mecanismos de degradación, facilitó la incorporación de estos hallazgos dentro del análisis de riesgo y criticidad del activo, orientando la priorización de zonas con mayor susceptibilidad y la definición de estrategias de monitoreo diferenciadas. Este enfoque es coherente con lo reportado en la literatura, donde la degradación química y biológica de polímeros se asocia con pérdida progresiva de propiedades mecánicas y aumento de la probabilidad de falla en servicio prolongado[3], [4], [5], [23], [26].

Conclusiones

El estudio evidencia que las tuberías poliméricas enterradas, aun cuando cumplen con la normatividad vigente y presentan un desempeño adecuado durante largos periodos de servicio, pueden estar expuestas a mecanismos de degradación poco documentados asociados a la interacción con el entorno subterráneo. La identificación de estos mecanismos mediante ensayos experimentales permitió incorporar el riesgo biológico dentro de la gestión de activos, orientando estrategias de monitoreo focalizadas en zonas de mayor susceptibilidad y contribuyendo a una toma de decisiones basada en riesgo. Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de desarrollar lineamientos específicos de gestión de integridad para tuberías no metálicas, con aplicabilidad transversal a distintas infraestructuras industriales enterradas.

Perspectivas futuras

A partir de los resultados de este estudio, se propone ampliar los estudios de degradación en tuberías poliméricas enterradas mediante programas de monitoreo de largo plazo que integren variables ambientales, biológicas y operativas. Futuras investigaciones deberían evaluar el desempeño de diferentes formulaciones poliméricas, pigmentos y aditivos, así como su interacción con distintos tipos de suelo y condiciones climáticas, con el fin de identificar factores de susceptibilidad y

resiliencia del material. Asimismo, se plantea la necesidad de desarrollar modelos de gestión de integridad específicos para tuberías no metálicas, incorporando el riesgo biológico dentro de los esquemas de evaluación y toma de decisiones. Finalmente, estos avances deberían ser articulados con las entidades de estandarización y regulación técnica, para contribuir al establecimiento de lineamientos normativos que fortalezcan la confiabilidad, seguridad y sostenibilidad de las infraestructuras industriales que emplean tuberías poliméricas enterradas.

Referencias bibliográficas

- [1] ICONTEC, “NTC 1746:2019. Tubos y accesorios de polietileno (PE) para gases a presión,” 2019.
- [2] ICONTEC, “NTC 6105-6:2019 Sistemas de tuberías plásticas para el suministro de combustibles gaseosos. Sistemas de tuberías de poliamida no plastificada (PA-U) con uniones por fusión y uniones mecánicas. Parte 6: Código de prácticas para el diseño, manejo e instalación.,” Bogotá, 2019.
- [3] Y. C. Chen, Y. F. Li, Y. Xi, Q. Li, Q. Lu, and J. Yang, “Natural aging mechanism of buried polyethylene pipelines during long-term service,” *Pet. Sci.*, vol. 20, no. 5, pp. 3143–3156, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.petsci.2023.03.001.
- [4] S. Zha, H. qing Lan, N. Lin, and T. Meng, “Degradation and characterization methods for polyethylene gas pipes after natural and accelerated aging,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 208, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2022.110247.
- [5] N. Lin *et al.*, “Aging Performance and an Improved Evaluation Method for PE80 and PE100 Pipelines for Urban Gas,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 21, Nov. 2024, doi: 10.3390/app14219941.

- [6] S. Ghatge, Y. Yang, J. H. Ahn, and H. G. Hur, "Biodegradation of polyethylene: a brief review," Dec. 01, 2020, *Springer*. doi: 10.1186/s13765-020-00511-3.
- [7] S. D. Khandare, D. R. Chaudhary, and B. Jha, "Marine bacterial biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) plastic," *Biodegradation*, vol. 32, no. 2, pp. 127–143, 2021, doi: 10.1007/s10532-021-09927-0.
- [8] Tahani Gatea Obaid and Ihsan Flayyih Hasan AL-Jawhari, "Biodegradation of Low-Density Polyethylene (LDPE) by *Aspergillus niger*," *GSC Advanced Research and Reviews*, vol. 17, no. 3, pp. 101–108, 2023, doi: 10.30574/gscarr.2023.17.3.0468.
- [9] J. E. Mendoza *et al.*, "Global perspectives on the biodegradation of LDPE in agricultural systems," *Front. Microbiol.*, vol. 15, Jan. 2025, doi: 10.3389/fmicb.2024.1510817.
- [10] ICONTEC, "NTC 5747:2009. Gestión de integridad de gasoductos," Bogotá, 2009.
- [11] ASTM D638-14, "Test Method for Tensile Properties of Plastics," Dec. 15, 2014, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: 10.1520/D0638-14.
- [12] ASTM G21-15, "Practice for Determining Resistance of Synthetic Polymeric Materials to Fungi," May 15, 2021, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: 10.1520/G0021-15R21E01.
- [13] A. F. Samat, D. Carter, and A. Abbas, "Biodeterioration of pre-treated polypropylene by *Aspergillus terreus* and *Engyodontium album*," *Npj Mater. Degrad.*, vol. 7, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1038/s41529-023-00342-9.
- [14] Z. Gong *et al.*, "Biodegradation of Low Density Polyethylene by the Fungus *Cladosporium* sp. Recovered from a Landfill Site," *Journal of Fungi*, vol. 9, no. 6, Jun. 2023, doi: 10.3390/jof9060605.
- [15] K. Bajo *et al.*, "Biodegradation of untreated plasticizers-free linear low-density polyethylene films by marine bacteria," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 209, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.marpolbul.2024.117115.
- [16] F. Spina *et al.*, "Low density polyethylene degradation by filamentous fungi," *Environmental Pollution*, vol. 274, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116548.
- [17] K. K. Gupta and D. Devi, "Characteristics investigation on biofilm formation and biodegradation activities of *Pseudomonas aeruginosa* strain ISJ14 colonizing low density polyethylene (LDPE) surface," *Heliyon*, vol. 6, no. 7, p. e04398, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04398.
- [18] G. Taxeidis *et al.*, "Triggering and identifying the polyurethane and polyethylene-degrading machinery of filamentous fungi secretomes ☆," 2023, doi: 10.1016/j.envpol.2023.121460.
- [19] I. O. Kunlere, O. E. Fagade, and B. I. Nwadike, "Biodegradation of low density polyethylene (LDPE) by certain indigenous bacteria and fungi," *International Journal of Environmental Studies*, vol. 76, no. 3, pp. 428–440, 2019, doi: 10.1080/00207233.2019.1579586.
- [20] T. O. Ayeni, D. J. Arotupin, and O. E. Ayo, "Biodegradation of polyethylene by indigenous fungi from waste recycling site, South West, Nigeria," *Bull. Natl. Res. Cent.*, vol. 46, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1186/s42269-022-00871-4.

- [21] M. J. Seo, S. Do Yun, H. W. Kim, and S. J. Yeom, "Polyethylene-biodegrading Microbes and Their Future Directions," Dec. 01, 2023, *Korean Society for Biotechnology and Bioengineering*. doi: 10.1007/s12257-022-0264-9.
- [22] A. R. Cowan, C. M. Costanzo, R. Benham, E. J. Loveridge, and S. C. Moody, "Fungal bioremediation of polyethylene: Challenges and perspectives," Jan. 01, 2022, *John Wiley and Sons Inc*. doi: 10.1111/jam.15203.
- [23] S. Zha, H. Lan, N. Lin, and T. Meng, "Degradation and characterization methods for polyethylene gas pipes after natural and accelerated aging," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 208, p. 110247, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2022.110247.
- [24] M. C. Celina, "Review of polymer oxidation and its relationship with materials performance and lifetime prediction," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 98, no. 12, pp. 2419–2429, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.06.024.
- [25] S. V. Suraci, D. Fabiani, L. Mazzocchetti, and L. Giorgini, "Degradation assessment of polyethylene-based material through electrical and chemical-physical analyses," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 3, 2020, doi: 10.3390/en13030650.
- [26] J. Cremer *et al.*, "Aging of Industrial Polypropylene Surfaces in Detergent Solution and Its Consequences for Biofilm Formation," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 5, Mar. 2023, doi: 10.3390/polym15051247.

Hojas de vida

María Andrea Reyes Reyes

Microbióloga y Bioanalista de la Universidad Industrial de Santander (UIS), Magíster en Microbiología de la UIS. Con 10 años de experiencia en la Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC) como profesional especialista, desarrollando actividades en biocorrosión y biotecnología. Trabajo enfocado en el estudio microbiológico de materiales no metálicos, especialmente tuberías de polietileno, mediante ensayos de resistencia fúngica, monitoreo microbiológico y proyectos de investigación de hongos filamentosos asociados a la biodegradación de polímeros.

Celular: (+57) 3178032424

Dirección: Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC) Km. 2 Vía Refugio Sede UIS Guatiguará, Piedecuesta, Santander, Colombia

Email: mreyes@corrosioncic.com

René Alexander Paredes Dorado

Ingeniero Mecánico con especialización en Automatización Industrial y Magíster en gestión de activos y mantenimiento. Tiene experiencia en los procesos de mantenimiento, proyectos y operaciones, involucrando el gerenciamiento, la supervisión y la ejecución de estos. Cuenta con certificado PMP. Vanti S. A. E.S.P. Gestión de activos, Gerencia de Proyectos, Gerencia de mantenimiento, Integridad de Activos. Experiencia de 30 años en sectores industriales (Alimentos, Manufactura, cosméticos, Oil & Gas) en las áreas de mantenimiento y proyectos.

Celular: (+57) 3183064856

Email: raparedes@grupovanti.com

Robert Alexei Vargas Castro

Ingeniero Industrial especializado en Gestión de Integridad y Corrosión. Cuenta con certificado como gestor de mantenimiento y Confiabilidad (ACIEM) con más de 20 años de experiencia en control de corrosión, integridad mecánica, operación y mantenimiento de sistemas de

tuberías de transporte y distribución de gas natural. Trabajador de Vanti S. A. E.S.P. y afiliado a AMPP.

Celular: (+57) 3182861179

Email: rvargas@grupovanti.com

Natalia Alejandra Rodríguez Serrano

Ingeniera Química de la Universidad Industrial de Santander (UIS), con 19 años de experiencia en gestión, planificación, ejecución de proyectos y servicios, relacionados con Integridad y Corrosión para el sector de hidrocarburos. Cuenta con certificado NACE CIP Nivel I y conocimientos en sistemas integrados de gestión HSEQ y acreditación de laboratorio de ensayos. Profesional especialista de la Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC)

Celular: (+57) 3013364002

Dirección: Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC) Km. 2 Vía Refugio Sede UIS Guatiguará, Piedecuesta, Santander, Colombia

Email: nrodriguez@corrosioncic.com

José Miguel Jiménez Martínez

Ingeniero Metalúrgico de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Con más de 4 años de experiencia tanto académica, de docencia e investigación en temas de electroquímica, recubrimientos, recuperación o aprovechamiento de residuos electrónicos. En experiencia industrial, análisis de falla, caracterización de materiales en industria Oil&Gas en materiales metálicos y no metálicos. Responsable de la línea tecnológica de Análisis de Falla de la Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC).

Celular: (+57) 3177381991

Dirección: Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC) Km. 2 Vía Refugio Sede UIS Guatiguará, Piedecuesta, Santander, Colombia

Email: jjimenez@corrosioncic.com

Giovanni Juzga León

Químico de la Universidad Nacional de Colombia, con 18 años de experiencia en Gestión de Integridad y Corrosión. Experiencia en valoración de riesgo, inspección, monitoreo y control de corrosión. Cuenta con certificado NACE Coating Inspectos Nivel 2, Internal Corrosion Technologist e Inspector Ultrasonido ASNT NDT Nivel 1. Profesional experto en Integridad en la Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC).

Celular: (+57) 3142973044

Dirección: Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC) Km. 2 Vía Refugio Sede UIS Guatiguará, Piedecuesta, Santander, Colombia

Email: gjuzga@corrosioncic.com

Jorge Hernando Panqueva Álvarez

PhD en Física Nuclear (Universidad de Colonia, Alemania) y Magíster en Física (Universidad Nacional de Colombia), es director de la Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC), con sede en el Parque Tecnológico Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander (UIS), en Santander, Colombia. Físico especializado en corrosión e integridad de materiales, ha liderado proyectos de certificación e investigación aplicada en corrosión interna, protección catódica y control microbiano en sistemas industriales.

Celular: (+57) 3204933263

Dirección: Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC) Km. 2 Vía Refugio Sede UIS Guatiguará, Piedecuesta, Santander, Colombia

Email: jhpanqueva@corrosioncic.com