

ANÁLISIS EN LA GESTIÓN DE INTEGRIDAD EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS MEDIANTE EVALUACIÓN ILI EN EL SUR-ORIENTE COLOMBIANO

Rosas Romero, Luis Miguel¹; Hernández Carrillo, Carlos Gabriel²; Beltrán Galvis, Nelson³
.....

1. INTRODUCCIÓN

La infraestructura de transporte de hidrocarburos ha adquirido una importancia crítica para la mayoría de economías en el mundo y actualmente son una parte importante de la infraestructura de transporte nacional. Como los vasos sanguíneos en organismos biológicos, la infraestructura de transporte es indispensable para las funciones vitales de la sociedad. Estas se ejemplifican en el transporte de agua o gas natural para la satisfacción de necesidades básicas, junto con la suplencia de requerimientos energéticos en la mayoría de naciones por fuentes de hidrocarburos y transportadas por oleoducto (Infrastructure and Projects Authority, 2018; G. Koch et al., 2016; Song et al., 2018). Asimismo, son considerados como el modo de transporte con mayor practicidad y favorabilidad en la distribución de gas o combustibles líquidos en grandes cantidades y largas distancias dentro de los límites geográficos de un país o más allá de ellos (Dey, 2004; Song et al., 2018).

Gran parte de la infraestructura para transporte de hidrocarburos se concibe y construye para trasladar diferentes tipos de fluidos, junto con las ventajas de seguridad, eficiencia y bajo costo. No obstante, esta

1 Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. luis.rosas02@uptc.edu.co
2 Universidad Francisco de Paula Santander. carlosgabriel.hernandez@uptc.edu.co
3 Universidad Francisco de Paula Santander. nelsonbeltran@ufps.edu.co

infraestructura es propensa a fenómenos de corrosión, grietas, abolladuras, entre otros fenómenos externos que impactan mediante el deterioro de su integridad, constituida en su mayoría de acero con diferentes aleaciones (Dueñas, Sepúlveda, & Vera, 2009). Estos defectos, al no ser manejados apropiadamente, pueden generar fallas que, en un transcurso de tiempo incierto, generan en las tuberías, fugas o rupturas que ocasionan el vertimiento del fluido transportado al medio ambiente. Además, para su mantenimiento y/o reemplazo de la sección afectada se producen sobrecostos, periodos de inactividad y riesgos latentes para la seguridad de los trabajadores. Por consiguiente, la gestión de calidad en la integridad de la infraestructura de transporte ha asumido un papel principal para los operadores de oleoductos, en búsqueda de asegurar operaciones confiables y seguras para el aumento de productividad, reducción de costos, prevención de daños al medio ambiente y apoyo de proyectos futuros (Xie & Tian, 2018).

Por otra parte, esta gestión es crucial en las economías de muchos países, incluido Colombia, el cual depende del funcionamiento fluido e ininterrumpido de este recurso estratégico. De tal forma que garantizar su funcionamiento es vital, ya que los beneficios proveídos en la seguridad inherente a este tipo de infraestructura son notables, debido a las reducidas tasas de fallo y costos en comparación con ferrocarriles o el transporte por carretera. Aun así, no es exenta de sufrir fallas y en algunos casos generar consecuencias catastróficas. Por tal razón, se han formulado prácticas de inspección y mantenimiento que suelen seguir la mayoría de operadores en oleoductos, formulados principalmente sobre la práctica empírica. No obstante, se ha evidenciado un cambio en los operadores a través de la elaboración de políticas para el mantenimiento organizado, basado en la implementación de nuevas tecnologías junto con el análisis de datos y otros estudios internos para sustituir a las políticas fundamentadas en la empiria o regla general (Dey, 2004).

Sin embargo, no es claro el impacto de las políticas relacionadas con la gestión de calidad para proyectos de inspección dentro del presupuesto y plazos asignados, el cual desempeña un papel esencial en la gestión de integridad de tuberías y debe constituirse como parte fundamental del trabajo diario en campo. Esto se sustenta por la implementación de herramientas que permitan no interferir con el transporte de

hidrocarburos y una respuesta a la idoneidad de su servicio. Para este fin se han constituido los ensayos no destructivos (END) como idóneos para reducir la probabilidad y consecuencias de las fallas generadas al diagnosticar y gestionar adecuadamente los defectos identificados. Esto permite formular un análisis de calidad del producto sin destruirlo y la supervisión, predicción de los defectos y prevención de fallos. Lo que facilita formular acciones específicas mediante la inspección, el mantenimiento y la reparación (Pacana & Siwec, 2021; Xie & Tian, 2018).

Así pues, un buen programa de integridad de oleoductos debe ser capaz de gestionar el riesgo con éxito, evitar la generación de fallos, controlar los daños con eficacia, reducir el coste global e incluir el mejoramiento continuo. También, son necesarias la supervisión y evaluación de calidad en casos concretos y globales en la integridad de las redes de transporte de hidrocarburos (Dwivedi, Vishwakarma, & Soni, 2018; Wang, 2008). Igualmente, se requiere la implementación de políticas, junto con técnicas robustas para mitigar y controlar fallas causadas por el deterioro en continua interacción con el medio. De modo que pueden generarse pérdidas económicas considerables al no existir una gestión de calidad enfocada en la supervisión y control de integridad en las tuberías de transporte de hidrocarburos y la evaluación de procesos por herramientas iterativas que permitan el mejoramiento continuo, al implementar instrumentos de prueba y evaluación aplicados en proceso de control. A través de la evaluación en los métodos de inspección y los requisitos de calidad es posible garantizar y validar los resultados identificados.

El Project Management Institute (2017) propone, en el control de calidad, varias salidas relacionadas con el rendimiento en los sistemas implementados con la gestión de calidad y la certificación de entregables. Además, la creación de información sobre el desempeño y solicitudes de cambio en las metodologías implementadas están en función del uso de diferentes técnicas o ensayos no destructivos (END), con el fin de realizar pruebas de sus propiedades mecánicas, físicas, dimensionales o químicas que no afectan la integridad del material de forma permanente. A la par, estas metodologías permiten reducir el tiempo de inactividad y mejora de seguridad y productividad (Sun, Kang, & Qiu, 2011). El

uso de los anteriores ensayos implica la identificación y caracterización de los daños o defectos en la superficie y el interior de la estructura de transporte sin cortar o alterar de alguna manera su integridad, en contraste con el invasivo y exploratorio (incierto) enfoque que proporcionan los ensayos convencionales. Esto implica la extracción de muestras para su investigación y examen individual o su aplicación a todo el material en laboratorios especializados y alejados de la zona de transporte en un sistema de control de calidad de producción tradicional, que genera mayores costos de inspección (Aire & Chimezie, 2016).

Con el advenimiento de las redes de comunicación digitales, se han formulado soluciones de gestión en procesos de inspección que requieren el análisis de información, basados en la comunicación remota. Estos procesos han facilitado la distribución y el intercambio de información entre los datos obtenidos en campo y su análisis en adecuadas instalaciones, sin detener el flujo de hidrocarburos para obtener muestras físicas y su transporte a zonas idóneas para su análisis. Estas formulaciones han requerido la realización de informes y pruebas sustentadas en información primaria para comprobar la calidad de la inspección. Lo cual sustenta la gestión de la integridad y su mejora continua mediante la realimentación de cambios en el diseño, especificación de materiales, adquisición, construcción, funcionamiento, inspección y el mantenimiento de las tuberías, para reducir los riesgos de fallas razonablemente posibles y maximizar la eficiencia de los componentes industriales (Gabetta, Pagliari, & Rezgui, 2018).

Conjuntamente, la evaluación en la gestión de calidad en la técnica de inspección y sus resultados en coherencia con el apremiante enfoque del desarrollo económico colombiano en políticas destinadas a las actividades minero-energéticas han generado un impacto en las exportaciones, producto de la explotación del subsuelo para la extracción de combustibles fósiles, transporte, procesamiento y comercialización. Estos generan excedentes financieros que han permitido la construcción, mantenimiento de nueva infraestructura y el soporte económico en la formulación en proyectos de gran envergadura, a partir de las necesidades de la población y aumento de las relaciones comerciales con mayor integración a la globalización (José Maya Villazón et al., 2017; Ministerio de Minas, 2016).

El crecimiento económico generado ha permitido la implementación de sistemas enfocados en la gestión de calidad, en búsqueda de garantizar el funcionamiento adecuado de la infraestructura utilizada para el transporte de hidrocarburos. Esto es coherente con la implementación e integración de técnicas no destructivas novedosas y formulaciones para aumentar el conocimiento sobre la inspección prescrita por estas herramientas en la evaluación de anomalías identificadas y relacionadas con sus rendimientos, que permiten formular las métricas de calidad con el fin de avalar o modificar las políticas, procedimientos y pautas aplicables para alcanzar los objetivos de calidad propuestos (Project Management Institute (PMI), 2017).

Por consiguiente, la tecnología END ha reemplazado los esquemas tradicionales por inspecciones in-situ e integrado las métricas y evaluación de gestión de calidad, al implementar diferentes combinaciones de estos ensayos para una mejor gestión de calidad y riesgo. Debido a lo cual se sustenta en la comprensión de los antecedentes, ventajas y limitaciones de cada método que aseguren el éxito de la inspección junto con la integración de una amplia variedad de métodos en función de las mayores exigencias y menores tiempos de evaluación y el aumento en la demanda de redes de transporte. Estos cambios en los procesos son coherentes con una operación óptima, continua y rentable (Andalucía, 2011). La implementación de metodologías permite una mayor robustez y eficiencia en los procesos de inspección y gestión de calidad, que deben estar en armonía con la preservación y garantías del correcto funcionamiento de esta infraestructura, representado en altos capitales de inversión. Esto es causado por el mantenimiento e integridad de los activos críticos, gravemente amenazados por el inherente deterioro electroquímico conocido popularmente como corrosión (Christen, Bergamini, & Motavalli, 2009; Johnson, Tesfaye, Wargacki, Hennig, & Suarez, 2018; Pérez, 2004; Sun et al., 2011; Vanaei, Eslami, & Egbewande, 2017).

Al mismo tiempo, se debe asegurar la mitigación del riesgo causado por la degradación generada entre la interacción de la infraestructura y el medio ambiente mediante su diseño y monitoreo periódico. Por esta razón, la gestión en integridad se ha convertido en un proceso crucial para garantizar una operación segura y fiable, especialmente en la inspección de ductos metálicos enterrados. Sin embargo, es común que las empresas

encargadas conserven mucha información sobre datos de inspección y monitoreo no correlacionados por la falta de conocimiento especializado (Dueñas et al., 2009). Así pues, existen pocos procesos que involucren la valoración y correlación de información resultante de la inspección en las tuberías y el contexto geográfico y socioeconómico.

De manera que la presente investigación tiene como fin evaluar la gestión de integridad para la inspección de infraestructura de transporte de hidrocarburos en el sur-oriente colombiano, al valorar la implementación de ensayos no destructivos que permitan la realización de diversas operaciones de mantenimiento en procesos continuos de tubería y realizar operaciones de limpieza con la implementación de la metodología In Line Inspection (ILI).

Con base en estos análisis, es posible identificar la pertinencia de la gestión de integridad en este tipo de infraestructura, junto con el efecto de políticas que han permitido o reducido su implementación, que abarquen con mayor impulso la identificación de amenazas típicas de la integridad de este tipo de infraestructura y la articulación de técnicas involucradas en la gestión de integridad. Estos resultados permitirán evaluar la gestión de calidad en infraestructura del transporte de hidrocarburos, al implementar herramientas no destructivas en procesos de inspección, mediante información obtenida en campo y la evaluación de características que visibilizan las eficiencias y los fenómenos económicos inmersos.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Las redes de transporte de hidrocarburos

Los oleoductos son medios de transporte para combustibles fósiles y otros recursos en estado líquido por infraestructura constituida en su mayoría por tuberías de acero. Estas se consideran parte integral de la infraestructura energética mundial, gracias a su practicidad y rentabilidad para el envío de recursos energéticos en largas distancias (Iqbal, Waheed, Tesfamariam, & Sadiq, 2018; Song et al., 2018). Esto es en parte causado por la creciente importancia del sector minero-energético en Colombia durante las últimas dos décadas, al consolidarse como uno de los sectores estratégicos de la economía nacional. No obstante, a partir del 2014, la

caída en el precio del petróleo moderó drásticamente el ritmo de expansión de esta actividad (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD, 2016).

Pese a esto, este sector de la economía impera en zonas específicas para extracción de recursos fósiles como materia prima junto con la continua utilización de la infraestructura existente y las diferentes gestiones para mejorar la eficiencia y calidad en su extracción y transporte para reducción de costos inherentes en el proceso para la comercialización de hidrocarburos. Estas políticas rigen el sector de minas y canteras, debido a la creciente demanda de hidrocarburos como recurso energético mayoritario en grandes sectores económicos. Esto ha generado una vasta red de infraestructuras en la industria petrolera, procesos de producción, transmisión, almacenamiento, refinado y distribución. Así pues, una falla en cualquiera de estas unidades de transporte afecta el funcionamiento global de la red de transporte e impactan negativamente en el desarrollo económico (Papavinasam, 2017).

2.2 Importancia en las políticas de inspección de infraestructura de transporte de hidrocarburos

La gestión de integridad es un proceso que requiere una mejora continua a través de la realimentación en los procesos implementados con referencia al diseño, especificación de materiales, construcción, operación, inspección y mantenimiento, para reducir los riesgos de fallas (Gabetta et al., 2018). Entonces, la inspección es un asunto de gran importancia en la ingeniería y afecta a todas las facetas que integran las etapas de producción. De modo que una inadecuada gestión de integridad conduce a la degradación ambiental, riesgos para la salud humana, impactos socioeconómicos y pérdidas materiales incalculables. Las investigaciones de incidentes en oleoducto han revelado que avances tecnológicos e implementación de planes para la gestión del riesgo han proporcionado enfoques en la identificación, análisis y su monitoreo. Estas estrategias de gestión, entre otras acciones, permiten abordar fenómenos conexos a la gestión de integridad (Iqbal et al., 2018; Project Management Institute, 2017). Además, el principal objetivo de la inspección es reducir el riesgo y aumentar la calidad en redes de hidrocarburos, debido a su instalación y propensión a diferentes ambientes que generan corrosión, grietas,

deformación, daños por fuerzas externas, entre otros eventos que degradan la calidad de la infraestructura petrolera (Aire & Chimezie, 2016; Song et al., 2018).

La gestión de integridad garantiza que todos los activos y oleoductos funcionen eficazmente durante la duración de su vida útil. En la implementación del proceso de gestión en la integridad de estas redes se requiere de la evaluación de todos los riesgos e integración de los conocimientos en los mecanismos de daño por metodologías simples y efectivas en la selección de materiales en la etapa de diseño y durante la vida operativa. Al mismo tiempo, las gestiones en la operatividad son necesarias durante el uso de estos medios físicos que permiten evitar o retrasar daños globales a futuro (Papavinasam, 2017).

2.3 Principales problemas en la gestión de integridad de redes de infraestructura de transporte de hidrocarburos

Uno de los riesgos latentes y de mayor afectación en las infraestructuras de transporte de hidrocarburos es la corrosión. Esta se ha definido como proceso de oxidación electroquímica por transferencia de electrones al medio ambiente bajo un cambio de valencia de cero a un valor positivo en medio líquido, gas o híbrido suelo-líquido. Estos ambientes se llaman electrolitos, ya que su propia conductividad es el medio para la transferencia de electrones. Un electrolito es análogo a una solución conductora que contiene iones cargados positiva y negativamente llamados cationes y aniones, respectivamente. (Pérez, 2004). La reducción de este riesgo es un componente clave en la gestión de la integridad. Se estima que daños generados por la corrosión equivalen a 2,5 billones de dólares, equivalentes al 3,4% del PIB mundial. Al implementar prácticas de gestión de calidad mediante el seguimiento y control disponibles, se estima un ahorro entre el 15% y el 35%, correspondiente a 375 y 875 mil millones de dólares anuales a nivel mundial (Gerhardus Koch, 2017).

Estos costos no incluyen las consecuencias generadas en la seguridad de ambientes individuales. Conjuntamente, varias industrias han notado que la falta de gestión de la corrosión puede ser muy costosa y que, mediante una gestión adecuada, es posible lograr un ahorro significativo en los costos a lo largo de la vida útil de un activo, para lograr el alcance

total de estos ahorros (G. Koch et al., 2016; Gerhardus Koch, 2017). Además de los fenómenos inherentes al intercambio de electrones con el medio, algunos daños en la integridad de las redes de hidrocarburos son causados por una mayor propensión a fenómenos naturales en zonas geográficas con topografías abruptas y efectos antrópicos acentuados en Colombia por circunstancias socioeconómicas, producto del conflicto armado o atentados de grupos al margen de la ley (Velásquez Arias, 2017). Todos estos problemas generan en un corto, mediano o largo plazo, consecuencias económicas y ambientales notables.

2.4 Detección y control de calidad

La detección y control en la aplicación de un programa eficaz de gestión de la calidad puede contribuir a la reducción de fallas y reprocesos en el transporte de hidrocarburos. Si bien se ha enfocado el papel de la gestión de la calidad en la reducción y contención de estas problemáticas, existe escasez de investigaciones centradas en la efectiva implementación de procesos de inspección que apoyen la pertinencia de las técnicas implementadas, según su éxito en la determinación de requerimientos previamente formulados que mitiguen consecuencias adversas de manera oportuna (Ding, Li, Zhou, & Love, 2017).

Por esta razón, Mecanismos formulados para establecer la pertinencia y evaluación de equipos y maquinaria utilizados en la industria petrolera deben cumplir requerimientos en función de las necesidades de los interesados, cumplir la normativa gubernamental en función del establecimiento de las condiciones óptimas de operación y el cumplimiento de los resultados de un servicio de calidad y precisión. Estos son elementos claves para la producción óptima, adecuación a nuevas formulaciones tecnológicas y las mayores exigencias de calidad en todos los procesos. Además, las complejas condiciones socioeconómicas y del entorno dificultan las formulaciones prospectivas que permitan una adecuada gestión de calidad en inspecciones de las redes de transporte de hidrocarburos. Entonces, la implementación de los sistemas de aseguramiento de equipos e instrumentos de medición a través de la acreditación de su gestión se convierte en una necesidad relevante para la industria de la extracción y transporte de recursos energéticos (Oppong, Chan, & Dansoh, 2017; Pachón Pedraza, Perdomo Montealegre, & Rodríguez Serrezuela, 2018).

Para la eficacia del control de calidad, es de vital importancia integrar la configuración de especificaciones y planes de inspección como parte de la gestión de calidad. Según la Association for Project Management (2012), se debe incluir el tamaño de las muestras en las pruebas de inspección para responder a una representatividad de la evaluación a formular, con un protocolo que incluye los recursos necesarios (personal, equipos, experiencia de terceros o instalaciones). Esto permite brindar confianza a los resultados, mediante una formulación independiente de las pruebas por parte de un regulador externo. Asimismo, las actividades de control de calidad deben incluir decisiones sobre el grado de conformidad de los resultados obtenidos mediante su comparación y pertinencia con especificaciones relevantes, criterios de aceptación y medidas a formular en caso de no conformidad. La integración de estos elementos se ilustra en la Fig. 1.

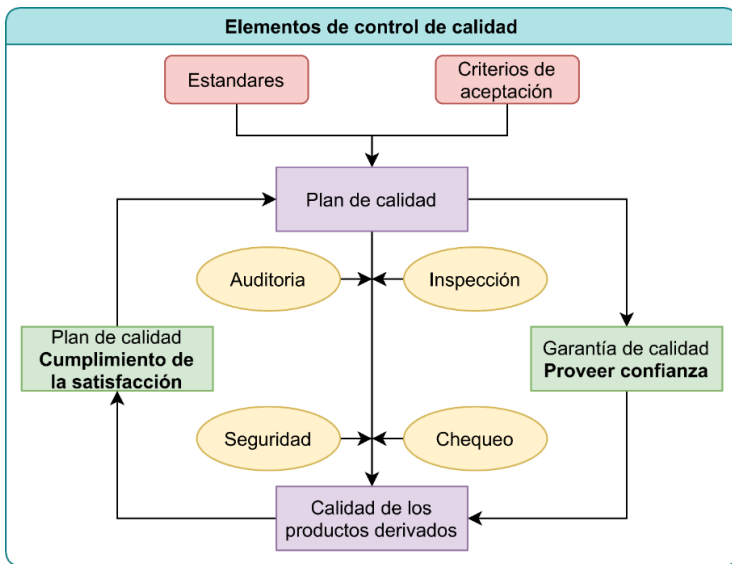


Fig. 1. Elementos de control de calidad desde el inicio del proyecto.

Fuente: modificado de: Association for Project Management (APM). (2012). APMBOK, APM Body of Knowledge.

Al identificar y rectificar preliminarmente las posibles fallas en procesos de inspección, menor será el impacto generado en otras actividades junto con la reducción de costos y mínima afectación en el cronograma establecido. A pesar de esto, la literatura que aborda la detección y el control de la calidad en las herramientas o tecnologías

implementadas ha tendido a centrarse en el desarrollo de tecnologías que se limitan a la simple identificación sobre la base de la experiencia, al implementar prácticas de inspección y mantenimiento tradicionales, seguidas por la mayoría de los operadores de oleoductos y gasoductos sin implementar gestión en la formulación de su pertinencia y eficiencia en el tiempo.

Así pues, realizar acciones de gestión de la calidad en procesos de inspección converge y contribuye en gran medida a la sustentación de las bondades de las técnicas implementadas, junto al incremento en la demanda, mayores exigencias de calidad y menores precios en la adquisición de productos y servicios (Dey, 2004; Razzak Rumane, 2021). Asimismo, el resultado en la evaluación de eficiencias en procesos de gestión de calidad tiene diversas aplicaciones al implementar metodologías, instrumentos y técnicas, como herramientas de mejora de la calidad, junto con la identificación de fenómenos externos que influyen en los procesos que permiten garantizar su entrega con el nivel de calidad requerido. Además, las garantías de calidad incluyen los esfuerzos externos que proporcionan información para mejorar los procesos internos e intenta garantizar la integración entre el alcance, coste y el tiempo del proyecto de inspección (Razzak Rumane, 2021).

2.5 Análisis de inspección en línea o Analysis of In-line Inspection (ILI)

Es una técnica de inspección de tuberías, utilizada para identificar lugares con posibles características de corrosión o defectos anómalos en la tubería mediante la inserción de dispositivos referidos como “marranos o pig” al interior de las mismas, para realizar actividades de limpieza e inspección. Este procedimiento es llamado pigging y puede realizarse en una variedad de diámetros sin detener el flujo a través de la línea para la posterior implementación de END, como la inspección visual (VI), la metalografía in situ (OM), líquidos penetrantes (PT), la inspección de partículas magnéticas (MPI), las corrientes de Foucault (EC), etc. Se utilizan luego de identificar los lugares identificados por ILI y posterior recolección y análisis de información sobre los defectos recogidos mediante estas herramientas de detección e identificación (Vanaei et al., 2017). Al evaluar esta técnica, es posible identificar el desempeño de la gestión de calidad integralmente, ya que permite identificar y evaluar

el daño interno y registra las irregularidades en las tuberías, incluida la corrosión, grietas, deformaciones u otros defectos. El método ILI es reconocido internacionalmente como la forma más efectiva de proteger la operación de seguridad de la tubería y una parte importante del sistema de gestión de integridad para promover una operación segura, eficiente y rentable (Song et al., 2018; Xie & Tian, 2018).

Igualmente, como parte de la gestión de calidad es necesario incluir la predicción del crecimiento de los defectos que en el futuro pueden producir un fallo en la tubería, debido a la existencia de diferentes tipos de amenazas para la integridad de las tuberías, como la pérdida de metal, las grietas, las abolladuras, los daños de terceros, las soldaduras, etc. Estos planteamientos deben involucrarse en la gestión de calidad basada en el riesgo, la cual se resume e ilustra en la Fig. 2.

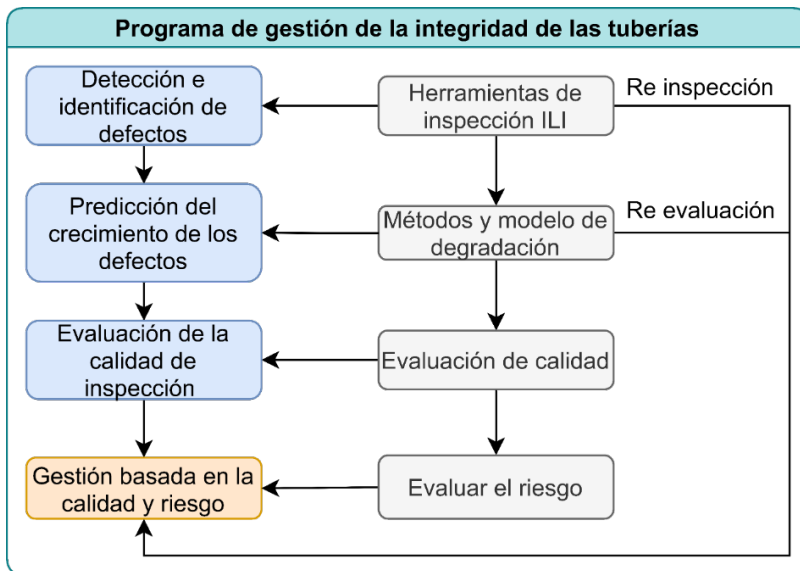


Fig. 2. Diagrama de flujo para un programa de gestión de la integridad de las tuberías al utilizar ILI.

Fuente: modificado de: Xie, Mingjiang & Tian, Zhigang. (2018). A review on pipeline integrity management utilizing in-line inspection data.

Bajo el programa de gestión de calidad y riesgo es posible formular los intervalos de inspección adecuados, acciones de mantenimiento y reparación, junto con la estimación de cambios o actualizaciones de las acciones de inspección y el estado de los defectos para lograr una predicción precisa de

los defectos y equilibrar la fiabilidad y los costes de forma eficaz (Xie & Tian, 2018).

2.6 Retos de la economía global y el sector de hidrocarburos

El mercado global se encuentra en un entorno de alta incertidumbre económica y política, volatilidad en los mercados y bajos crecimientos. El endurecimiento de las condiciones financieras y el debilitamiento del estímulo fiscal son los principales impulsores de la desaceleración del crecimiento de las actividades productivas responsables del desarrollo económico. Sin embargo, al interior de cada una de estas categorías hay importantes diferencias en su aporte al PIB de producción a precios constantes en Colombia y el variado aporte por el sector de explotación de minas y canteras, al compararse con el constante crecimiento de otras actividades en los últimos 15 años. Esta actividad económica tiene una mayor variabilidad, estimada en una tasa anual de \$ 350,5 x10⁹ pesos ($R^2=0.62$) y aporta un 5,11% de la producción total (Departamento Administrativo Nacional de Estadística –DANE, 2019; Sarmiento-Rojas, González-Sanabria, & Hernández Carrillo, 2020).

No obstante, la caída de los precios internacionales del petróleo en el 2014 generó un impacto negativo sobre los ingresos de la Nación, reflejado en el aumento del déficit y la deuda del gobierno, debido al sustento fiscal, producto del incremento en las rentas petroleras que alcanzaron hasta un 20% de las rentas en el 2013, reducida drásticamente en los años 2015 y 2016 (Melo Becerra, 2017). Esta disyuntiva impactó negativamente las inversiones en infraestructura y se establecieron políticas para el uso eficiente de los recursos, incrementar la producción y satisfacer el mayor número posible de necesidades, según los conceptos de elección, escasez y costo de oportunidad (Myers, 2017). Por lo tanto, la realidad política es representada por factores que influyen en la productividad de uno o varios sectores de la economía como:

- La cantidad y calidad de los recursos naturales y artificiales.
- La calidad y extensión de la educación y capacitación de la fuerza laboral.
- Los niveles de expectativa, motivación y bienestar.
- El compromiso con la investigación y el desarrollo.

2.7 Problemáticas que aquejan al sector de hidrocarburos

Desde hace más de 30 años se ha criticado a diferentes industrias por sus deficientes sistemas de gestión junto con los mayores requerimientos que la demanda exige. Por ende, algunas de las deficiencias identificadas en la gestión de calidad en diversas actividades productivas son las siguientes:

- Los programas de planeación y control no reflejan la realidad productiva.
- No se mide el desempeño de los procesos con base en sus tareas.
- No se establecen indicadores claros para cada tarea.

La mayoría de los esfuerzos de investigación en el campo del control de proyectos aún se centran en el desarrollo de modelos de control de costos, dado que en los procesos de inspección de tuberías, las fuentes de inversión se sustentan casi en su totalidad en la inversión o excedentes financieros, producto de la explotación y posterior exportación (Xiong, Adan, Akinci, & Huber, 2013). Así, una parte crítica del control del proyecto es el seguimiento del progreso o la detección. Aunque, el seguimiento en procesos de inspección se asocia a muchas variables para una adecuada gestión de integridad y evaluación de grandes cantidades de información relacionada con una variedad de funciones, como:

- La programación,
- Los métodos de inspección,
- La administración de costos,
- Los recursos,
- El control de calidad.

Junto con los grandes volúmenes de información proporcionada por varias fuentes diferentes, es posible su presentación en una amplia variedad de formas. Esto genera dificultades en el rastreo y registro de cambios, basados en decisiones conscientes tomadas durante los procesos de inspección. Además, existen dificultades del rastreo y registro adecuado en las desviaciones sutiles, producto de decisiones inconscientes. Al mismo tiempo, no es ajena la burocracia, corrupción, poca planificación,

supervisión deficiente y falta de compromiso por los líderes de proyectos a la problemática de productividad y algunas de sus falencias. Estas se evidencian en los incumplimientos de los plazos de tiempos y metas de costos establecidos previamente, junto con las dificultades inherentes a la gestión efectiva en un primer intento por el uso de nuevas metodologías y al no incluir en el plan de gestión de calidad un plan de trabajo. Lo que genera deficiencias en la gestión de recursos y dificulta el óptimo control del proyecto de inspección (Mejía Aguilar & Hernández, 2007).

3. MARCO METODOLÓGICO

Para este planteamiento se consideran algunos fenómenos sociales y ambientales del territorio evaluado que permitan la comprensión de efectos ocurridos en la integridad de la infraestructura evaluada y su inclusión en la identificación de las implicaciones en varias dimensiones socioeconómicas y ambientales. En este orden de ideas, se parte de una representación sistémica para el establecimiento de condiciones económicas en la zona de evaluación y su contribución en la economía nacional, con el fin de identificar la gestión de calidad y sustentar la representatividad de las inspecciones realizadas en la red de hidrocarburos. Esta gestión es realizada mediante la consecución de información recabada al identificar defectos con instrumentos de detección, realizada a través de recorridos a lo largo de oleoductos por parte del personal técnico, al implementar técnicas de inspección ILI por empresas filiales a Ecopetrol en un periodo de 10 años (2009-2019).

Estas herramientas son las tecnologías de inspección de mayor uso para detectar anomalías en las tuberías en la actualidad (Song et al., 2018; Xie & Tian, 2018). Por lo tanto, en la presente investigación solo se evaluará la metodología ILI. Asimismo, la cuantificación de evaluaciones estará acompañada de una estimación geográfica que permitirá diferenciar algunas características del entorno que impactan en la integridad en la red de hidrocarburos.

3.1 Determinación de zonas de estudio

Las redes de transporte de hidrocarburo evaluadas solo conducen petróleo crudo desde los campos de producción hasta las refinerías.

Una parte importante de la red de oleoductos es actualmente operada y evaluada por empresas filiales de Ecopetrol (empresa de economía mixta, de carácter comercial y del orden nacional, vinculada al Ministerio de Minas y Energía), las cuales se encuentran distribuidas en el sur-oriente colombiano. Estas se diferencian geográficamente por su ubicación, según las entidades territoriales departamentales y Regionales, (Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) & Unión Temporal PLAN-IN-Planeación Inteligente SAS y SA&S – Soluciones Ambientales y Sociales, 2017).

Debido a la imposibilidad de obtener un valor exacto de las actividades de control y monitoreo realizadas en todas las redes de hidrocarburo del país, el procedimiento de validación se ha realizado a partir del establecimiento de los departamentos con mayor aporte a la producción de hidrocarburos y las redes para su transporte en esta zona geográfica, aleatoriamente recogidas y representadas en 535 puntos de red y 2864 resultados obtenidos mediante técnica ILI en un periodo de diez (10) años (2009-2019) y su correlación con la distribución geográfica de las redes en la zona sur oriental.

3.1.1 Medios para la selección de la zona de estudio

El sur-oriente colombiano se caracteriza por la explotación intensiva de hidrocarburos e inclusión de las principales redes para transporte de petróleo, junto con la mayor concentración de demanda poblacional del país. Por este motivo, las muestras de estudio están relacionadas con los departamentos donde se ubican las redes de hidrocarburos (demarcado en rojo) en la Fig. 3. la selección de las inspecciones realizadas fue aleatoria y se ilustra en Sistemas de Información Geográfica (SIG), como herramientas que permiten el análisis, presentación e interpretación de los hechos relativos a la superficie terrestre (Olaya, 2014; Peuquet & Marble, 1990).

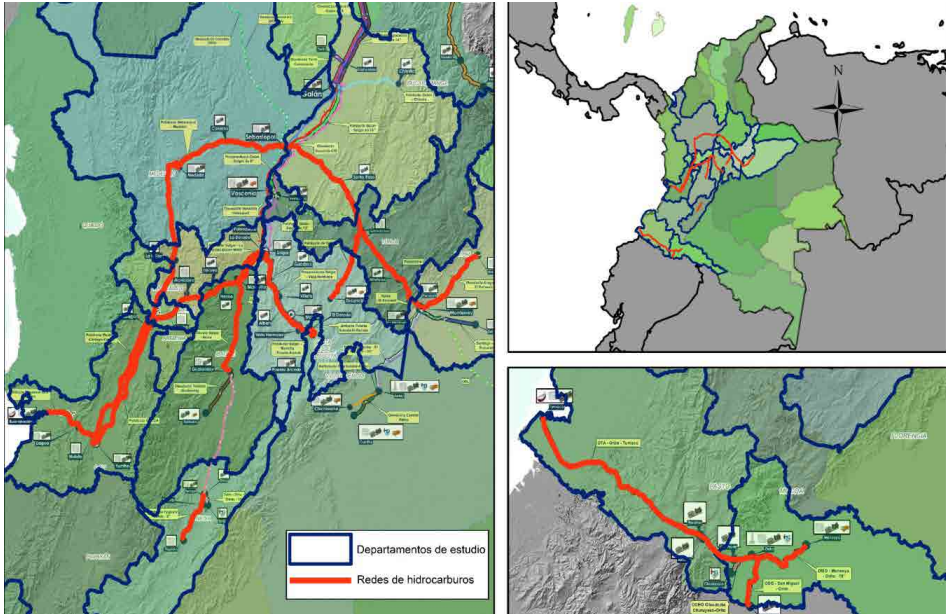


Fig. 3. Distribución geográfica de las redes de hidrocarburos en los departamentos evaluados.

Fuente: modificado de CENIT, Transporte y logística de Hidrocarburos.

Los datos espaciales se refieren a los objetos geográficos de interés (redes de tubería y entidades territoriales) y sus ubicaciones respectivas, junto con las características o atributos, como un nombre, número de inspecciones, tipo de daño encontrado, etc. Esto permite su vinculación de dos tipos de datos para crear información y facilitar el análisis con cada capa que representa un tema geográfico diferente, como las características geográficas y políticas, apiladas una sobre otra (Campbell & Michael, 2012).

4. RESULTADOS

4.1 Evaluación de la actividad económica y el impacto de actividades de minas y canteras en el país

Como estimativo para establecer la zona de estudio representativa, se analiza el PIB per cápita como indicador de la relación entre el valor total de los bienes y servicios generados durante un año en una nación y el número de sus habitantes, según los Reportes del (Departamento Administrativo Nacional de Estadística –DANE, 2017). El PIB a nivel nacional per cápita promedio corresponde a \$19.634.626,7 pesos (\$ 5.700 USD, aproximadamente). No obstante, algunos departamentos se encuentran por encima del PIB per cápita nacional como Casanare, Meta y Bogotá, D.C. con \$41.971.599 pesos (\$12.300 US), 35.056.954 pesos (\$10.300 USD) y \$ 30.628.794 pesos (\$ 9.000 USD), respectivamente. La capital del país centraliza la producción nacional en gran parte de las actividades económicas (aproximadamente un 25% del total), por lo que el PIB per cápita se mantiene elevado, ya que en esta zona del país se concentra la mayor cantidad de población y es considerada el centro económico, empresarial e institucional del país. En contraste, en los departamentos de Casanare y Meta, el PIB per cápita son los mayores del país como consecuencia del auge que ha tenido la explotación petrolera en su territorio (Delgado & Pérez, 2018).

La diversidad en el PIB per cápita se expone geográficamente en la Fig. 4, el cual se encuentra diferenciado según departamentos. Como ejemplo se analiza el caso específico de los departamentos del Meta y Casanare, los cuales aportan un 3,5% y 1,5% de producción per cápita, respectivamente. Además, estos son los departamentos con mayores ingresos per cápita del país, producto de la concentración de la mayor producción de recursos naturales estratégicos (RNE). Estos se obtienen directamente de la naturaleza sin requerir mediación humana para su generación. Estos han sostenido gran parte de la producción industrial del país mediante su uso interno y exportación, del cual dependen las sociedades contemporáneas. En Colombia, una buena parte de la economía e inversión pública se ha sustentado a partir de la extracción de estos recursos. No obstante, a partir de la segunda mitad de 2014, la economía

colombiana comenzó a ser afectada por reducción de sus rentas por intercambio, como resultado de la fuerte caída del precio del petróleo, entre otro tipo de incertidumbres económicas globales. Lo cual ha afectado la demanda externa, percepción de riesgo y crecimiento económico (Escuela de Economía y Finanzas Universidad EAFIT, 2019; Rojas, 2015; Toro-Córdoba, Garavito-Acosta, López-Valenzuela, & Montes-Urbe, 2015).

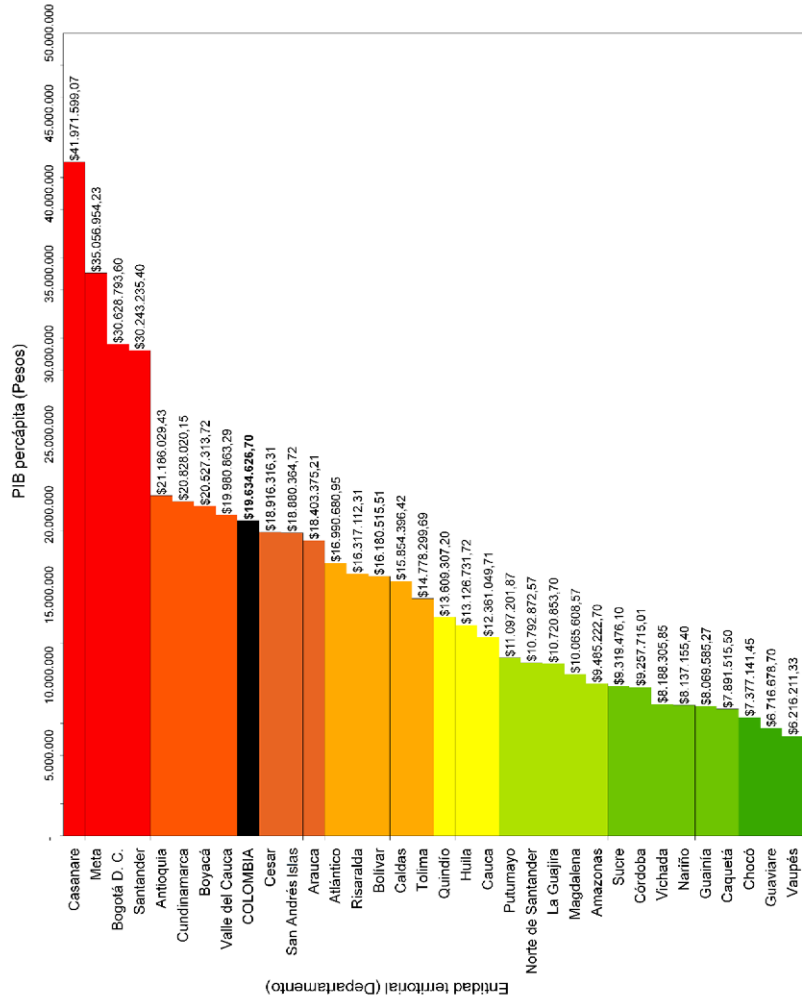
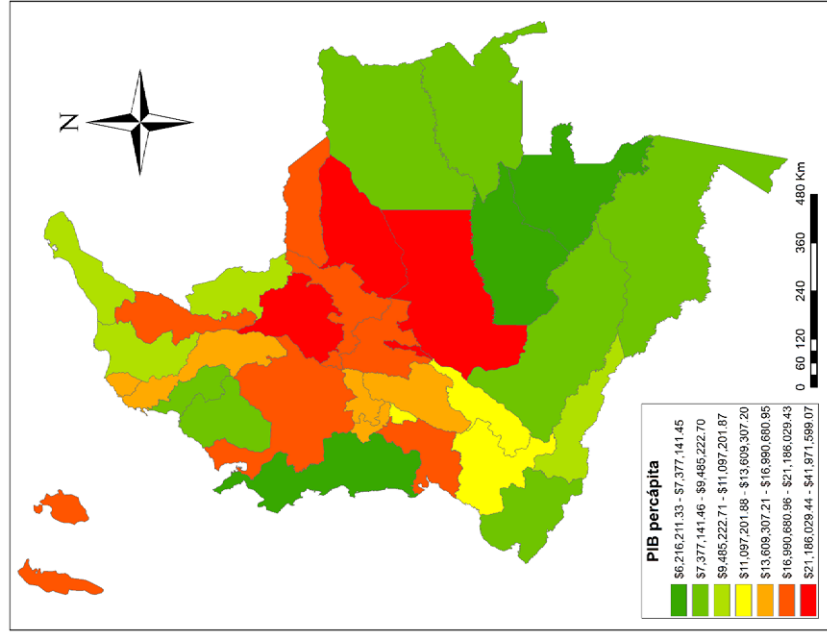


Fig. 4. Distribución del PIB per cápita por departamentos en pesos colombianos.

Fuente: elaboración propia a partir de datos del DANE.

A pesar de estas adversidades, el PIB per cápita en los departamentos mencionados se ha mantenido como el más alto del país en los últimos cinco años. Sin embargo, es necesario diferenciar la producción mediante las actividades en explotación de minas y canteras concentradas en departamentos como Meta, Casanare, Putumayo, Cesar y la Guajira, enfocados en la extracción de combustibles fósiles y que abarcan entre el 50% al 30% de la producción total. Esta diferenciación de producción por minas y canteras por departamentos se expone en la Fig. 5.

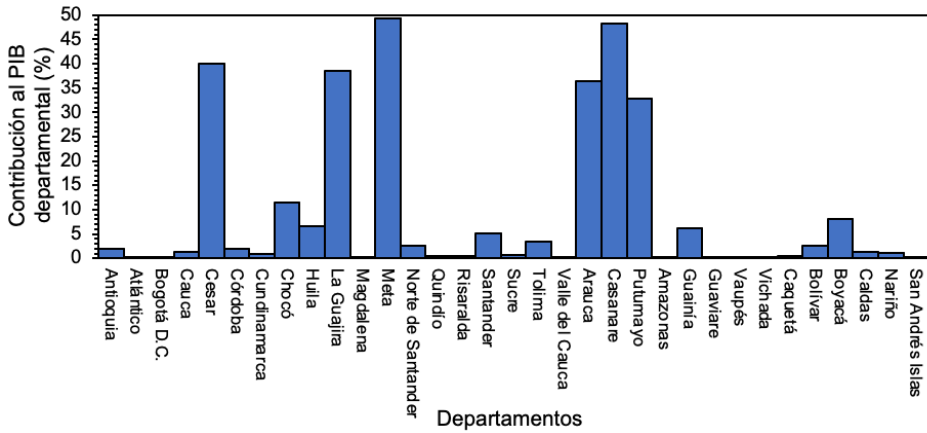


Fig. 5. Porcentaje por explotación de minas y canteras por departamentos.

Fuente: elaboración propia a partir de datos del DANE.

Algunas actividades tienden a concentrarse según su distribución espacial, la cual tiende a ser desigual en ciertas áreas geográficas, como resultado de la existencia de economías de aglomeración que producen migración laboral, especialización, una mayor preponderancia y acaparamiento de actividades específicas de producción (Ramírez, Bedoya, & Díaz, 2016). Como ejemplo se expone la explotación de recursos generados en zonas particulares de la geografía nacional. La explotación de minas y canteras está directamente relacionada con la infraestructura de transporte de los recursos explotados por dicha labor, ya que en esta zona su producción y distribución es mayor. Como contraste, la Fig. 6 expone la relación de producción al PIB nacional y la contribución generada por la actividad de minas y canteras.

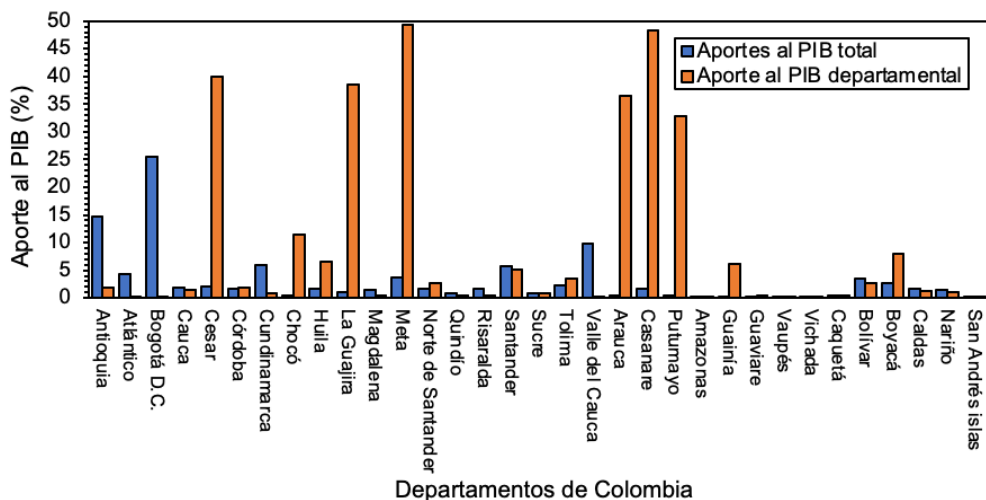


Fig. 6. Relación del aporte al PIB nacional y departamental por actividades de minas y canteras.

Fuente: elaboración propia a partir de datos del DANE.

Se observa que departamentos específicos, ubicados en el occidente, centro y sur-oriente del país, abarcan un aporte mucho mayor al producto interno bruto departamental por la explotación de hidrocarburos. Esto permite establecer las zonas de mayor representatividad en función de la infraestructura física implementada. No obstante, algunos departamentos no generan producción por este tipo de actividad y en estas zonas atraviesan redes de hidrocarburos, con el fin de transportar esta materia prima a zonas estratégicas. Por esto, las muestras evaluadas son consideradas como representativas, debido al papel protagónico de las actividades de explotación del petróleo e infraestructura destinada para su transporte.

4.2 Determinación de la cantidad de puntos de monitoreo

Al analizar las inspecciones realizadas en un periodo de diez años (2008-2019) como se expone en la Fig. 7, se observa un crecimiento progresivo de inspecciones ILI posterior al año 2010. Estos valores son coherentes con los cambios de política económica nacional centrados a la explotación intensiva de recursos del subsuelo (Ministerio de Minas, 2016). Además, se denota que la metodología ILI ha abarcado en el tiempo, una mayor implementación de su uso por la calidad y eficiencia

en su implementación. Sin embargo, posterior al 2013, se observa un decaimiento en su uso y una baja estabilidad a partir del 2016, producto de los menores ingresos percibidos por esta actividad y no se relaciona con la técnica de inspección en contraste con la consecución de conocimiento y experticia su implementación es cada vez mayor en campo.

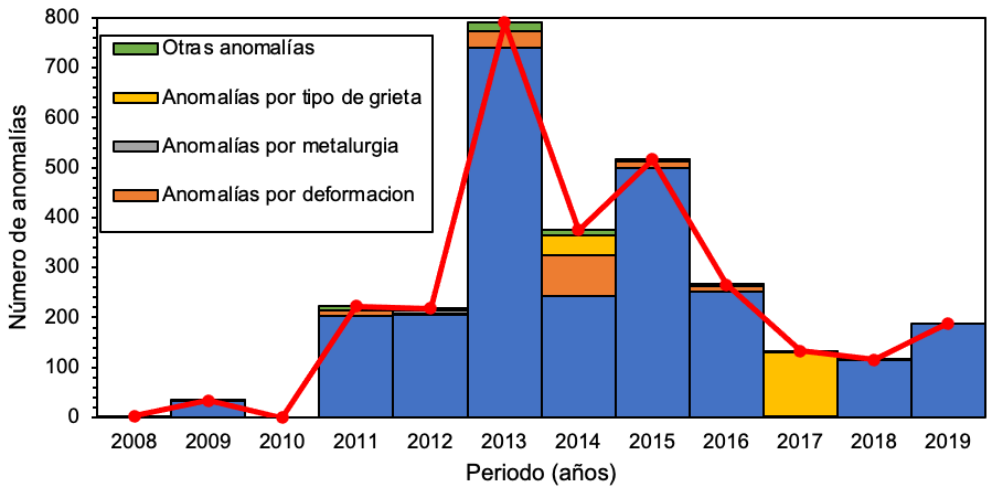


Fig. 7. Identificación de anomalías en el periodo de tiempo de evaluación por metodología ILI.

Fuente: elaboración propia.

Pese a una mayor implementación de esta técnica en el tiempo, los cambios generados en su uso obedecen a las variaciones de inversión en el mantenimiento de oleoductos. Esto es causado por la reducción intempestiva de ingresos externos del país por fenómenos económicos globales a partir del año 2014, producto del derrumbe de los precios internacionales del petróleo, que afectaron la economía colombiana y generaron incertidumbre económica, política, volubilidad en los mercados y reducción del crecimiento económico (International Monetary Fund (IMF), 2019; World Bank Group, 2019). Lo anterior afectó el dinamismo del sector petrolero, principalmente en las regiones productoras donde las inspecciones se acentúan con mayor impacto y el Sistema General de Regalías (SGR) generó una reducción de ingresos hasta de -7,8 billones de pesos (Contraloría General de la República, 2016). Posterior a esta crisis, su impacto en la reducción de inspecciones es evidente, pues se

acentúa en la actualidad, al continuar una dependencia del sector primario exportador en la economía colombiana.

4.3 Evaluación de anomalías encontradas en la inspección de redes de hidrocarburos

Con el fin de establecer los puntos de atención sobre la infraestructura de transporte, se obtiene información relacionada con el análisis de inspección basada en riesgo e información involucrada de la gestión. Para este fin, se usó la implementación de la técnica ILI para evaluar la integridad estructural de las redes de hidrocarburos, a través de la línea de tubería como técnica no destructiva, para detectar su daño interno (Bruschi, Vitali, Marchionni, Parrella, & Mancini, 2015). Al medir y registrar las irregularidades en las tuberías por corrosión, grietas, deformaciones u otros defectos, se promueve una operación segura, eficiente y rentable (Song et al., 2018). Con base en esta técnica, se han identificado 2863 anomalías en las redes de hidrocarburo evaluadas, diferenciadas en porcentajes e ilustradas en la Fig. 8.

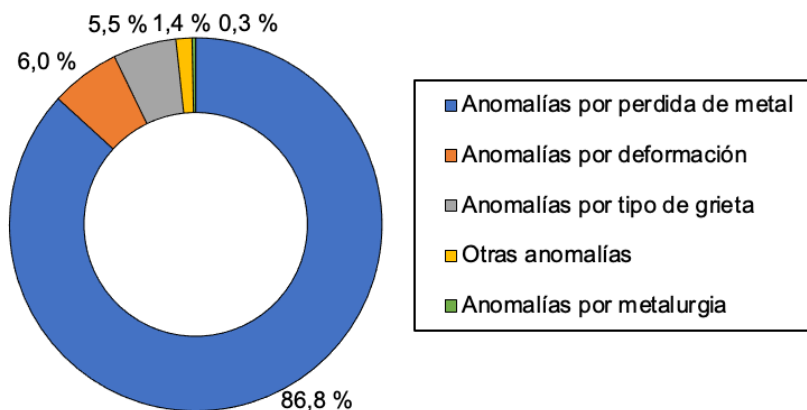


Fig. 8. Anomalías generales encontradas en la evaluación ILI.

Fuente: elaboración propia.

La evaluación por ILI expone que un 86,8% se relaciona con pérdida de metal y su identificación es mayoritaria en el tiempo, salvo por los periodos comprendidos entre el 2014 y 2017. Esto es coherente con los fenómenos de interacción entre la tubería y el medio, al producir diversos fenómenos de corrosión. Este tipo de anomalía es prácticamente

generalizada en todos los sistemas de ductos metálicos enterrados, que habitualmente presentan estos problemas y ha representado históricamente el 95% de anomalías en este tipo de redes. Conjuntamente, existe una probabilidad entre el 80% y 90% de que las áreas producto de pérdida de metal estén en susceptibilidad de sufrir perforaciones, derrame del fluido transportado y daño al medio ambiente. Por lo tanto, la técnica no destructiva ILI ha permitido vislumbrar el efecto integral que podría desencadenar la falta de monitoreo y evaluación de integridad de estas estructuras.

Además, permite la gestión del riesgo al considerar la seguridad en la operación y la validación de estos métodos, aceptados por la industria petrolera internacional, progresivamente adaptada y utilizada en el territorio nacional (Fig. 7), al responder y garantizar una gestión de integridad durante la vida útil del sistema. Esta confianza se genera a través de un programa de gestión de calidad fiable, debido a que defectos habituales por corrosión difieren en su naturaleza por anomalías de deformación, identificados en menor cantidad. Estos fenómenos son generados por actividades antrópicas durante la construcción del ducto o actuaciones posteriores de terceros. Asimismo, las grietas que pueden indicar un avanzado estado de degradación de la estructura e inminente fallo del sistema. En razón de lo expuesto, existen diversas gestiones al depender de los problemas identificados, que pueden generar graves daños a futuro, al no existir una inspección adecuada (Dueñas et al., 2009).

Las anomalías por deformación representan el 6% de todos los defectos encontrados, causados por la fuerza generada por el peso de la tierra desde la parte superior de la tubería. Esta fuerza deforma el tubo en una forma elíptica, denominadas deformación y deflexiones de anillo, respectivamente. Estas grandes deformaciones reducen el área de la sección transversal del flujo y crean riesgos potenciales en el transporte de fluidos y obstáculos en las pruebas. Otros factores que acompañan a las tuberías rígidas y a las tuberías de alta presión son el pandeo, las cargas sísmicas, comunes en las cordilleras andinas, esfuerzos causados por la expansión térmicas (Kishawy & Gabbar, 2010); paralelamente, existen influencias externas causadas por ataques terroristas que mediante explosiones generan deformaciones permanentes y en muchos casos derrame de hidrocarburos.

Otras anomalías encontradas corresponden a las generadas por grietas, las cuales pueden ser causadas por el proceso avanzado de corrosión o las fatigas generadas por pequeñas deformaciones continuas en la tubería. Asimismo, las grietas pueden desarrollarse en las tuberías, durante la fabricación, instalación o durante la vida útil. Hay muchas formas de agrietamiento, todas causadas por diferentes mecanismos, por lo que, la morfología del agrietamiento puede corresponder a diferentes fenómenos que simultáneamente atacan a la tubería. Así pues, es difícil identificar de forma fiable los diferentes tipos de fisuras basadas únicamente en los datos de inspección. La solución para identificar y gestionar las fisuras en las tuberías inicia con identificar las causas de fisuración con mayor detalle. Otras anomalías como las relacionadas con su estructura o denominadas por metalurgia, entre otras no identificadas corresponden al 1.7% del total, las cuales deben ser identificadas para proceder con una respuesta a su mitigación, ya que estas pueden generar otras anomalías que afectan la integridad de la tubería.

5. DISCUSIÓN

5.1 Importancia en la evaluación y gestión de calidad e integridad en las redes de transporte de hidrocarburos

La diversidad en el PIB per cápita influye considerablemente en algunos departamentos cuyos ingresos se han sostenido por la producción de recursos naturales estratégicos (RNE), obtenidos directamente de la naturaleza sin requerir mediación humana para su generación. Sin embargo, se ha construido una red de transporte de ductos y medios automotrices. A esto se suman a la fuerza de trabajo conjunta para su extracción y posterior transformación para la obtención de dividendos, al suplir la demanda interna y exportación a otros países, debido a la inflexibilidad de este bien de consumo. Consecuentemente, estos recursos han sostenido gran parte de la producción industrial del país como política pública para la obtención de fondos de inversión estatal. Aún así, posterior a la crisis petrolera mundial del 2014, la economía colombiana fue afectada considerablemente por la reducción de estas rentas y ha afectado la demanda externa, percepción de riesgo, y crecimiento económico del

país (Escuela de Economía y Finanzas Universidad EAFIT, 2019; Rojas, 2015; Toro-Córdoba et al., 2015).

No obstante, su uso sigue produciendo dividendos por el sostenimiento de la demanda interna del país y su producción se relaciona directamente con ciertas zonas geográficas específicas que han configurado una red de infraestructuras considerable. Por tal motivo, al analizar las diferentes inspecciones realizadas en el sur oriente colombiano y su ubicación geográfica, que implícitamente expone la gran demanda de recurso estratégico y, a su vez, la disposición de una oferta provista de una infraestructura existente. Al mismo tiempo, la integridad de esta estructura es soportada por la gestión de calidad mediante el mantenimiento de los medios de transporte en las difíciles condiciones meteorológicas y topográficas en la ubicación de estas redes y la implementación de las herramientas de inspección para reducir y controlar fallas generadas en cualquier punto. Esto ayuda a la mitigación de afectaciones en su funcionamiento, al reducir el impacto económico y ambiental generado y proveer continuidad en el servicio para generar condiciones socioeconómicas deseables (Papavinasam, 2017). Esto es coherente con la cantidad de evaluaciones e inspecciones encontradas, las cuales se diagraman geográficamente por departamento en la Fig. 9.

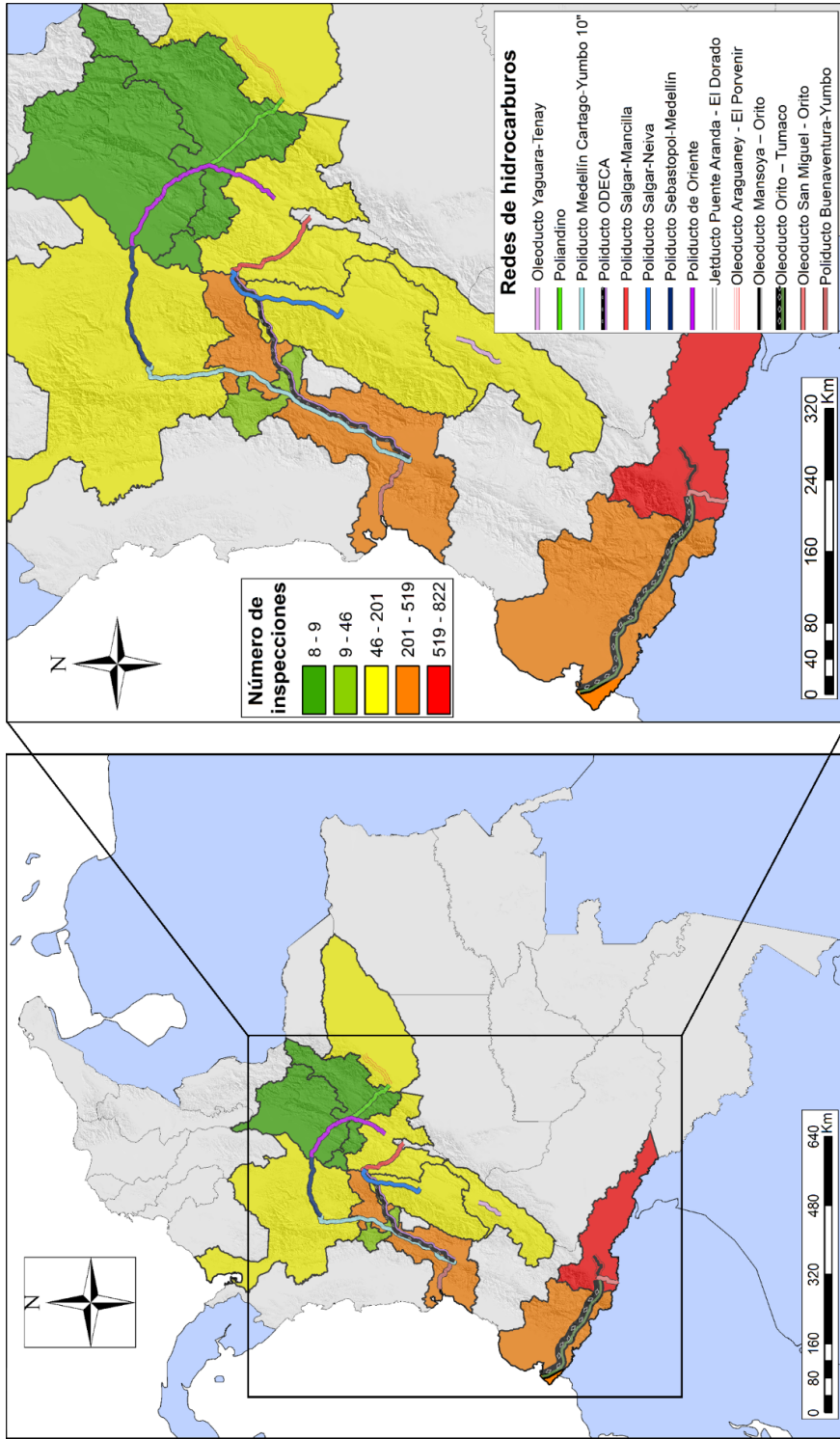


Fig. 9. Redes de transporte de hidrocarburos evaluadas.

Fuente: elaboración propia.

Por consiguiente, se reflejan mayores concentraciones de anomalías en la región pacífica y sur de Colombia, con una concentración notable en el Putumayo, al concentrar el 28,7% de estas evaluaciones de infraestructura de transporte de hidrocarburos; seguido del Valle del Cauca, con aproximadamente el 18,1 %; y Caldas en tercer lugar, con 10,8% de evaluaciones. Entre estos tres departamentos se conforman el 57,6% del total de inspecciones. Sin embargo, el contraste con el Putumayo genera solo el 0,4% del Total, en relación con la cantidad de inspecciones y lo diferencia sustancialmente con el número de anomalías identificadas. Estos resultados pueden evaluarse a partir de las condiciones topográficas y climáticas adversas a las condiciones y encrucijadas entre riqueza extractiva abundante (principalmente petróleo), pobre infraestructura, complejas condiciones geográficas y las difíciles condiciones sociales, producto del conflicto armado y el narcotráfico.

Estos factores han generado altos niveles de pobreza y rezago social e impactan en las actividades antrópicas relacionadas a procesos de inspección adecuados y contrarias a la integridad y gestión de calidad en las tuberías. Además, los efectos causados por grupos al margen de la ley han propiciado una alteración en la calidad del paisaje y en el ecosistema, provisión, regulación y soporte por el difícil acceso a la infraestructura de hidrocarburos. Esto puede generar un mayor impacto en el largo plazo, producto de la degradación y daños no detectados a tiempo (Ávila, Sambrano Sánchez, & Torres Tovar, 2014; Velásquez Arias, 2017). De manera que incrementa y dificulta las inspecciones realizadas en este punto geográfico de evaluación en relación con otros departamentos dentro de la muestra seleccionada, como se expone en la Fig. 10.

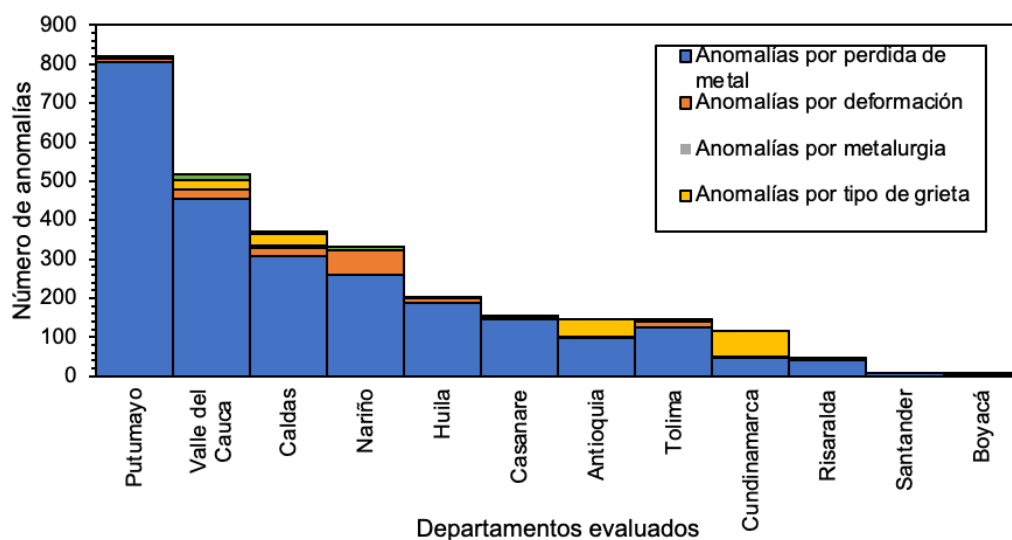


Fig. 10. Ubicación de inspección y anomalías encontradas por departamentos.

Fuente: elaboración propia.

5.2 Análisis de la pertinencia de los ensayos de inspección realizados

En las 2864 evaluaciones, de los 535 puntos de red identificados en diferentes zonas geográficas que componen el sur oriente colombiano, fue posible evaluar implícitamente la implementación de políticas en gestión de calidad para el control de integridad en tuberías. De modo que fue posible evaluar e identificar el desempeño de las técnicas implementadas para mitigar y controlar fallas causadas por el deterioro que afecta la infraestructura de transporte. Por esta razón, es posible evaluar los planes de calidad en inspección mediante la distribución en la programación o visitas de campo de inspección. Es notable una alta inspección no programada, como se observa en la Fig. 11.

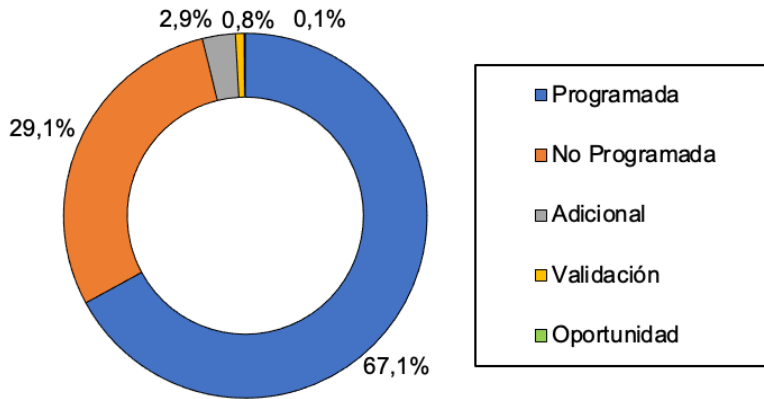


Fig. 11. Tipos de planificación de inspecciones realizadas por ILI.

Fuente: elaboración propia.

En los procesos de inspección se ilustra que una mayoría fue previamente programada y un 2,9% fue adicional. Esto permite inferir una implementación y control en la gestión en la calidad y el fomento en el uso de END como herramienta de evaluación idónea, junto con la determinación y conformidad de los entregables y adecuados resultados, gracias al procesos de monitoreo y registro de anomalías por ILI. Lo que facilitó la adecuada ejecución de actividades y el desempeño que aseguran las salidas en proyectos de inspección para la satisfacción de expectativas en los interesados (Project Management Institute, 2017). No obstante, un 29,1% manifiesta salidas no programadas, generadas cuando las anomalías impiden el buen desempeño del transporte; por ende, el sistema de calidad implementado debe propender por la disminución de tareas no programadas. Por lo cual, se dificulta por las condiciones geográficas de los sistemas de tuberías y su cruce a través de terrenos variados en topografías y condiciones ambientales difíciles, especialmente en la zona sur-oriental del territorio colombiano.

En razón de esto, el estado de estas redes cambia ampliamente a lo largo de toda su longitud y su ciclo de vida. Sin embargo, la inspección de toda la tubería mediante una metodología/herramienta de inspección específica no puede detectar los problemas de la tubería en toda su longitud, ya que las herramientas de inspección están diseñadas para detectar únicamente problemas específicos. Luego, al evaluar la gestión de

calidad, esta se relaciona con las capacidades de las empresas encargadas en la inspección de redes de transporte, junto con su método de evaluación. En la medida que estos se implementen, con mayor ímpetu, podrán responder en la disminución de situaciones inesperadas (Dey, 2004). Asimismo, esta capacidad se traduce en inversión para el fomento de la integridad en la infraestructura de transporte de hidrocarburos. Sin embargo, ha variado en los últimos diez años a causa de las fluctuaciones en la demanda de hidrocarburos y en el valor del barril de petróleo que impacta directamente en el alcance del tipo de inspección, como se manifiesta en la Fig. 12.

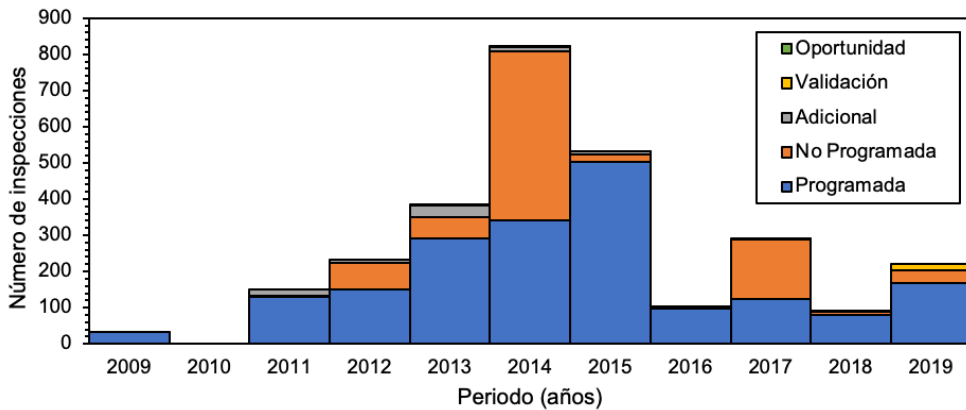


Fig. 12. Intervención implementada en la evaluación de redes de hidrocarburos entre el 2009-2019.

Fuente: elaboración propia.

Los procesos de gestión de integridad evaluados son, en su mayoría, programados y la relación de capacidades de producción con eventualidades no programadas. Lo anterior se relaciona con la solvencia financiera para formular una mayor cantidad de inspecciones en posibles eventualidades correctivas pasadas o para intervenciones mitigatorias beneficiosas para la formulación y verificación de entregables, junto con el cumplimiento de requisitos de aceptación especificados por los interesados (Iqbal et al., 2018; Song et al., 2018). La relación directa entre fuentes de financiación y mayor cantidad de inspecciones ILI se evidencia en la Fig. 12, ya que el sector minero-energético adquirió una importancia creciente para el país, al robustecer su producción y conformarse como uno de los sectores estratégicos de la economía nacional, puesto que el

transporte de petróleo y derivados representa más del 70% del sector de minas y canteras. No obstante, a partir de mediados de 2014 con la caída en el precio del petróleo se moderó drásticamente el ritmo de expansión de la implementación de técnicas de inspección por ILI (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD, 2016).

Aun así, esta actividad económica continúa su preponderancia en algunas zonas del territorio colombiano, gracias a los excedentes petroleros, generados por la demanda interna y exportaciones, especialmente provistas por la región del Putumayo (Paredes Vega & Hernández Leal, 2013). Esto se relaciona directamente con las fuentes de inversión del SGR, según se establece en la Ley 1530 de 2012 (Congreso de la República de Colombia, 2012) por el impuesto de transporte de aquellos tramos de oleoductos y gasoductos que atraviesen únicamente la jurisdicción de municipios productores de hidrocarburos, la distribución entre municipios no productores del mismo departamento o sus jurisdicciones sean atravesadas por otros tramos de oleoductos, en proporción a su longitud. A pesar de esto, el impacto en los precios internacionales ha reducido las inspecciones hasta un 87%.

Por lo demás, las futuras evaluaciones solo pueden responder a anomalías avanzadas que generarían fallas totales y no permitirían el transporte de hidrocarburos y una reducción en la generación de dividendos directos para los municipios, junto al impacto ambiental desatado. Así pues, los riesgos causados por las difíciles condiciones geográficas y de orden público que esta zona del país integra, se contrarrestan con la identificación de zonas con mayor propensión a sufrir este tipo de anomalías y generar políticas de gestión de calidad focalizadas (Paredes Vega & Hernández Leal, 2013). La evaluación de regiones, ilustrada en la Fig. 13, permite la identificación de zonas claves en concordancia con el mantenimiento y servicio, mediante al evaluación de integridad en tuberías para mitigar la generación de dividendos que nutren el SGR y, a su vez, proyectos de inversión.

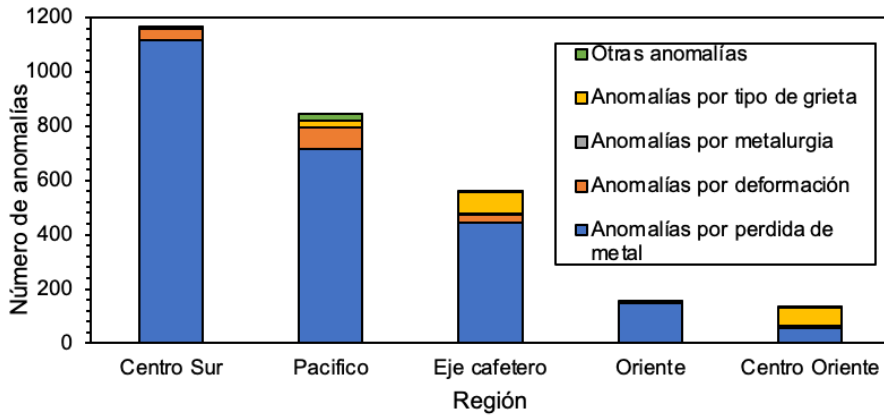


Fig. 13. Anomalías encontradas en las regiones por método III.

Fuente: elaboración propia.

Esto sustenta y robustece la necesidad de implementar acciones para incrementar la vida útil de la infraestructura destinada al transporte de hidrocarburos y atender con especificidad las zonas de mayor importancia estratégica. Con base en la cantidad de anomalías identificadas, relacionadas con condiciones externas e internas que afectan las tuberías y las gestiones de calidad, es posible brindar continuidad en el servicio, a partir de los planes de gestión. Esto permite predecir complicaciones incrementales en el tiempo o generar acciones de mitigación en la red de hidrocarburos por técnica de inspección, que establecen acciones de corrección, como se expone en la Fig. 14.

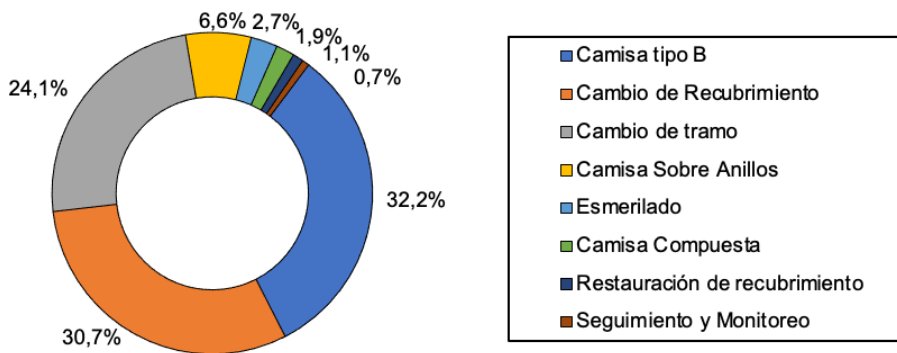


Fig. 14. Tipo de atención sugerida mediante evaluación III.

Fuente: elaboración propia.

La Fig. 14 expone la variedad de propuestas posterior a la evaluación en campo a través de inspecciones ILI. Estos resultados permiten la generación de un programa eficaz en la gestión de la integridad de tuberías al considerar maximizar la disponibilidad de las mismas a un costo mínimo sin comprometer las normas legislativas y de seguridad (Singh & Markeset, 2009). Por esto, las revisiones estructuradas concluyen en brindar una solución que permita proporcionar soluciones permanentes o aumentar el tiempo de vida de la infraestructura para transporte de hidrocarburos de conformidad con los requisitos técnicos y de calidad, sin reclamaciones posteriores (Project Management Institute, 2017).

En razón de lo expuesto, las mayores propuestas en atender las anomalías encontradas por método ILI se relacionan con la búsqueda de soluciones a largo y mediano plazo, en especial las de mayor demanda como las camisas tipo B, implementadas anomalías con pérdidas de metal causadas por corrosión interna o externa, defectos con pérdida de espesor y deformaciones o daños mecánicos que no presenten fisuras. Estas consideraciones permiten reparar permanentes de contención de presión, ya que estas camisas incluyen costura longitudinal y soldadura circunferencial en filete de sus extremos. Además, los cambios de recubrimiento son 1/3 parte de las medidas de corrección y proporcionan a la tubería un reemplazo a tramos degradados por agentes del exterior o interior de la tubería. Conjuntamente, los cambios de tramo reflejan un estado avanzado del daño en la red de transporte y requieren medidas invasivas que detienen el flujo de hidrocarburos temporalmente para la realización de corte y empalme para los diámetros, espesores de tubería y restituir la condición operativa y/o diseño del sistema.

En total, las tres metodologías para atender las anomalías suman un 87% de atenciones sugeridas en concordancia con una reparación sólida a mediano y largo plazo, en especial para evitar o mitigar situaciones que requieren paralizar temporalmente el flujo de hidrocarburos, al denotar que dichas actuaciones se generan en un estado avanzado de daño y, por consiguiente, se debe propender por reducir estas anomalías por detección temprana del mismo. Dadas las complejas condiciones externas, los procesos de gestión de calidad están enfocados en atender rápidamente dichos fenómenos (Ecopetrol, 2007, 2013, 2014). Entonces, el 13% de las recomendaciones restantes obedecen a cambios puntualizados en estados

no críticos, en su mayoría, y denota una solución temprana a los eventos que posteriormente podrían desencadenar soluciones de mayor costo. Así, es posible sostener que el tipo de evaluaciones buscan corregir el problema en lugar de prevenirlo. No obstante, se observa que una gran parte de los sistemas de transporte de hidrocarburos difieren según su ubicación geográfica, como se muestra en la Fig. 15.

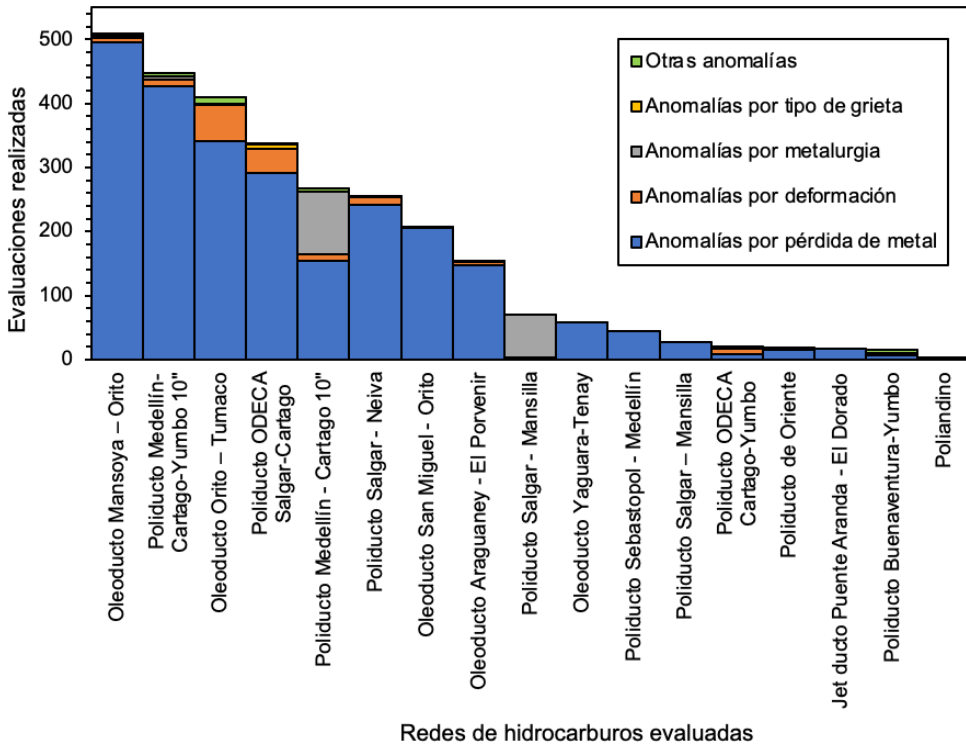


Fig. 15. Evaluación de anomalías por sistemas de red evaluados.

Fuente: elaboración propia.

La Fig. 15 expone una relación directa entre la cantidad de evaluaciones e inspecciones realizadas, junto con las complejas condiciones de orden público, socioeconómicas y ambientales que impactan directamente la integridad de la infraestructura de transporte evaluadas. Dada su representatividad, se infiere el tipo de daño generado y las acciones correctivas propuestas. Además, este enfoque conduce a su focalización y búsqueda de mejorar las gestiones de calidad para el correcto y permanente funcionamiento de los oleoductos ubicados en el

sur-oriente colombiano. De modo que las condicionantes que embeben la cantidad de inspecciones realizadas se relacionan con la operación de ductos e implicaciones del contexto particular colombiano, ya que las condiciones tropicales de humedad, reducción de inversión para su constante inspección y limitantes geográficas y topográficas del entorno complejizan la implementación adecuada de una gestión de calidad e integridad tendiente a la eficiencia y reducción de costos.

De la misma forma, el histórico conflicto armado que ha generado irregulares condiciones de orden público y dinámicas asociadas con delincuencia común y organizada hacen del transporte de hidrocarburos un objetivo susceptible a actividades ilegales. Entonces, las acciones de terceros a este tipo de infraestructura, como atentados terroristas y robo, han sido una constante en algunos de los sistemas de transporte del país en coherencia con los ductos de hidrocarburos evaluados (Ávila et al., 2014; Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) & Unión Temporal PLAN-IN-Planeación Inteligente SAS y SA&S – Soluciones Ambientales y Sociales, 2017).

6. CONCLUSIONES

Gracias a la presente investigación, fue posible establecer la gestión de calidad integrada en las técnicas y análisis de monitoreo mediante la implementación de inspecciones In Line Inspection (ILI), como ensayos no destructivos y sin afectar el continuo flujo y funcionamiento de las redes de transporte de hidrocarburos en el sur-oriente colombiano; y el establecimiento de una zona de estudio representativa, con el fin de estimar el impacto de estas tecnologías en gestión de calidad e integridad. Lo que permite generar confianza y continuidad en el servicio en un contexto socioeconómico y geográfico complejo.

Esto permitió relacionar las fuentes de anomalías con la dependencia de fenómenos económicos mundiales y nacionales que afectan directamente la inversión en inspecciones. No obstante, la implementación de estos ensayos en la gestión de calidad e integridad ha permitido medir, identificar y registrar irregularidades en las tuberías evaluadas y evidenciar la clasificación de las principales fallas encontradas para la generación de

soluciones específicas a las anomalías de corrosión, grietas, deformaciones u otros defectos, identificados mediante la implementación de estándares y soluciones focalizadas para requerimientos específicos, reducción de costos, prevención de daños al medio ambiente y el soporte de proyectos futuros.

Estas evaluaciones evidencian medidas correctivas a desperfectos que requieren soluciones que interfieren en el continuo flujo de hidrocarburos y generan gastos económicos elevados. Sin embargo, en el programa de gestión de calidad y riesgo, es posible formular los intervalos de inspección adecuados, acciones de mantenimiento y reparación, junto con la estimación de cambios o actualizaciones de las acciones en los procesos de planificación para inspección de tramos de red, la evaluación del estado de las anomalías, para lograr una predicción precisa de los mismos y optimizar los costos de forma eficaz. Por tal razón, se debe propender por aplicar medidas preventivas a través de la identificación temprana de defectos para la implementación de un sistema de gestión de calidad idóneo y un adecuado control de ensayos realizados a fines con las anomalías presentadas, para eliminar o reducir riesgos identificados en unión con los planes de la organización.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aire, G. E., & Chimezie, H. N. (2016). Comparison of Non-Destructive and Destructive Examinations in Today ´ s Inspection Practices. *19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016*, 3–7. Retrieved from <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>
- Andalucía, F. (2011). Ensayos no destructivos en la soldadura. *Revista Digital Para Profesioanles de La Enseñanza*, 13, 1–13. Retrieved from <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8259.pdf>
- Asociation for Project Management. (2019). *APM Body Of Knowledge* (7th editio). Buckinghamshire, England, United Kingdom: Association for Project Management.
- Avila, A. F., Sambrano Sánchez, E., & Torres Tovar, C. (2014). *Departamento de Putumayo*. Bogotá, D.C: Fundación Paz y Reconciliación.

- Bruschi, R., Vitali, L., Marchionni, L., Parrella, A., & Mancini, A. (2015). Pipe technology and installation equipment for frontier deep water projects. *Ocean Engineering*, 108(November), 369–392. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.08.008>
- Campbell, J. E., & Michael, S. (2012). *Geographic Information System Basics*. 248. Retrieved from <http://2012books.lardbucket.org/pdfs/geographic-information-system-basics.pdf>
- Christen, R., Bergamini, A., & Motavalli, M. (2009). Influence of steel wrapping on magneto-inductive testing of the main cables of suspension bridges. *NDT and E International*, 42(1), 22–27. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.08.003>
- Congreso de la República de Colombia. *Ley 1530 del 17 de mayo de 2012, Por la cual se regula la organización y el funcionamiento del Sistema General de Regalías.*, 66 § (2012).
- Contraloría General de la República. (2016). El impacto de la crisis petrolera en los ingresos del Gobierno Nacional Central - GNC. *Boletín Macro Fiscal*, 16, 1–4.
- Delgado, M., & Pérez, C. (2018). *Proyecciones de actividad económica regional 2017-2021*. Bogotá, D.C.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística –DANE. (2017). *Producto Interno Bruto por departamento, Base 2015*. Bogotá, D.C.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística –DANE. (2019). *Producto Interno Bruto desde el enfoque de la producción a precios constantes*. Retrieved from www.bcn.gob.ni/estadisticas/sector_real/produccion/1-3.xls
- Dey, P. K. (2004). Decision support system for inspection and maintenance: A case study of oil pipelines. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 51(1), 47–56. <https://doi.org/10.1109/TEM.2003.822464>
- Ding, L., Li, K., Zhou, Y., & Love, P. E. D. (2017). An IFC-inspection process model for infrastructure projects: Enabling real-time quality monitoring and control. *Automation in Construction*, 84, 96–110. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.029>
- Dueñas, M. C., Sepúlveda, H., & Vera, E. (2009). Metodología para el aseguramiento del riesgo por corrosión externa en ductos ente-

- rrados. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 1(3), 1327–1337.
- Dwivedi, S. K., Vishwakarma, M., & Soni, P. A. (2018). Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3690–3698. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.620>
- Ecopetrol. (2007). *Reparación mecánica y cambio de revestimiento en tubería enterrada*. Bogotá, D.C.
- Ecopetrol. (2013). *Reparación mecánica mediante instalación de camisas tipo B*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Ecopetrol. (2014). *Procedimiento de corte y empalme de líneas de transporte de hidrocarburos transporte*. Bogotá D.C.
- Escuela de Economía y Finanzas Universidad EAFIT. (2019). *Economía Colombiana, Análisis de coyuntura*. Medellín, Colombia.
- Gabetta, G., Pagliari, F., & Rezgui, N. (2018). Hydrogen Embrittlement in pipelines transporting sour hydrocarbons. *Procedia Structural Integrity*, 13, 746–752. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.12.124>
- Infrastructure and Projects Authority. (2018). *Analysis of the National Infrastructure and Construction Pipeline*. London, UK: Crown copyright.
- International Monetary Fund (IMF). (2019). *World Economic Outlook, Weakening of global expansion*. Davos, Switzerland.
- Iqbal, H., Waheed, B., Tesfamariam, S., & Sadiq, R. (2018). IMPAKT: Oil and gas pipeline integrity management program assessment. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 9(3), 1–7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000326](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000326)
- Johnson, B., Tesfaye, B., Wargacki, C., Hennig, T., & Suárez, E. (2018). Complex circumferential stress corrosion cracking - Identification, sizing and consequences for the integrity management program. *Proceedings of the Biennial International Pipeline Conference, IPC*, 1, 1–8. <https://doi.org/10.1115/IPC201878564>
- José Maya Villazón, E., Alonso Másmela, G., Rodríguez Yee, R., Eduardo Espinosa Velásquez Luis Helder Bejarano Velásquez, C., Enrique Guzmán Silva Asesor Despacho Vicecontralora General, O., & Adolfo Patiño Forero Diseño Diagramación, N. (2017). Boletín Autosuficiencia petrolera en Colombia. *Boletín Macro Sectorial*, 2(6), 1–6. Retrieved from <https://>

- www.contraloria.gov.co/documents/463406/484739/Boletín+Macrosectorial+No.+06+%28pdf%29/f01dfce0-493c-423a-9148-244fce46edc1?version=1.2
- Kishawy, H. A., & Gabbar, H. A. (2010). Review of pipeline integrity management practices. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 87(7), 373–380. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2010.04.003>
- Koch, G., Varney, J., Thopson, N., Moghissi, O., Gould, M., & Payer, J. (2016). *International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study*. Retrieved from <http://impact.nace.org/>
- Koch, Gerhardus. (2017). Cost of corrosion. In *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies: Production and Transmission* (pp. 3–30). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00001-2>
- Mejía Aguilar, G., & Hernández, T. C. (2007). Seguimiento de la productividad en obra: técnicas de medición de rendimientos de mano de obra. *UIS Ingenierías*, (2), 45–59.
- Melo Becerra, L. (2017). El gasto público en Colombia: Algunos aspectos sobre su tamaño, evolución y estructura. *Borradores de Economía*, 1003(June), 1–44.
- Ministerio de Minas. (2016). *Política Minera de Colombia, Bases para la minería del futuro*. <https://doi.org/10.1080/08831157.2012.626378>
- Myers, D. (2017). *Construction Economics a new approach* (Fourth ed.; Routledge, ed.). London and New York: Taylor & Francis Group.
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Oppong, G. D., Chan, A. P. C., & Dansoh, A. (2017). A review of stakeholder management performance attributes in construction projects. *International Journal of Project Management*, 35(6), 1037–1051. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2017.04.015>
- Pacana, A., & Siwiec, D. (2021). Analysis of the Possibility of Used of the Quality Management Techniques with Non- Destructive Testing. *Technical Gazette*, 28(1), 45–51.
- Pachón Pedraza, N. A., Perdomo Montealegre, J. I., & Rodríguez Serrezuela, R. (2018). Feasibility Analysis for Creating a Metrology Laboratory Serving the Agribusiness and Hydrocarbons

- in the Department of Huila, Colombia. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(6), 3373–3378.
- Papavinasam, S. (2017). Corrosion management. In *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies: Production and Transmission*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00003-6>
- Paredes Vega, J. E., & Hernández Leal, G. H. (2013). Composición de la economía de la región suroriente de Colombia. *Ensayos sobre Economía Regional*, 51, 1–47. Retrieved from http://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/eser_51_suro-riente_2013.pdf
- Pérez, N. (2004). *Electrochemistry and corrosion science*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Peuquet, D. J., & Marble, D. F. (1990). *Introductory readings in Geographic Information Systems*. Bristol, PA: Taylor & Francis Inc.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD. (2016). *La competitividad del sector de hidrocarburos en las diferentes regiones de Colombia*.
- Project Management Institute. (2017). *Guía de los FUNDAMENTOS PARA LA DIRECCIÓN DE PROYECTOS (Guía del PMBOK®)* (Project Ma; I. Project Management Institute, ed.). Newtown Square, Pennsylvania: PMI Book Service Center.
- Project Management Institute (PMI). (2017). *Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Guía del PMBOK)* (I. Project Management Institute, ed.). Retrieved from info@bookorders.pmi.org
- Ramírez, J. M., Bedoya, J. G., & Díaz, Y. (2016). Geografía económica, descentralización y pobreza multidimensional en Colombia. *Cuadernos de Fedesarrollo*, (54), 1–114. Retrieved from <https://www.repository.fedesarrollo.org.co/handle/11445/2894%0Ahttp://www.repository.fedesarrollo.org.co/handle/11445/2894>
- Razzak Rumane, A. (2021). *Quality Management in Oil and Gas Projects*. Boca Raton, FL: CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, LLC Te.
- Rojas, D. M. (2015). La región andina en la geopolítica de los recursos estratégico. *Análisis Político*, 83 (enero-abril), 88–107.

- Sarmiento-Rojas, J.-A., González-Sanabria, J. S., & Hernández Carrillo, C. G. (2020). Analysis of the impact of the construction sector on Colombian economy. *Tecnura*, 24(66), 109–118. <https://doi.org/10.14483/22487638.16194>
- Singh, M., & Markeset, T. (2009). A methodology for risk-based inspection planning of oil and gas pipes based on fuzzy logic framework. *Engineering Failure Analysis*, 16(7), 2098–2113. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.02.003>
- Song, H., Yang, L., Liu, G., Tian, G., Ona, D., Song, Y., & Li, S. (2018). Comparative Analysis of In-line Inspection Equipments and Technologies. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 382(3), 0–7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/382/3/032021>
- Sun, Y., Kang, Y., & Qiu, C. (2011). A new NDT method based on permanent magnetic field perturbation. *NDT and E International*, 44(1), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2010.01.007>
- Toro-Córdoba, J. H., Garavito-Acosta, A. L., López-Valenzuela, D. C., & Montes-Uribe, E. (2015). El choque petrolero y sus implicaciones en la economía colombiana. *Borradores de Economía*, 906. Retrieved from: <http://repositorio.banrep.gov.co/handle/20.500.12134/6217>
- Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), & Unión Temporal PLAN-IN-Planeación Inteligente SAS y SA&S – Soluciones Ambientales y Sociales. (2017). *EAE de los escenarios de expansión de transporte de hidrocarburos - PIAPC*. Bogotá, D.C: UT Plan-IN – SA&S.
- Vanaei, H. R., Eslami, A., & Egbewande, A. (2017). A review on pipeline corrosion, in-line inspection (ILI), and corrosion growth rate models. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 149(Ili), 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.11.007>
- Velásquez Arias, J. A. (2017). Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Revista de Investigación Agraria y Ambienta*, 8(1), 151–167.
- Wang, L. C. (2008). Enhancing construction quality inspection and management using RFID technology. *Automation in Construction*, 17(4), 467–479. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2007.08.005>

- World Bank Group. (2019). *Global Economic Prospects, June 2019: Heightened Tensions, Subdued Investment*. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1398-6>
- Xie, M., & Tian, Z. (2018). A review on pipeline integrity management utilizing in-line inspection data. *Engineering Failure Analysis*, 92(May), 222–239. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.05.010>
- Xiong, X., Adan, A., Akinci, B., & Huber, D. (2013). Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data. *Automation in Construction*, 31, 325–337. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.10.006>