

IPG2025-012

**ALERTAS TEMPRANAS PARA LA INTEGRIDAD DE DUCTOS EXPUESTOS A
MOVIMIENTOS GEOTÉCNICOS LENTOS: UN ENFOQUE BASADO EN ANÁLISIS DE
DESPLAZAMIENTO Y CRITERIOS DE STRAIN CAPACITY**

Paula Rodríguez
Bending Strain Expert
PENSPEN
Bogotá, Colombia

Camilo Torres
Technical Manager
PENSPEN
Bogotá, Colombia

Oscar Gualdrón
Cenit Transporte y Logística de
Hidrocarburos
Bogotá, Colombia

ABSTRACT

En Colombia, los sistemas de transporte de hidrocarburos frecuentemente cruzan terrenos con alta susceptibilidad a movimientos geotécnicos inestables. Estas condiciones provocan cambios en el alineamiento y deformaciones de las tuberías, comprometiendo continuamente su integridad estructural.

Los movimientos con tasas de desplazamiento bajas o muy bajas son particularmente críticos por ser imperceptibles a simple vista e incluso desde el monitoreo con herramientas inerciales. Esta condición complica significativamente la gestión y planificación proactiva del mantenimiento.

Este escenario exige enfoques innovadores para asegurar la integridad de los ductos y facilitar un mantenimiento preventivo y eficaz. Una estrategia clave es definir límites de desplazamiento seguros, correlacionados con la capacidad de deformación por flexión admisible de la tubería (Strain Capacity).

La metodología aquí propuesta utiliza datos de al menos dos inspecciones inteligentes sucesivas (ILI con módulo inercial) para construir un campo de desplazamientos detallado del ducto. Este análisis comparativo permite identificar puntos críticos con alta concentración de deformaciones y localizar cambios precisos en los alineamientos horizontal y vertical de las secciones evaluadas.

A partir de este campo de desplazamientos entre inspecciones, es posible proyectar el cambio en el alineamiento futuro de la tubería (respuesta geométrica). Crucialmente, se establece una correlación entre los desplazamientos acumulados y la capacidad de deformación admisible (Strain Capacity). Esto permite definir umbrales de desplazamiento que sirven como

alertas tempranas, monitoreables mediante mediciones directas e indirectas en campo.

Este trabajo presenta una metodología, fundamentada en el análisis posicional derivado de inspecciones ILI, para definir umbrales de alerta temprana ante movimientos lentos del terreno que afectan a ductos en zonas de baja o muy baja velocidad de desplazamiento.

NOMENCLATURA

AZIMUTH: Ángulo que caracteriza una dirección o un vector respecto de una dirección de referencia (usualmente el Norte Verdadero) en un plano horizontal. El azimuth se indica normalmente en grados, de 0 a 360 y siempre se mide en sentido de las agujas del reloj.

DEFORMACIÓN: Cambios en una dimensión característica de una estructura generados por esfuerzos internos o externos. Cuando la deformación es axial, ésta se denota por la letra griega ϵ . Para el caso de deformación lineal, $\epsilon = \Delta L / L$, siendo L la longitud original de la estructura y ΔL el cambio generado. La deformación ϵ es un valor adimensional; por lo general las unidades son en microstrain o como un porcentaje.

DEFORMACIÓN POR CURVATURA (Bending Strain): Deformación en la fibra externa de la tubería inducida por un proceso de curvado (flexión). Se determina o calcula con base en la información del mapeo inercial de las inspecciones inteligentes y monitoreos topográficos, en la búsqueda de deformaciones a lo largo de la tubería en estudio.

DEM: Modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo

DSM: El Modelo Digital de Superficie, representa las elevaciones sobre el nivel del mar de las superficies incluidos los elementos como árboles, edificios, construcciones, entre otros, muestra la superficie del terreno junto con las características elevadas sobre los mismos elementos.

DTM: Modelo Digital del Terreno, en este no se presentan elementos elevados solo el terreno.

Derecho de Vía (DDV): Es la franja de terreno, con un ancho determinado, a lo largo del corredor, sobre la cual se tiene derecho de servidumbre y que sirve de vía para todos los efectos de mantenimiento.

ILI: Inspección en línea de tubería mediante una herramienta instrumentada desde el interior del tubo.

IMU: Es un dispositivo electrónico, que mide e informa acerca de la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales de un aparato, usando una combinación de acelerómetros y giróscopos.

IVDDV: Inspección visual del derecho de vía

MOVIMIENTO DE LA TUBERÍA: Es el desplazamiento de la tubería medido a partir de dos o más inspecciones ILI, bajo parámetros de cambio en deformación, elongación y cambio en la posición de la tubería de acuerdo con el mapeo inercial.

PITCH: Ángulo que indica una desviación en la dirección vertical con respecto del plano que es ortogonal al vector tangente de la línea de centro de la tubería

RADIOS DE CURVATURA: Describen los ángulos de la curva en una tubería. A menor radio de curvatura, mayor es la deformación a flexión.

STRAIN CAPACITY: Es la máxima deformación que una tubería puede soportar sin fallar, es decir, sin agrietarse ni romperse, cuando está sometida a esfuerzos como flexión, compresión o tracción. Se mide normalmente como una deformación unitaria (strain), expresada en porcentaje (%), e indica cuánto puede alargarse o comprimirse el material antes de perder su integridad estructural.

SUSCEPTIBILIDAD: Aquello que está potencialmente dispuesto a modificarse o evolucionar ante eventuales circunstancias naturales o antrópicas.

1. INTRODUCTION

En Colombia, la geomorfología está marcada por la presencia de tres grandes cordilleras andinas: la Occidental, la Central y la Oriental, que atraviesan el país de sur a norte. Estas formaciones montañosas presentan elevadas pendientes y una compleja estructura geológica, lo que incrementa significativamente la

susceptibilidad del terreno a movimientos en masa. Muchos de estos movimientos son de tipo lento o muy lento, lo que los hace imperceptibles a simple vista y genera una aparente estabilidad superficial.

Estos movimientos se pueden presentar de manera silenciosa y progresiva, incrementando su tasa de movimiento debido a factores contribuyentes como la alta pluviosidad, la deforestación, el cambio en el uso del suelo y otras intervenciones antrópicas. Esta combinación de condiciones naturales y actividades humanas convierte a muchas regiones del país en zonas de alta susceptibilidad a movimientos del terreno.

Estos fenómenos pueden inducir desplazamientos en la tubería debido a fuerzas externas adicionales (axiales, compresión y flexión) y dependiendo del alineamiento del ducto y características específicas del movimiento del terreno presentaría afectaciones en la tubería relacionados con cambios en perfil de deformaciones, deformaciones de diámetro e inclusive pérdidas de contención. Como menciona (Wilde & Gómez, 2023), tuberías sujetas a deformación por curvado son afectadas por deformaciones compresivas en la parte interna del ducto y deformaciones de tensión en la parte externa de la tubería de acuerdo con el alineamiento tubo-suelo.

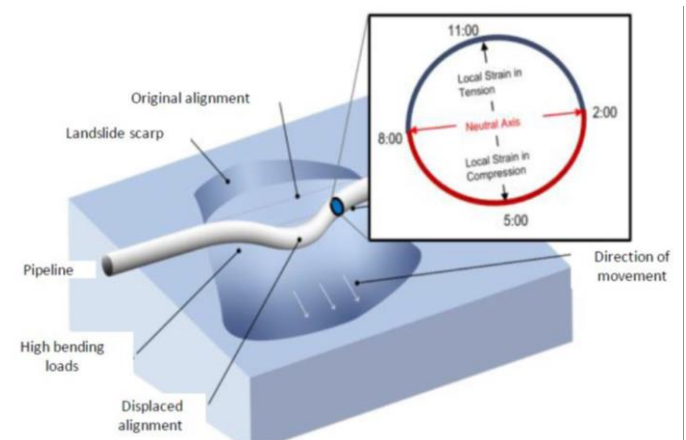


FIGURA 11. Respuesta de tubería ante un proceso de inestabilidad transversal. Ubicación de estado de deformaciones con respecto a la dirección del movimiento del terreno Fuente: (Wilde & Gómez, 2023)

Por ende, la identificación y delimitación de los sectores que presentan movimientos en la tubería detectados mediante corridas ILI o inspecciones visuales del derecho de vía constituyen un componente clave para comprender el comportamiento del sistema suelo-tubería.

Estos movimientos, pueden tener diferentes tasas de desplazamiento desde muy bajas con valores menores a 0.06 m/año hasta muy altas relacionadas con procesos súbitos con valores de 3 m/s; Los procesos con tasas de desplazamiento bajas o muy bajas, son particularmente críticos debido a su carácter

imperceptible en superficie a simple vista (sin evidencia en la inspección visual al derecho de vía), lo cual, dificulta la planificación preventiva del mantenimiento.

Una vez identificados estos sectores con movimiento y tasas de desplazamiento bajas a muy bajas, es necesario realizar un alineamiento entre los datos obtenidos en inspecciones ILI históricas y las topografías del ducto, soportándose con el resultado de la inspección visual al derecho de vía; determinando los desplazamientos acumulados y las tasas de movimiento (por año o entre corridas ILI) del ducto a lo largo del tiempo, lo cual, permite comprender el comportamiento suelo-tubería a lo largo del tiempo y, con base en ello, definir la tasa de movimiento que mejor representa el desplazamiento del ducto en cada sector.

Lo anterior, permite construir un campo de desplazamientos y realizar un análisis prospectivo del comportamiento del ducto, el cual consiste en proyectar un posible alineamiento futuro como respuesta geométrica ante las cargas externas. Esta proyección parte del supuesto de que la tubería mantendrá una tasa de desplazamiento constante en el tiempo.

Con base en este alineamiento proyectado, se correlacionan los desplazamientos acumulativos estimados con la capacidad de deformación admisible (*Strain Capacity*) del ducto. Esta comparación permite identificar posibles excedencias en la capacidad estructural y así definir planes de mantenimiento para futuras vigencias.

El análisis de desplazamiento proyectado permite definir una posible posición futura del ducto, a partir de la cual se derivan los posibles perfiles de deformación asociados. Estos perfiles representan la respuesta estructural del ducto ante los desplazamientos acumulativos estimados y son evaluados conforme a los criterios de strain capacity. Esto permite definir umbrales de desplazamiento (de acuerdo con el nivel de deformación proyectado) que sirven como alertas tempranas, y pueden ser monitoreados en campo, verificados y validados con la siguiente corrida ILI.

Esta estrategia constituye una herramienta para la planificación del mantenimiento preventivo, ya que permite anticipar posibles escenarios a través del análisis de desplazamientos proyectados, es posible identificar umbrales de atención, es decir, niveles de desplazamiento a partir de los cuales la deformación inducida en el ducto podría superar los criterios normativos de strain capacity. De este modo, se facilita la toma de decisiones proactivas orientadas a una estrategia basada en el monitoreo continuo de las zonas críticas con técnicas tales como levantamientos topográficos, análisis mediante ortofotomosaicos georreferenciados, tecnología Lidar, entre otras herramientas de alta precisión.

A partir de esta evaluación, se determinan las acciones correctivas o de mantenimiento necesarias, en función del grado de afectación identificado con respecto a los umbrales

previamente establecidos, lo cual permite priorizar y optimizar intervenciones.

La metodología general de aplicación del presente análisis se esquematiza en la siguiente figura y se explica en detalle a continuación:

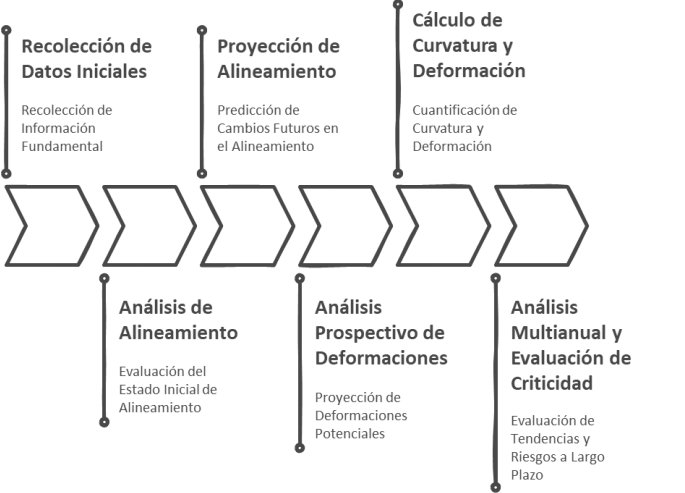


FIGURA 2. Proceso general de análisis de cambios de strain y alineamiento.

2. Materiales y Métodos

2.1 Premisas

Este análisis es aplicable exclusivamente a sectores en monitoreo que han presentado movimientos del terreno clasificados como lentos o muy lentos, según lo indicado en la TABLA 1. En zonas donde se evidencian movimientos con tasas de velocidad superiores, esta estrategia no resulta adecuada, debido a la incertidumbre asociada a la respuesta geométrica del ducto frente a cargas dinámicas o aceleradas.

Adicionalmente, el enfoque no debe aplicarse en sectores que presentan evidencia directa de inestabilidad superficial, como grietas visibles, escarpes o deformaciones significativas en el terreno. Estas condiciones requieren intervenciones inmediatas y la aplicación de metodologías de evaluación más específicas y distintas.

Clase	Descripción	Desplazamiento	Poder Destructor
7	Extremadamente rápida	5 m/seg.	Catástrofe de violencia mayor; edificios destruidos por el impacto o el material desplazado, muchas muertes, escape improbable.
6	Muy rápida	3 m/ min.	Alguna pérdida de vidas; velocidad demasiado alta para permitir a todas las personas escapar.
5	Rápida	1.8 m/hora	Escape posible; estructuras, propiedades y equipos destruidos.

Clase	Descripción	Desplazamiento	Poder Destructor
4	Moderada	1.3 m/mes	Algunas estructuras temporales y poco sensitivas pueden mantenerse temporalmente.
3	Lenta	1.6 m/año	Construcciones remediales se pueden realizar durante el movimiento. Algunas estructuras insensitivas pueden mantenerse con mantenimiento frecuente.
2	Muy lenta	16 mm/año	Algunas estructuras permanentes no son dañadas por el movimiento.
1	Extremadamente lenta		Movimientos imperceptibles sin instrumentos; posible construcción, pero teniendo ciertas precauciones.

TABLA 1. Velocidad de los movimientos (Adaptado de Cruden, Varnes-1996).

Las siguientes premisas deben cumplirse para realizar este tipo de análisis:

- El sector debe encontrarse dentro de los límites normativos de deflexión por curvatura establecidos para la tubería.
- Debe existir evidencia de movimiento en la tubería, reportada a través de inspecciones ILI o monitoreos topográficos.
- El terreno debe presentar movimientos lentos o muy lentos, sin manifestaciones superficiales abruptas.

2.2 Datos Iniciales

Se cuenta con información inercial proveniente de al menos dos corridas ILI, o en su defecto, con datos equivalentes obtenidos mediante levantamientos topográficos de alta precisión. Esta información es esencial para realizar un análisis comparativo entre diferentes momentos en el tiempo.

Contar con al menos dos sets de datos, permite comparar trayectorias y detectar variaciones en el alineamiento de la tubería, lo que a su vez posibilita cuantificar el desplazamiento acumulado del ducto a lo largo del tiempo. A partir de esta comparación, se calcula la tasa de desplazamiento para cada intervalo entre inspecciones.

Este análisis permite determinar la tasa de movimiento crítica, es decir, aquella que representa el mayor desplazamiento o que refleja el comportamiento del terreno.

Dicho lo anterior, el análisis comienza con el alistamiento y validación de la información histórica, proveniente de los sets de datos existentes (al menos dos corridas ILI o, en su defecto, de levantamientos topográficos de alta precisión).

Posteriormente, se realiza la identificación de los sitios de interés que cumplan con las premisas establecidas, tales como encontrarse dentro de los límites normativos de deflexión por curvatura (strain capacity), presentar indicios de movimiento,

detectados mediante corridas ILI o inspecciones visuales del derecho de vía. y registrar tasas de desplazamiento bajas o muy bajas.

El listado de sitios de interés se construye a partir de diferentes fuentes de información, incluyendo los sectores reportados por los proveedores ILI en sus análisis de Bending strain (BS) y pipeline Movement (PM), los sitios identificados durante la inspección visual del derecho de vía (IVDDV), así como aquellos sitios históricos donde se ha registrado desplazamiento de la tubería como consecuencia de cargas externas asociadas a procesos de inestabilidad.

Los sitios de interés son evaluados mediante una metodología que se basa en la comparación entre la deformación máxima observada y el strain capacity calculada para cada sector. Esta evaluación permite determinar el nivel de criticidad de cada tramo y, en función de ello, definir el plan de acción más adecuado para mitigar la condición identificada (ver FIGURA 3FIGURA).

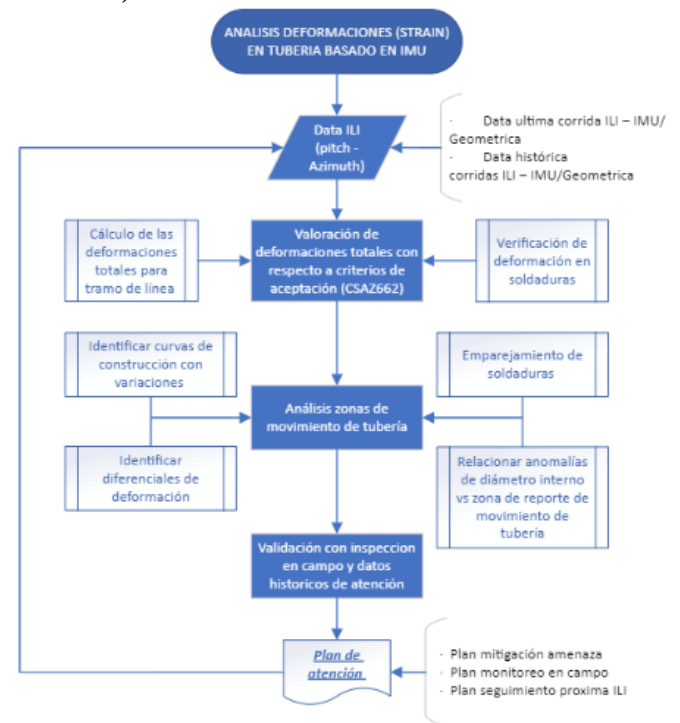


FIGURA 3. Proceso análisis deformaciones basado en data IMU

Dentro de la metodología descrita, se realiza una proyección lineal del punto de máxima deformación reportada por el proveedor, con el fin de estimar su posible evolución a futuro. Esta proyección se evalúa en función del strain capacity de la tubería, permitiendo anticipar escenarios en los que la deformación podría superar los límites admisibles (ver FIGURA 5).

El valor de deformación proyectada se determina a partir del seguimiento histórico de las deformaciones (ver FIGURA 4),

mediante el cálculo del diferencial de deformación del punto entre los distintos periodos de inspección, identificando la tasa de incremento o velocidad de deformación del ducto.

$$\dot{\varepsilon}_T = \frac{\Delta \varepsilon_T}{\Delta t} \quad (1)$$

Donde:

$\Delta \varepsilon_T$ = Diferencia entre las deformaciones totales entre corridas en %

ΔT = Tiempo entre corridas en años

$$\varepsilon_T^* = \varepsilon_T + \Delta t * \dot{\varepsilon}_T \quad (2)$$

A partir de esta proyección, es posible anticipar el comportamiento futuro de la tubería, bajo el supuesto de que las condiciones actuales se mantengan constantes. Esto permite estimar las condiciones en las que podrían superarse los límites admisibles de deformación estructural (strain capacity).

Esta evaluación resulta fundamental para la toma de decisiones oportunas respecto a posibles intervenciones o medidas de mitigación, ya que proporciona una base técnica para priorizar acciones preventivas y garantizar la integridad del sistema de transporte.



FIGURA 4. Seguimiento en deformaciones

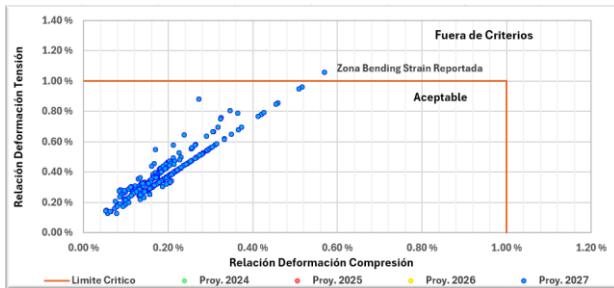


FIGURA 5. Proyección de deformaciones

Sin embargo, la experiencia ha demostrado que esta práctica no siempre es aplicable ya que el comportamiento de la tubería no es lineal a lo largo de toda la sección de tubería evaluada (lingada) expuesta a cargas externas. Esto significa que la respuesta de la tubería depende de muchos factores tales como su alineamiento vs el desplazamiento del terreno o la presencia de curvas de construcción, lo que limita la posibilidad de

generalizar los resultados, lo cual plantea la necesidad de desarrollar nuevos enfoques de análisis.

En condiciones de carga con movimientos lentos a muy lentos, la tubería puede presentar un comportamiento lineal en términos de desplazamientos; sin embargo, esto no indica que el perfil de deformaciones siga la misma tendencia. Por ello, en este documento se plantea un nuevo enfoque o metodología que permita estimar un perfil proyectado de deformaciones basado en la tasa de desplazamientos de la tubería.

2.3 Análisis de Alineamiento

El análisis geográfico de información para alineamiento se construye de manera específica para cada caso, debido a la diversidad de variables, comportamientos y condiciones del entorno que deben ser evaluadas en detalle. Este análisis debe incorporar también las posibles fuentes de error inherentes a las herramientas empleadas, tales como inspecciones ILI, levantamientos topográficos y sensores remotos, cuya precisión puede influir significativamente en la calidad de los resultados obtenidos.

Este enfoque permite visualizar los cambios del alineamiento del ducto entre diferentes corridas ILI inerciales de distintos años, evidenciando su evolución en función de las cargas externas. Asimismo, facilita la comparación con levantamientos topográficos y monitoreos periódicos. Para identificar tendencias en los patrones de movimientos detectados, ya sea entre corridas sucesivas o entre una corrida y una topografía, es indispensable implementar un proceso riguroso de gestión y emparejamiento de datos, que permita establecer una base común para las distintas técnicas utilizadas.

Para la identificación de movimientos entre dos trayectorias, se plantea el alineamiento de la corrida base y la corrida vigente de comparación. Este proceso incluye la corrección entre ambas corridas, emparejando soldadura a soldadura y definiendo los puntos de inicio y fin del análisis como puntos de referencia sin desplazamiento (anclajes). De esta manera es posible detectar desviaciones respecto a la tendencia general de desplazamiento.

Durante el análisis del sector de interés, se realiza una idealización sectorizada del tramo, a través del emparejamiento de soldaduras y resta de coordenadas X, Y, Z obtenidas del Pipetally correspondiente al año de la corrida; se establecen los puntos de inicio y fin como referencias sin movimiento, lo que permite determinar con precisión las desviaciones respecto a la tendencia de desplazamiento.

Este análisis permite identificar los desplazamientos acumulados y las tasas de movimiento del ducto a lo largo del tiempo, facilitando la comprensión del comportamiento histórico multianual del sistema suelo-tubería. Con base en esta evaluación, es posible establecer las tasas de movimiento que se han presentado en distintos periodos y definir aquella que mejor

representa el desplazamiento real del ducto en cada zona evaluada.

Se calcula la tasa de desplazamiento o velocidad del ducto y se adopta como referencia la mayor de estas tasas, al considerarse potencialmente la más crítica para el análisis estructural y de integridad.

A partir de esta información, se desarrollan ejercicios analíticos que permiten visualizar los desplazamientos en función de la dirección y magnitud, con el objetivo de identificar la tendencia y orientación del movimiento del ducto en las zonas evaluadas.

2.4 Proyección de Alineamiento de acuerdo con tasas de desplazamiento

A partir de la tasa de desplazamiento definida, es posible construir un campo de desplazamientos, entendido como el diferencial unitario del movimiento que ha experimentado la tubería en el tiempo.

Este campo de desplazamientos constituye la base para realizar un análisis prospectivo del comportamiento del ducto, permitiendo proyectar su alineamiento a futuro. Con base en este modelo, se estiman anualmente los movimientos esperados, lo cual resulta fundamental para la planificación de actividades de monitoreo, mantenimiento y mitigación, orientadas a preservar la integridad del sistema.

A partir del campo de desplazamientos definido, se calcula el nuevo alineamiento proyectado del ducto bajo diferentes escenarios anuales. Este proceso consiste en aplicar las tasas de desplazamiento estimadas a lo largo del trazado original, generando trayectorias futuras que reflejan la evolución esperada del sistema suelo-tubería.

Cada escenario anual considera variaciones en la magnitud de los desplazamientos, permitiendo evaluar el impacto potencial de distintos niveles de carga o condiciones geotécnicas. Esta proyección del alineamiento es fundamental para anticipar zonas de posible afectación, optimizar estrategias de monitoreo y definir acciones preventivas de mantenimiento y mitigación.

Además, el análisis comparativo entre los alineamientos proyectados y el trazado actual facilita la identificación de tramos críticos, donde el desplazamiento acumulado podría comprometer la integridad estructural del ducto o generar interferencias con el entorno.

2.5 Análisis Prospectivo de Deformaciones

Los análisis tradicionales que estiman la tendencia del movimiento de la tubería proporcionan una visión del desplazamiento del ducto a lo largo del tiempo; sin embargo, por sí solo no permite dimensionar con precisión la criticidad de dichos desplazamientos.

Por esta razón, el análisis prospectivo correlaciona los desplazamientos acumulativos con la capacidad de deformación admisible del ducto (Strain Capacity). Esta correlación permite evaluar la severidad de los movimientos en función de la deformación estructural, lo que posibilita establecer umbrales de desplazamiento que actúen como alertas tempranas, monitoreables mediante mediciones directas e indirectas en campo.

A partir de los nuevos alineamientos proyectados del ducto bajo diferentes escenarios anuales, es posible determinar la deformación por curvatura, la cual se deriva directamente de los desplazamientos determinados previamente. Con base en estos desplazamientos, se calculan las coordenadas espaciales correspondientes a cada escenario de proyección con lo cual se obtienen los ángulos de inclinación (*pitch*, P) y azimut (A) mediante la integración de Euler, un método confiable que estima la posición relativa de un punto “ $k+1$ ” del perfil del ducto, a partir de los ángulos registrados en el punto adyacente “ k ” y la distancia medida. Esta técnica resulta fundamental para modelar con precisión la geometría tridimensional del ducto y evaluar su comportamiento estructural ante escenarios de desplazamiento acumulado.

Las fórmulas utilizadas son:

$$\Delta N = \Delta S * \cos \theta * \cos \gamma \quad (3)$$

$$\Delta H = \Delta S * \sin \theta \quad (4)$$

$$\Delta E = \Delta S * \cos \theta * \sin \gamma \quad (5)$$

Donde:

- ΔN , ΔH , ΔE : incrementos en las coordenadas Norte, Elevación y Este respectivamente.
- ΔS : incremento de distancia a lo largo de la tubería
- θ : ángulo de inclinación (*pitch*).
- γ : ángulo de acimut.

2.5.1 Cálculo de curvatura y deformación

La deformación por flexión se determina a partir de los radios de curvatura, los cuales se calculan considerando los ángulos de inclinación (*pitch*, P) y azimut (*azimuth*, A), tal como se ilustra en la FIGURA 6.

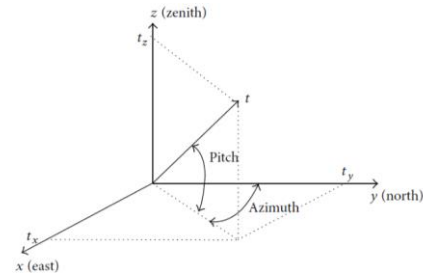


FIGURA 6. Inclinación (Pitch) y azimuth en la línea de centro de la tubería

La curvatura total k se calcula mediante la siguiente expresión:

$$k = \sqrt{k_v^2 + k_h^2} \quad (6)$$

Este valor de curvatura permite estimar la deformación por flexión, asumiendo que el eje neutro se encuentra en el centro de la tubería. Esta metodología es fundamental para evaluar la respuesta estructural del ducto ante cargas externas y desplazamientos acumulativos.

Bajo esta suposición, la deformación por flexión ε se calcula como:

$$\varepsilon = \frac{D}{2} \cdot k \quad (7)$$

Donde D es el diámetro exterior de la tubería y k es la curvatura total obtenida. Esta relación permite cuantificar la deformación estructural inducida por flexión, facilitando la evaluación de la integridad del ducto frente a esfuerzos acumulativos.

2.5.2 Análisis multianual y evaluación de criticidad

Una vez calculadas las deformaciones horizontales, verticales y totales, se grafican los perfiles actuales y proyectados bajo distintos escenarios de desplazamiento creciente en el tiempo. Este análisis permite evaluar la evolución del perfil de deformaciones multianual proyectado e identificar concentradores de esfuerzos (en compresión o tensión), y detectar zonas críticas vulnerables como curvas de construcción o soldaduras, e identificar zonas donde podrían presentarse fallas por distorsión del diámetro o pandeo localizado.

Con base en este análisis, se pueden establecer umbrales críticos de desplazamiento que correspondan con la capacidad de deformación admisible del ducto. Estos umbrales permiten implementar sistemas de alerta temprana y definir estrategias de monitoreo y mitigación.

2.6 Integración de análisis

A partir de los análisis realizados se pueden establecer que los dos enfoques de proyección (lineal y de campo de desplazamientos) son complementarios y que permiten estimar y proyectar las deformaciones futuras en los sistemas de transporte de hidrocarburos de acuerdo con condiciones específicas para cada caso, siendo la proyección de campo de desplazamientos la recomendada para los sectores donde se presentan movimientos con tasas de movimiento muy bajas a bajas.

El análisis integral de deformaciones proyectadas con campos de desplazamiento proporciona una visión objetiva, fundamentada

y soportada técnicamente para abordar preventivamente amenazas latentes, especialmente aquellas asociadas a movimientos del terreno con tasas de desplazamiento bajas o muy bajas. Estos movimientos, al ser imperceptibles a simple vista, representan un desafío significativo para la planificación proactiva del mantenimiento.

Este escenario exige enfoques innovadores que aseguren la integridad estructural de los ductos y permitan implementar un mantenimiento preventivo eficaz. Una estrategia clave consiste en definir umbrales de desplazamiento seguros, correlacionados con la capacidad de deformación por flexión admisible de la tubería (Strain Capacity), lo que permite activar mecanismos de alerta temprana y priorizar intervenciones en campo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el objetivo de profundizar en el proceso de definición de alertas tempranas para la integridad de ductos expuestos a movimientos geotécnicos lentos, se presenta un enfoque basado en el análisis de desplazamientos y criterios de Strain Capacity. Este enfoque permite evaluar de manera anticipada la severidad de los movimientos del terreno y su impacto sobre la infraestructura, facilitando la toma de decisiones preventivas.

En este contexto, se exponen dos (2) casos de estudio que ilustran escenarios reales de movimiento de tubería en zonas sin evidencias o hallazgos de movimientos del terreno de acuerdo con la inspección visual al derecho de vía. Estos casos se fundamentan en el análisis de datos obtenidos mediante mapeo inercial multianual y monitoreos de superficie, lo que permite identificar desplazamientos acumulativos, tasas de movimiento y su correlación con la capacidad de deformación admisible del ducto.

3.1 Caso 1

Se ha identificado una zona en seguimiento como resultado del análisis de corridas ILI y la inspección visual del derecho de vía, debido a la detección de cambios en la deformación y movimiento de la tubería.

Según el reporte de la última corrida ILI, se registra un desplazamiento de la tubería con un movimiento predominantemente horizontal de aproximadamente 41 cm entre corrida base y corrida ultima. Al revisar la información complementaria, se observa que:

- No se reportan anomalías adicionales en la última corrida ILI.
- No existen registros de intervenciones mecánicas en la zona.
- No se han identificado hallazgos geotécnicos relevantes.

Estos hallazgos sugieren la presencia de un movimiento de suelo lento e imperceptible mediante inspecciones visuales, siendo únicamente detectable a través del análisis detallado de las corridas ILI, donde se evidencia una deformación por flexión.

En la FIGURA 7 se presenta el perfil de deformaciones correspondiente al caso analizado. En este se observan cambios de alineamiento, principalmente horizontales, que afectan un tramo de 11 tubos, con un desplazamiento máximo de 41 cm entre inspección inicial y final. Se destaca un incremento en la deformación de 0.065% en cuerpo de tubo y en soldadura de 0.05%, pasando de 0.20% en la corrida anterior a 0.25%.

Con base en los datos obtenidos de las corridas ILI, se ha delimitado la zona de interés afectada por el movimiento del terreno. Para validar esta información, se han programado las siguientes actividades:

- Localización precisa de la tubería mediante topografía y análisis de ortofotografía del sitio.
- Inspección visual especializada por parte del equipo de geoamenazas en el área identificada y su entorno inmediato.

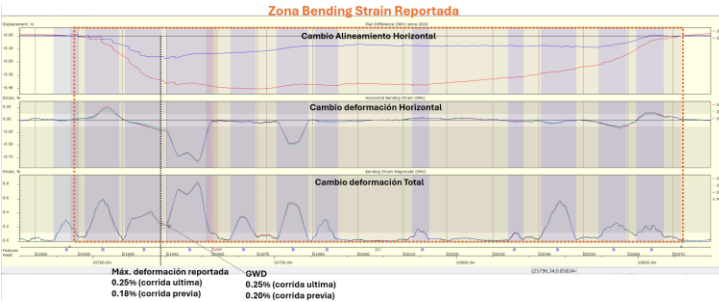


FIGURA 7. Perfil de deformaciones caso 1

3.1.1 Análisis de Alineamiento y Proyección de Desplazamientos – Caso 1

Siguiendo la metodología planteada, se procede a realizar un análisis comparativo de alineamiento de las diferentes corridas ILI, con el fin de determinar la tasa de desplazamientos (campos de desplazamiento) y evaluar el comportamiento histórico del desplazamiento, así como su tasa de evolución en el tiempo.

En la FIGURA 8 se presenta la variación del alineamiento horizontal, donde se evidencia un incremento significativo en el desplazamiento entre la corrida del 2023 y la 2025, alcanzando un valor máximo de 30 cm. Este comportamiento indica una mayor actividad en el periodo más reciente, por lo que ambas corridas se establecen como base para la generación del campo de desplazamiento.

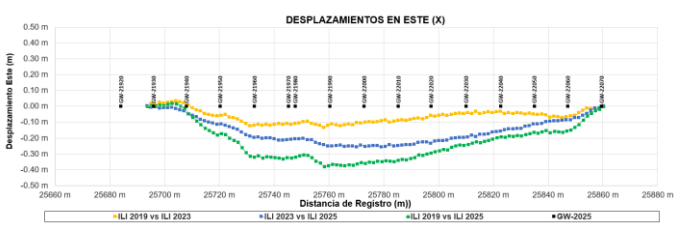


FIGURA 8. Cambio alineamiento horizontal en el tiempo caso 1

El campo de desplazamiento generado permite proyectar los desplazamientos futuros de la tubería, considerando una progresión anual. Para este caso, se definieron cuatro escenarios de proyección, los cuales se detallan a continuación, ver TABLA 2

- Escenario 1: con desplazamiento de 0.44 m
- Escenario 2: con desplazamiento de 0.59 m
- Escenario 3: con desplazamiento de 0.74 m
- Escenario 4: con desplazamiento de 0.79 m

Max Desplazamiento: 0.30 m		Max Desplazamiento: 0.44 m	
DESPLAZAMIENTOS 2023-2025		CAMPO DE DESPLAZAMIENTO	
Este (X) Norte (Y) Altura Total XY		3 2023-2026	
Este (X) Norte (Y) Altura Total XY		Este (m) Norte (m) Altura (m)	
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00		1,018,680.19 1,156,217.23 2,069.89	
-0.01 -0.01 0.01 0.01 0.01		1,018,680.87 1,156,214.76 2,070.15	
-0.02 -0.01 0.01 0.02 0.02		1,018,681.35 1,156,212.32 2,070.61	
-0.03 -0.01 0.01 0.03 0.03		1,018,681.82 1,156,209.86 2,071.07	
-0.04 -0.01 0.01 0.04 0.04		1,018,682.24 1,156,207.39 2,071.26	
-0.05 -0.01 0.01 0.05 0.05		1,018,682.58 1,156,204.91 2,071.37	
-0.06 -0.01 0.01 0.06 0.06		1,018,682.87 1,156,202.41 2,071.44	
-0.07 -0.01 0.01 0.07 0.07		1,018,683.17 1,156,200.00 2,071.54	
-0.08 -0.01 0.01 0.08 0.08		1,018,683.48 1,156,207.46 2,071.71	
-0.09 -0.01 0.01 0.09 0.09		1,018,683.83 1,156,204.98 2,072.04	
-0.10 -0.01 0.01 0.10 0.10		1,018,684.23 1,156,202.51 2,072.46	
-0.11 -0.01 0.01 0.11 0.11		1,018,684.71 1,156,200.06 2,072.92	
-0.12 -0.01 0.01 0.12 0.12		1,018,685.33 1,156,207.63 2,073.43	

TABLA 2. Proyección de Desplazamiento caso 1

Posteriormente, se realiza el cálculo de deformación para cada uno de los escenarios proyectados. Los resultados se representan en el perfil de deformaciones mostrado en la FIGURA 9, donde se observa los diferentes perfiles de deformación de acuerdo con los alineamientos proyectados según las tasa de desplazamientos.

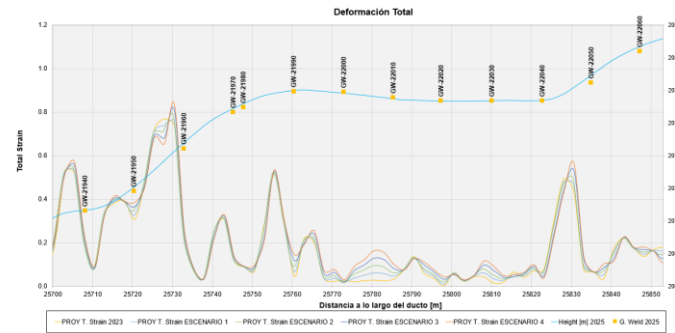


FIGURA 9. Variación de Deformación Total caso 1

El análisis del perfil de deformaciones evidencia (como se esperaba) un incremento progresivo en la deformación de la tubería conforme aumenta los desplazamientos proyectados. A partir del **Escenario 2** (desplazamiento de 59 cm), que, aunque en cuerpo de tubo no curvo no supera los umbrales de strain

definidos (strain capacity), se podrían presentar cambios de deformación superiores a 0.1% en curvas de construcción, para lo cual se deberían evaluar acciones de mitigación programadas con el fin de evitar posibles comportamientos plásticos inesperados.

Este análisis permitió establecer límites de desplazamiento seguros, correlacionados con la capacidad de deformación por flexión admisible de la tubería (Strain Capacity). A partir de esta correlación, se definieron umbrales de alerta temprana, los cuales pueden ser monitoreados mediante técnicas directas (topografía, geodesia) e indirectas (corridas ILI, sensores geotécnicos), permitiendo implementar un sistema de vigilancia continua.

Con base en estos resultados, se recomienda implementar las siguientes acciones:

- Monitoreo topográfico periódico de la tubería, acompañado de análisis de alineamiento, con el objetivo de verificar la evolución de los desplazamientos. En caso de que estos superen los 59 cm, se deberá intervenir el sector mediante acciones correctivas.
- Monitoreo geotécnico instrumentado del terreno, mediante la instalación de inclinómetros, piezómetros u otros sensores que permitan detectar movimientos subterráneos y cambios en las condiciones del suelo.
- Seguimiento continuo durante al menos 2 años, con el fin de validar la vigencia del campo de desplazamientos proyectado y confirmar que los movimientos se mantienen dentro de los rangos controlados.

Estas medidas permitirán una gestión proactiva del riesgo, asegurando la integridad de la infraestructura y facilitando la planificación de estrategias de mantenimiento basadas en el comportamiento real del sistema.

La metodología planteada ha demostrado ser exitosa, ya que se basa en un enfoque preventivo que permite anticipar posibles riesgos o problemáticas. Como parte del proceso, se tiene prevista una segunda publicación en la que se presentarán los resultados obtenidos en el trabajo de campo, con el objetivo de complementar y validar los hallazgos iniciales.

3.2 Caso 2

Como resultado del análisis de corridas ILI y la inspección visual del derecho de vía, se ha identificado una zona en seguimiento donde se han detectado cambios progresivos en la deformación y movimiento de la tubería. De forma proactiva, se han ejecutado obras de mejoramiento de drenaje en el sector, con el objetivo de mitigar posibles efectos asociados a la acumulación de agua y saturación del terreno.

Según el reporte de la última corrida ILI, aunque se evidenció una disminución en la tasa de desplazamiento, la deformación continúa en aumento. En la corrida base se registró una

deformación de 0.189%, la cual incrementó en 0.123%, alcanzando un valor de 0.312% en la corrida más reciente. El desplazamiento acumulado de la tubería entre la corrida base y la última fue de 36.5 cm, mientras que entre la corrida anterior y la última se registró un desplazamiento de 19.6 cm.

Al revisar la información complementaria, se observa que:

- No se reportan anomalías adicionales en la última corrida ILI.
- No existen registros de intervenciones mecánicas en la zona.
- De acuerdo con las inspecciones visuales se han realizado obras de drenaje.

Estos hallazgos sugieren la presencia de un movimiento de suelo lento e imperceptible mediante inspecciones visuales, siendo únicamente detectable a través del análisis detallado de las corridas ILI, donde se evidencia una deformación por flexión.

En la FIGURA 10 se presenta el perfil de deformaciones correspondiente al caso analizado. Se observan cambios de alineamiento con orientación combinada horizontal y vertical, afectando un tramo de 7 tubos, con un desplazamiento máximo de 36.5 cm. Se destaca un incremento de deformación de 0.125%.

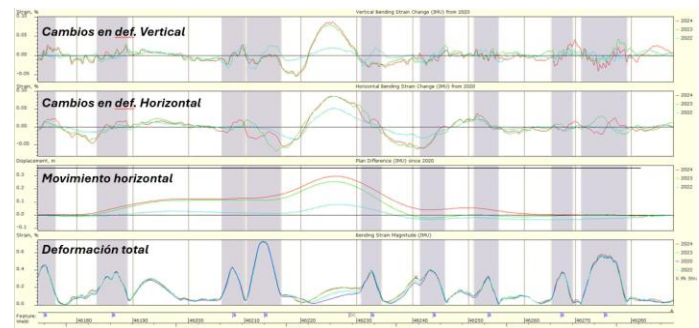


FIGURA 10. Perfil de deformaciones caso 2

Con base en los datos obtenidos de las corridas ILI, se ha delimitado la zona de interés afectada por el movimiento del terreno. Para validar esta información, se han programado las siguientes actividades:

- Localización precisa de la tubería mediante topografía y análisis de ortofotografía del sitio.
- Inspección visual especializada por parte del equipo de geoamenazas en el área identificada y su entorno inmediato.

Análisis de Alineamiento y Proyección de Desplazamientos – Caso 2

Se realizó un análisis comparativo de alineamiento entre corridas ILI históricas para confirmar el movimiento de la tubería y evaluar su evolución temporal. En las FIGURA 11 y FIGURA

12, se presenta la variación del alineamiento horizontal y vertical, donde se evidencia un incremento gradual en los desplazamientos, alcanzando valores máximos de **29.8 cm (horizontal)** y **21.3 cm (vertical)**.

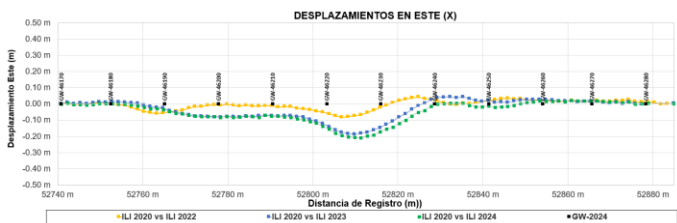


FIGURA 11. Variación de alineamiento horizontal caso 2

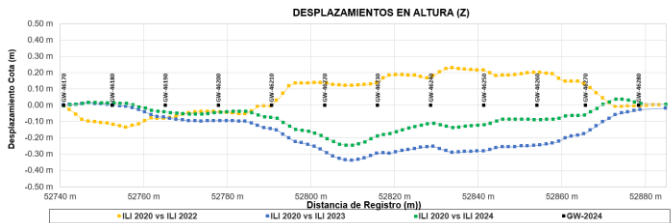


FIGURA 12. Variación de alineamiento vertical caso 2

Este comportamiento indica una mayor actividad reciente, por lo que se utilizaron estas corridas como base para la generación del campo de desplazamiento, el cual permite proyectar desplazamientos futuros bajo una progresión anual.

Se definieron cuatro escenarios de proyección a partir de la corrida 2023-2024, detallados en TABLA 3:

- Escenario 1: 0.36 m – condición actual, última corrida
- Escenario 2: 0.52 m
- Escenario 3: 0.70 m
- Escenario 4: 0.87 m

Max Desplazamiento: 0.17 m					Max Desplazamiento: 0.36 m				
DESPLAZAMIENTOS 2023-2024					CAMPO DE DESPLAZAMIENTOS				
					ESCENARIO 1				
					2				
					2023-2025				
Este (X)	Norte (Y)	Altura (Z)	Total	XY	CD X	CD Y	CD Z	X	Y
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.01	-0.01	0.00	0.01	0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.02	0.02
-0.01	-0.01	0.01	0.01	0.01	-0.01	-0.01	0.01	0.03	0.02
-0.01	-0.01	0.01	0.02	0.01	-0.01	-0.01	0.01	0.03	0.02
-0.01	-0.01	0.01	0.02	0.01	-0.01	-0.01	0.01	0.03	0.03
-0.01	0.00	0.02	0.02	0.01	-0.01	0.00	0.02	0.03	0.01
-0.01	-0.01	0.02	0.02	0.01	-0.01	-0.01	0.02	0.04	0.03
-0.01	-0.01	0.02	0.03	0.02	-0.01	-0.01	0.02	0.04	0.03
-0.01	-0.01	0.03	0.03	0.01	-0.01	-0.01	0.03	0.06	0.03
-0.01	0.00	0.03	0.04	0.01	-0.01	0.00	0.03	0.07	0.02
-0.01	0.00	0.04	0.04	0.01	-0.01	0.00	0.04	0.08	0.02
-0.01	0.00	0.04	0.04	0.01	-0.01	0.00	0.04	0.08	0.01
0.00	0.00	0.04	0.04	0.00	-0.00	0.00	0.04	0.09	0.00
0.00	0.00	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.05	0.09	0.01

TABLA 3. Proyección de Desplazamiento caso 2

En la FIGURA se presenta el perfil de deformaciones proyectadas, donde se observa la evolución de la deformación total inducida por los desplazamientos anuales.

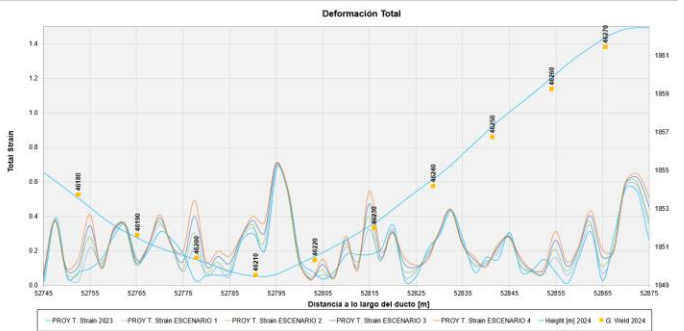


FIGURA 13. Variación de Deformación Total caso 2

El análisis del perfil de deformaciones muestra un incremento progresivo conforme aumentan los desplazamientos proyectados. El Escenario 1 representa la condición actual, mientras que el Escenario 2 (52 cm) se identifica como un umbral de atención, donde se garantiza que la tubería aún se encuentra principalmente dentro del rango elástico y que, al momento de la ejecución de actividades de mitigación mediante liberación de esfuerzos, el ducto pueda “regresar” o “rebotar” hasta su posición de diseño original o lo más cercano a esta. Para el caso del Escenario 3 (70 cm) ya se presentan valores de deformación que podrían requerir acciones en el corto plazo o inmediatas debido a que los valores de deformación calculados se encuentran cercanos al umbral definido (strain capacity).

Este análisis permitió establecer límites de desplazamiento seguros, correlacionados con la capacidad de deformación por flexión admisible (Strain Capacity). A partir de esta correlación, se definieron umbrales de alerta temprana, monitoreables mediante técnicas directas (topografía, geodesia) e indirectas (corridas ILI, sensores geotécnicos).

Se recomienda implementar las siguientes acciones:

- Monitoreo topográfico periódico de la tubería y análisis de alineamiento. Si los desplazamientos superan los 52 cm, se recomienda intervenir el sector.
- Monitoreo geotécnico instrumentado del terreno mediante inclinómetros, piezómetros u otros sensores.
- Seguimiento continuo durante al menos 1 año, para validar la vigencia del campo de desplazamientos proyectado y confirmar que los movimientos se mantienen controlados.

Estas medidas permitirán una gestión proactiva del riesgo, asegurando la integridad de la infraestructura y facilitando la planificación de estrategias de mantenimiento basadas en el comportamiento real del sistema.

Estas medidas permitirán una gestión proactiva del riesgo, asegurando la integridad de la infraestructura y facilitando la planificación de estrategias de mantenimiento basadas en el comportamiento real del sistema.

La metodología planteada ha demostrado ser exitosa, ya que se basa en un enfoque preventivo que permite anticipar posibles riesgos o problemáticas. Como parte del proceso, se tiene prevista una segunda publicación en la que se presentarán los resultados obtenidos en el trabajo de campo, con el objetivo de complementar y validar los hallazgos iniciales.

4. CONCLUSION

La metodología propuesta se basa en el entendimiento de la evolución y cambio de alineamiento de información precedente y actual ILI/IMU permitiendo determinar un estado de desplazamientos y/o incremento de deformaciones en secciones de tubería donde la carga externa predominante es de característica imperceptible sobre el terreno.

Los criterios de deformación límite normativos son complementados tomando como base el estado de esfuerzos y la deformación basada en strain Capacity con lo cual el método de análisis prospectivo permite ser una herramienta que facilita el entendimiento de los procesos de movimiento a baja tasa de desplazamiento y ser un parámetro de toma de decisión para la planeación de actividades de monitoreo y mantenimiento predictivo.

AGRADECIMIENTOS

A la jefatura de aseguramiento de integridad de Cenit transporte y Logística de hidrocarburos, por permitir compartir los casos de estudio y la información base del análisis en los casos de estudio.

A la gerencia Técnica de Penspen por el apoyo en la estructuración de la metodología de análisis y su constante sistematización.

REFERENCIAS

- [1] ASME B31.4. “Pipeline transportation systems for liquids and slurries”. The American Society
- Norma Canadiense
- Normas API 1160
- Norma DOT
- Norma API 579
- Pereira, Mauricio. 2009. “Modelación Numérica de Interacción Suelo-Tubería En Deslizamientos de Tierra.”
- Wilde, A., & Gómez, O. (2023). Optimizing data and Technology to drive down geoamenazas related pipeline failures. *6th International Pipeline Geotechnical Conference IPG 2023*, (págs. 1-9). Bogotá.