

Desarrollar una metodología para validar corridas ILI mediante verificación con  
Escáner 3D

Laura Valentina Sierra Rodríguez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Metalúrgica

Director

Sandra Judith García Vergara

Doctora en corrosión

Codirector

Nelson Adolfo Camargo Hernández

Especialista en Gerencia de Mantenimiento y Confiabilidad

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Fisicoquímica

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y ciencia de los materiales

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

Al culminar mi ciclo académico de pregrado, dedico esta tesis, con especial cariño y afecto a mis padres Omar Sierra y Fanny Rodriguez, quienes se erigieron como pilares fundamentales a lo largo de todo mi proceso educativo, al brindarme de manera incondicional todo su apoyo, en especial frente a las vicisitudes presentadas, siendo esa voz de aliento para no desfallecer ante las metas trazadas. Mis desvelos fueron suyos y sus plegarias escuchadas, pero nunca perdieron el optimismo de ver coronado tanto esfuerzo.

A mi familia que, cual leales escuderos, estuvieron a mi lado pendientes de todo, no solo aplaudiendo los logros, sino siempre solidarios en los momentos difíciles, sin perder la fe para alcanzar pronto el triunfo deseado.

*Laura Sierra*

### **Agradecimientos**

Con el debido respeto frente a los diferentes credos religiosos, quiero expresar en primer término mis agradecimientos sinceros al Dios de la vida, quien ha sido luz y guía en mi diario vivir, iluminando siempre el camino que debo recorrer.

Mi perenne gratitud a la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER y su Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales que, como fuente inagotable de ciencia, sabiduría y virtud, redoblan esfuerzos para brindar programas académicos de excelencia y calidad, proclamando profesionales con los mejores índices de competitividad y humanismo.

Extiendo mis agradecimientos a la Corporación CIMA la cual me permitió realizar mi práctica profesional, además de facilitarme los recursos para el desarrollo de este proyecto.

De igual manera, agradezco a los ingenieros Nelson Adolfo Camargo Hernández y Johan Andrés Pineda Mosquera y a la profesora Sandra Judith García Vergara por todo el apoyo que me brindaron en este trabajo de grado. Mil y mil gracias por la orientación técnica y científica y la paciencia que me dispensaron para ello.

Luciré con orgullo mi botón de egresada y llevaré por siempre en mi corazón el escudo y la bandera UIS.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	11
1. Objetivos .....	12
1.1 Objetivo General .....	12
1.2 Objetivos Específicos.....	12
2. Marco Teórico.....	13
2.1 Anomalía.....	13
2.2 Cluster .....	13
2.3 Clasificación de las anomalías .....	13
2.4 Aplicación de las normativas .....	14
2.4.1 Caja de expansión .....	15
2.4.2 Caja de conexión.....	16
2.4.3 Factor forma.....	17
2.5 Interpretación de fórmulas .....	18
2.5.1 Desviación de profundidad relativa .....	18
2.5.2 Diferencia entre las mediciones de profundidad relativa.....	19
2.5.3 Tolerancia combinada.....	19
2.6. Métodos de inspección.....	19
2.6.1 Inspección en línea (ILI) .....	20
2.6.2 Escáner 3D.....	20
3. Metodología .....	22

3.1 Interpretación de la información obtenida del ILI y desarrollo de los informes del Escáner 3D .....	22
3.1.1 Escaneo de las anomalías .....	23
3.1.2 Configuración del software VX Integrity 2 .....	24
3.1.3 Cotejo de las anomalías o clusters .....	27
3.2 Aplicación de la plantilla API 1163 .....	29
3.2.1 Información general .....	31
3.2.2 Datos ILI .....	31
3.2.3 Datos escáner 3D .....	32
3.2.4 Validación .....	32
3.2.5 Gráficos unitarios .....	32
3.2.6 Porcentaje de certeza real .....	32
4. Resultados y discusión .....	33
4.1 Ingreso de datos .....	33
4.2 Análisis de las desviaciones estándar .....	33
4.3 Análisis de los Gráficos Unitarios .....	40
4.3.1 Línea diagonal (Verde) .....	41
4.3.2 Elipses superpuestas .....	41
4.4 Análisis del Porcentaje de Certeza .....	45
5. Conclusiones .....	48
Referencias Bibliográficas .....	49

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Criterios de dimensionamiento del ILI .....	24
Tabla 2. Criterios de dimensionamiento axial y circunferencial de las anomalías o clusters.....	26
Tabla 3. Resultados de la clasificación de los clusters y anomalías .....	39
Tabla 4. Clusters que presentaron discrepancia en la clasificación según su ancho y longitud ...	40
Tabla 5. Resultados del proceso de validación respecto a las profundidades de los clusters y anomalías .....	43

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Clases dimensionales para indicadores de pérdida de metal .....	14
Figura 2. Procedimiento de caja de expansión.....	16
Figura 3. Procedimiento de caja de conexión .....	17
Figura 4. Procedimiento factor forma.....	17
Figura 5. Fases de la metodología.....	22
Figura 6. Ubicación de las anomalías .....	23
Figura 7. Software VX Integrity 2 .....	25
Figura 8. Configuración para pérdida de metal tipo general .....	27
Figura 9. Cotejo de clusters ubicados en un ducto.....	28
Figura 10. Diagrama de Flujo de la metodología para el uso de la plantilla de validación .....	30
Figura 11. Secciones de la plantilla de validación bajo la norma API 1163 .....	31
Figura 12. Profundidades de los clusters y anomalías .....	35
Figura 13. Desviación estándar del ILI Vs Escáner 3D.....	36
Figura 14. Resultados obtenidos de la validación de la plantilla.....	37
Figura 15. Representación gráfica de los clusters y anomalías que cumplen con los criterios establecidos .....	43
Figura 16. Representación gráfica de los clusters y anomalías que no cumplen con los criterios	44
Figura 17. Resultado del porcentaje de certeza real de la validación .....	47

## **Lista de Apéndices**

**Ver apéndices adjuntos y pueden ser consultados en el repositorio de la Biblioteca UIS**

Apéndice A. Interpretación de la Plantilla API 1163

Apéndice B. Desarrollo de Gráficos Unitarios

Apéndice C. Resultados de la Validación

## Resumen

**Título:** Desarrollar una metodología para validar corridas ILI mediante verificación con Escáner 3D.\*

**Autor:** Laura Valentina Sierra Rodríguez.\*\*

**Palabras Clave:** Anomalía, ILI, escáner 3D, dimensionamiento, API 1163.

**Descripción:** Este estudio se centró en la validación de los datos de dimensionamiento de características correspondientes a la pérdida de metal externa en ductos detectadas mediante la inspección en línea (ILI) los cuales fueron corroborados mediante una herramienta de mayor precisión como lo es el escáner 3D.

La validación se realizó utilizando una plantilla diseñada en el software Microsoft Excel implementando la norma API 1163, que establece los criterios de precisión para las dimensiones tomadas por la herramienta ILI. El método implementado en la validación se basó en calcular el porcentaje de certeza real de la inspección, comparándolo con el porcentaje especificado por el proveedor de la herramienta de inspección en línea.

Asimismo, se desarrolló una metodología detallada que explica el uso de cada columna de la plantilla y como analizar los datos obtenidos. Este análisis incluyó la revisión de la información proporcionada en los reportes del ILI y el proceso de generación de reportes del escáner 3D, así como el procedimiento de cotejo que se debe llevar a cabo para asegurar que se están evaluando las mismas anomalías o clusters detectadas por ambas herramientas. De igual forma se abarcó el análisis de los gráficos unitarios y el rendimiento que obtuvo la herramienta ILI tras el proceso de validación con el fin de corroborar la precisión de la herramienta de inspección en línea.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Sandra Judith García Vergara. Doctora en corrosión. Codirector: Nelson Adolfo Camargo Hernández. Especialista en Gerencia de Mantenimiento y Confiabilidad.

### Abstract

**Title:** Develop a methodology to validate ILI runs through 3D scanner verification.\*

**Author(s):** Laura Valentina Sierra Rodríguez.\*\*

**Key Words:** Anomaly, ILI, 3D scanner, sizing, API 1163.

**Description:** This study focused on the validation of the dimensioning data of characteristics corresponding to the external metal loss in ducts detected by in-line inspection (ILI) which were corroborated by means of a more accurate tool such as the 3D scanner.

The validation was performed using a template designed in Microsoft Excel software implementing the API 1163 standard, which establishes the accuracy criteria for the dimensions taken by the ILI tool. The method implemented in the validation was based on calculating the actual percentage of certainty of the inspection, comparing it with the percentage specified by the supplier of the in-line inspection tool.

A detailed methodology was also developed explaining the use of each column of the template and how to analyze the data obtained. This analysis included the review of the information provided in the ILI reports and the 3D scanner report generation process, as well as the matching procedure to be carried out to ensure that the same anomalies or clusters detected by both tools are being evaluated. The analysis of the unit graphs and the performance obtained by the ILI tool after the validation process were also covered in order to corroborate the accuracy of the in-line inspection tool.

---

\* Undergraduate Work

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Adviser: Sandra Judith García Vergara. PhD in corrosion. Co-adviser: Nelson Adolfo Camargo Hernández. Specialist in Maintenance and Reliability Management.

## Introducción

La integridad y seguridad de los sistemas de ductos en la industria de hidrocarburos es de vital importancia. Estos sistemas, al estar expuestos a diversas condiciones operativas pueden enfrentar una variedad de amenazas que comprometen su integridad. Entre las amenazas más comunes se encuentran la pérdida de metal y las abolladuras, las cuales pueden llevar a consecuencias graves si no se detectan y manejan adecuadamente.

Para evaluar la integridad de los ductos, la industria ha desarrollado diversas técnicas de evaluación directa. Entre estas, la inspección en línea (ILI) que se ha convertido en una de las herramientas más utilizadas en la actualidad debido a su capacidad para identificar una amplia gama de anomalías sin interrumpir su funcionamiento (Arboleda, 2020).

Sin embargo, es importante reconocer que las herramientas de inspección en línea, a pesar de su sofisticación, no siempre ofrecen una precisión absoluta. Esta limitación plantea la necesidad de evaluar el rendimiento de estas herramientas, por lo tanto, para abordar este problema se requiere el uso de otra herramienta de inspección directa que ofrezca una precisión mayor.

En este contexto, la norma API 1163 establece los estándares para la validación de integridad de los sistemas de inspección en línea de ductos. Específicamente introduce un procedimiento basado en el porcentaje de certeza real, que se enfoca en la validación de integridad del dimensionamiento de profundidad de las anomalías externas detectadas por el ILI comparándolas con las mediciones obtenidas por la herramienta de inspección de campo de mayor precisión (Escáner 3D). El proceso de validación se realiza por medio de una plantilla creada bajo los criterios de precisión establecidos en esta norma con el propósito de generar un análisis acerca del rendimiento de la herramienta de inspección en línea.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Desarrollar una metodología bajo la Norma API 1163 que evalúe y valide el desempeño de los sistemas ILI en la detección de pérdida de metal externa en ductos, comparando sus resultados con mediciones de campo obtenidas con escáner 3D.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Analizar la Norma API 1163 para identificar y establecer los criterios necesarios en la calificación de los sistemas de inspección en línea (ILI).

Interpretar los datos obtenidos de informes de inspección en línea y del escáner 3D.

Desarrollar una metodología detallada que permita a la empresa utilizar de manera efectiva una plantilla para validar los datos obtenidos de los sistemas de inspección en línea (ILI) con los datos recopilados mediante un escáner 3D.

## 2. Marco Teórico

### 2.1 Anomalía

Una anomalía es una variación que se desarrolla con el tiempo desviándose de los estándares establecidos en el material de la tubería. Estas anomalías pueden manifestarse como defectos, tales como corrosión, fisuras o deformaciones (Pipeline operators forum [POF], 2021).

### 2.2 Cluster

Dos o más anomalías adyacentes en las paredes de una tubería o conjunto de anomalías que pueden interactuar para debilitar la tubería más de lo que podría hacerlo una anomalía por sí sola (Pipeline operators forum [POF], 2021).

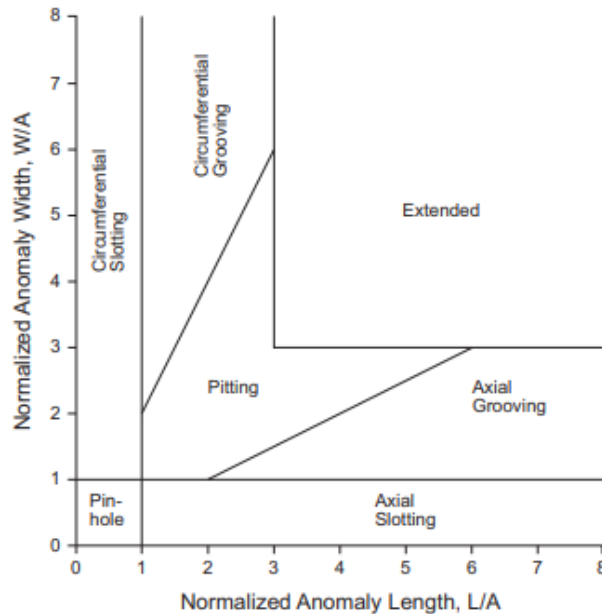
### 2.3 Clasificación de las anomalías

La pérdida de metal se puede clasificar según su forma geométrica, considerando las dimensiones de longitud (L), ancho (W) y espesor de pared (t) (ver figura 1). Las anomalías detectadas se categorizan utilizando el parámetro geométrico A, que es relevante cuando el espesor de la tubería (t) es inferior a 10 mm, por lo tanto,  $A=10$  mm pero si este es mayor o igual a 10 mm entonces  $A=t$ . Este parámetro permite definir diferentes clases de pérdida de metal para reportar las anomalías con precisión (American Petroleum Institute [API], 2013).

Las siete categorías geométricas para la clasificación de la pérdida de metal definidas por el Foro de Operadores de Oleoductos son:

**Figura 1**

*Clases dimensionales para indicadores de pérdida de metal*



*Nota.* Especifica las clases dimensionales que se presentan en ductos en cuanto a la pérdida de metal. Tomado de (Pipeline operators forum [POF], 2021).

## 2.4 Aplicación de las normativas

La normativa API 1163, implementada en 2005, es un estándar en la industria de ductos para validar y analizar los resultados de la inspección en línea (ILI), asegurando la integridad de las tuberías. Aunque esta norma define especificaciones para diversas categorías geométricas de anomalías, no proporciona directrices específicas para comparar la longitud y el ancho de estas. En su lugar, la normativa se enfoca principalmente en la profundidad de las anomalías como criterio de evaluación (Tomar et al., 2008).

La norma API 1163 enfatiza la importancia de los métodos de interacción en el proceso de validación de inspecciones de ductos. Según Tomar et al. (2008), “Los defectos de pérdida de metal detectados suelen agruparse en múltiples anomalías de formas geométricas similares o distintas, utilizando criterios de interacción predefinidos”. Estas reglas de interacción permiten agrupar áreas corroídas cercanas en un solo elemento (cluster), facilitando una evaluación más completa de la integridad de la tubería. Este enfoque, detallado en el manual de usuario de Pipecheck (Creaform Inc., 2012-2021, 7ª ed.), proporciona un método estandarizado para analizar y categorizar las características detectadas durante las inspecciones en línea.

Por tanto, las áreas corroídas detectadas por el método de inspección se agruparán mediante el método de interacción seleccionado, como Caja de Conexión, Caja de Expansión o Factor Forma. Estos métodos siguen las siguientes reglas de interacción:

- a) Cada método delimita las zonas corroídas detectadas creando un límite.
- b) La zona delimitada se expande 0,5 veces las dimensiones longitudinales y circunferenciales.
- c) Si dos áreas expandidas se superponen, se agruparán para formar un cluster. En caso de que otras anomalías también se superpongan, se incorporarán al cluster existente. Si no se superponen, no se unirán al grupo y se mantendrán como elementos separados.

Dentro de los métodos de interacción se enuncian tres, los cuales se definen en la forma en que delimitan las áreas o zonas corroídas.

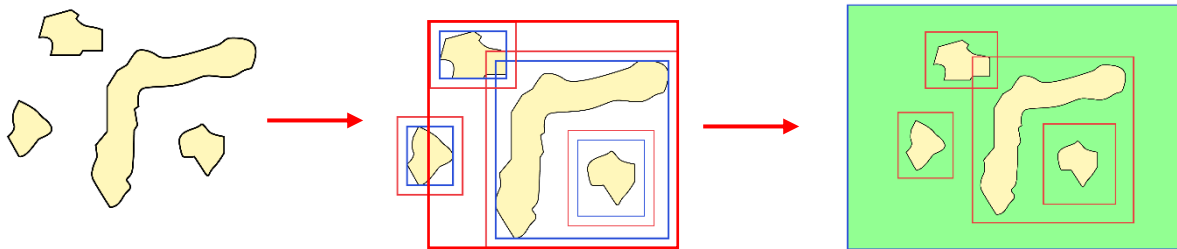
#### ***2.4.1 Caja de expansión***

La caja de expansión es un método de agrupación de anomalías detectadas mediante contornos rectangulares. Inicialmente, cada anomalía se delimita con un rectángulo azul, que luego se expande en un 50% para formar un contorno rojo más grande. Cuando estos rectángulos

expandidos se superponen, se crea una caja de expansión que engloba todas las áreas superpuestas. Este proceso se repite iterativamente, es decir, la nueva caja verifica más superposiciones con otros rectángulos, expandiéndose según sea necesario hasta que no haya más solapamientos. El resultado final es un cluster de anomalías representado por una única caja de expansión, lo que permite identificar grupos de anomalías relacionadas o patrones más amplios en lugar de tratarlas como anomalías aisladas.

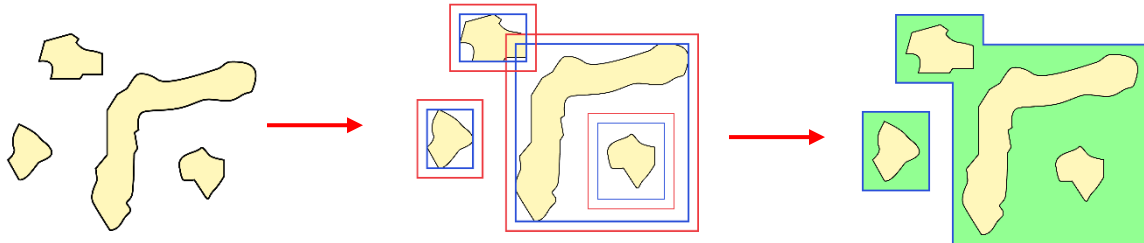
## Figura 2

### *Procedimiento de caja de expansión*



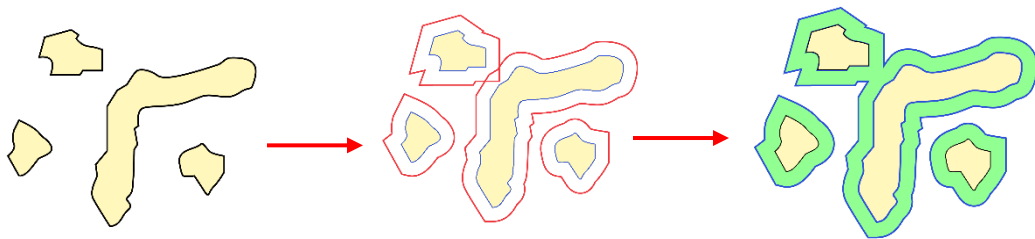
### 2.4.2 Caja de conexión

El método de detección de corrosión inicia delimitando la zona afectada con un contorno rectangular azul. Posteriormente, se amplían las dimensiones de estos rectángulos, creando contornos rojos más grandes. Cuando estos contornos rojos se superponen entre sí, se establece una conexión que sugiere una relación entre las anomalías detectadas. Sin embargo, es importante notar que esta conexión o agrupación no continuará expandiéndose si las zonas ampliadas dejan de superponerse entre sí. Este comportamiento se ilustra en la Figura 3.

**Figura 3***Procedimiento de caja de conexión*

### 2.4.3 Factor forma

Las anomalías detectadas se delimitan inicialmente siguiendo sus contornos naturales, capturando la silueta de cada una. Estos contornos originales se expanden en un 50% (0,5 veces sus dimensiones iniciales), generando nuevos contornos rojos más amplios. Cuando estos contornos expandidos se superponen entre sí, las anomalías correspondientes se consideran relacionadas y se agrupan en un cluster.

**Figura 4***Procedimiento factor forma*

## 2.5 Interpretación de fórmulas

Bajo la normativa aplicada, se incluye un apartado con las fórmulas requeridas para el proceso de validación, comparando las mediciones del ILI con las obtenidas en campo. Para esto hay que tener en cuenta los siguientes conceptos:

$t$  = Espesor general de la pared del ducto.

$d$  = Pérdida de material absoluta.

$t_r$  = Espesor restante de la pared del ducto.

$d/t$  = Profundidad relativa de la pérdida de material.

### 2.5.1 Desviación de profundidad relativa

La desviación estándar presentada refleja la propagación de errores en mediciones independientes. Tanto el espesor general de la pared como el espesor remanente tienen sus propias desviaciones estándar asociadas a sus mediciones. Para obtener una estimación confiable de la desviación estándar total de la pérdida de metal relativa, se aplica la ecuación (1) que combina estas desviaciones estándar, siguiendo los principios de la propagación de errores. Esto permite calcular la dispersión o variabilidad total en la medición de la pérdida de metal.

$$\sigma_{\left(\frac{d}{t}\right)_{ILI;CAMPO}} = \frac{1}{t} \sqrt{\left(\frac{t_r}{t}\right)^2 (\sigma_t)^2 + (\sigma_{tr})^2} \quad (1)$$

Donde:

$\sigma_{tr}$  = Desviación estándar del espesor remanente de pared.

$\sigma_t$  = Desviación estándar del espesor general de pared.

### 2.5.2 Diferencia entre las mediciones de profundidad relativa

Esta fórmula refleja la diferencia entre las profundidades de pérdida de metal obtenidas mediante la medición realizada por el ILI y las mediciones tomadas por la herramienta de campo.

Dicha diferencia se expresa como:

$$e = (d/t)_{ILI} - (d/t)_{CAMPO} \quad (2)$$

### 2.5.3 Tolerancia combinada

La tolerancia corresponde al error total permitido de un elemento (keyence corporation, 2024). Este se obtiene a partir de las desviaciones estándar calculadas para las mediciones del ILI y las mediciones en campo. No obstante, esta tolerancia se ajusta en función de un nivel de confianza predefinido, lo que permite reflejar un porcentaje específico de certeza en los resultados esperados.

$$\delta e_{comb} = \sqrt{[\delta(d/t)_{ILI}]^2 + [1,28 \sigma_{(d/t)Campo}]^2} \quad (3)$$

Donde:

$\delta(d/t)_{ILI}$  = Desviación estándar del ILI.

$\sigma_{(d/t)Campo}$  = Desviación estándar de la herramienta de campo.

## 2.6. Métodos de inspección

Para realizar la medición de la pérdida de metal en las tuberías por causa de la corrosión, se hace uso de diferentes técnicas que se presentan en la industria. Estas herramientas permiten realizar la toma de datos con el fin de generar una evaluación de la integridad de los ductos, es

decir, analizar el deterioro presente. Dentro de estas técnicas implementadas se encuentran la herramienta de inspección en línea (ILI) y el escáner 3D.

### ***2.6.1 Inspección en línea (ILI)***

Esta herramienta de inspección corresponde a una de las técnicas de ensayos no destructivos más utilizadas en la evaluación de la integridad de ductos, debido a su capacidad para identificar una gran variedad de anomalías. Entre las principales anomalías detectadas por el ILI se incluyen abolladuras, grietas y pérdida de metal, las cuales pueden comprometer seriamente la seguridad y operación de los sistemas de transporte de hidrocarburos (American Petroleum Institute [API], 2013).

El ILI se basa en el uso de herramientas avanzadas de inspección que recorren el interior del ducto mientras este se encuentra en operación, sin necesidad de interrumpir el flujo del producto. Estas herramientas, conocidas como pigs inteligentes, llevan incorporadas tecnologías de inspección como el flujo magnético (MFL), el ultrasonido (UT), los transductores electromagnéticos-acústicos (EMAT) y las corrientes de Eddy (ET), lo que permite la detección de diversos tipos de defectos en las paredes de las tuberías (Arboleda, 2020).

Asimismo, el uso del ILI está regulado por normativas internacionales como la API 1163, que establece los lineamientos para la inspección, validación y análisis de datos obtenidos por este método, con el objetivo de respaldar la confiabilidad y la seguridad de los ductos.

### ***2.6.2 Escáner 3D***

Un escáner 3D es un dispositivo que recolecta datos para capturar la forma, el tamaño y la geometría tridimensional de un objeto o superficie. Dentro de las categorías de escáneres, se distinguen los de contacto y los de no contacto. “Los escáneres de contacto examinan el objeto mediante el uso de un palpador, un elemento de medición que se apoya sobre la superficie del

objeto generalmente una punta de acero duro o zafiro. La posición espacial del palpador es determinada por una serie de sensores internos” (Álvarez et al., 2016).

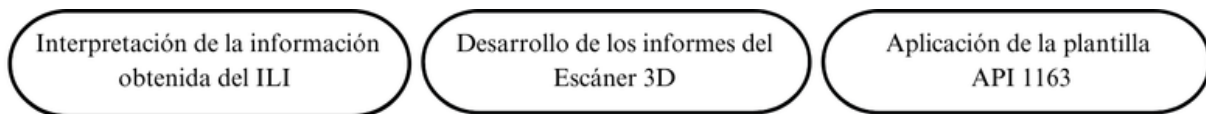
Por otro lado, los escáneres sin contacto, como los escáneres láser, utilizan tecnologías no destructivas que emplean luz láser para capturar la geometría de un objeto y almacenarla digitalmente. Estos dispositivos no requieren interacción física con el objeto, lo que los hace ideales para aplicaciones en las que es importante preservar la integridad del material o donde el acceso físico es limitado (Díaz, 2018).

### 3. Metodología

Para validar el sistema de inspección en línea conforme a la norma API 1163, se ha desarrollado una metodología estructurada utilizando Microsoft Excel. Esta herramienta permite procesar los datos obtenidos durante las pruebas y llegar a conclusiones sobre el desempeño de la herramienta de inspección utilizada para detectar anomalías de pérdida de metal externa. En este caso, se utilizó un escáner 3D para inspeccionar un ducto ubicado en Barrancabermeja, Santander. El proceso de validación mediante la plantilla de Excel se estructuró en 3 fases:

#### Figura 5

*Fases de la metodología*



#### 3.1 Interpretación de la información obtenida del ILI y desarrollo de los informes del Escáner 3D

El proveedor encargado de realizar la inspección del ducto mediante la herramienta de Inspección en Línea (ILI) proporciona los reportes detallados sobre las anomalías detectadas. Estos informes del ILI sirven como base fundamental para el desarrollo del reporte generado por la herramienta de inspección en campo (Escáner 3D). Para la recolección de datos a través del escáner, se sigue un protocolo que comprende varios pasos:

1. Escaneo de las anomalías.
2. Configuración del software VX Integrity 2.
3. Cotejo de las anomalías o clusters.

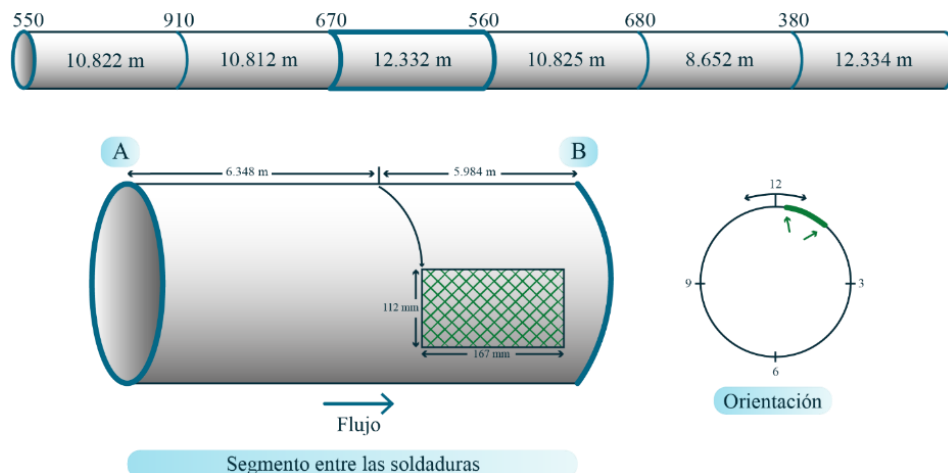
### 3.1.1 Escaneo de las anomalías

Para detectar la ubicación de las anomalías reportadas por el ILI, es fundamental considerar que estas anomalías se sitúan en los segmentos comprendidos entre las soldaduras del ducto. El procedimiento comienza localizando la soldadura reportada por el ILI, que se tomará como punto de inicio (A). Posterior a esto, se identifica el siguiente cordón de soldadura aguas abajo (B), con el objetivo de delimitar el segmento entre ambas soldaduras (ver figura 6). Estos cordones son localizados en campo por medio de las coordenadas que el ILI reporto.

Conforme a lo anterior, utilizando un flexómetro, se llevarán a cabo dos mediciones a partir de las soldaduras (A) y (B). Desde (A), se medirá la distancia relativa aguas abajo especificada por el ILI, mientras que desde (B) se medirá la distancia relativa aguas arriba obteniendo la intersección de ambas mediciones, esta intersección permitirá identificar el punto específico de la anomalía. Posteriormente, será necesario establecer la posición horaria de este punto en relación con el ducto. Para ello, se consultarán los informes del ILI, que proporcionan datos sobre la orientación en la que se detectó la anomalía.

**Figura 6**

*Ubicación de las anomalías*



El proceso descrito anteriormente se repetirá para cada cluster o anomalía que el cliente haya decidido validar, debido a su criticidad. Esto garantizará que se realice una identificación precisa y consistente de todas las anomalías relevantes en el ducto.

### 3.1.2 Configuración del software VX Integrity 2

Las anomalías por pérdida de metal detectadas por el ILI fueron clasificadas según las dimensiones configuradas en el sistema, considerando tanto el ancho como la longitud hallada (ver tabla 1). Por lo tanto, para realizar una validación precisa respecto al escáner, es necesario ajustar ciertos parámetros que permitan clasificar las anomalías siguiendo el mismo criterio de dimensionamiento. Cabe destacar que los parámetros utilizados en el ILI dependen del proveedor que realice este tipo de inspección.

**Tabla 1**

*Criterios de dimensionamiento del ILI*

General	Pitting	Axial grooving	Circumferential grooving	Pinhole	Axial slotting	Circumferential slotting
W>3A	W>A	W>A	W>2A	W>0,5A	W>0,5A	W>A
L>3A	L>A	L>2A	L>A	L>0,5A	L>A	L>0,5A

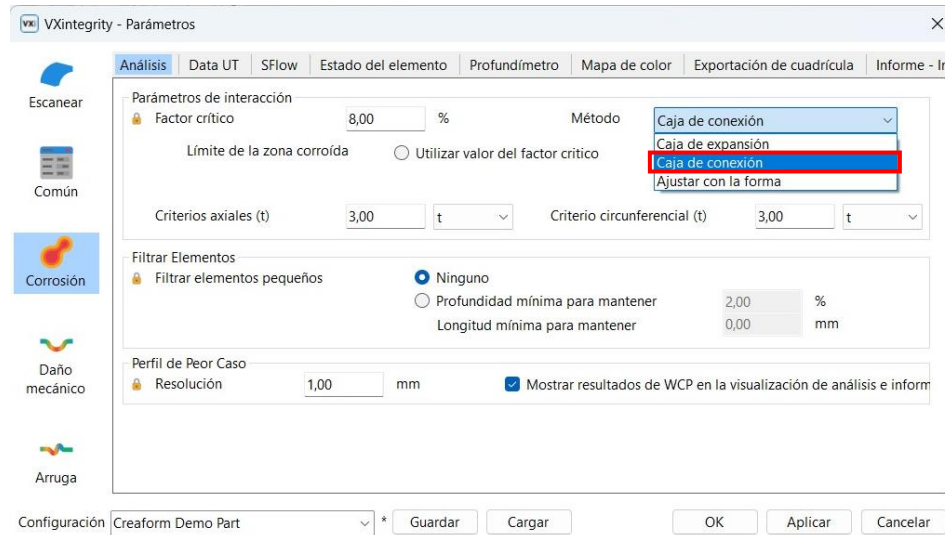
*Nota.* Parámetros de dimensiones implementados por el proveedor del [ILI] para su respectiva inspección. Tomado de (“Magnescan Product Specification”, 2020).

Por consiguiente, en el software VX Integrity 2, se debe configurar el parámetro del método de interacción que dependerá del método utilizado por el proveedor del ILI. Para efectos de este estudio, se empleará el método "Connecting Box ó Caja de conexión" (ver figura 7). Asimismo, es necesario ajustar los criterios axiales y circunferenciales de acuerdo con los parámetros utilizados en el ILI (ver tabla 1). Dependiendo del tipo de anomalía o cluster que se esté analizando, estos criterios deben configurarse adecuadamente. En la tabla 2, se presentan de manera más clara

los criterios de dimensionamiento, los cuales están relacionados con los proporcionados en la figura 1. Donde  $A=t$ ;  $W$ : Ancho y  $L$ : Longitud de la anomalía o cluster.

### Figura 7

Software VX Integrity 2



*Nota.* Selección del método de conexión o agrupación de las anomalías detectadas mediante la inspección con escáner 3D en el software VX Integrity 2. Tomado de (CREAFORM, s. f.).

**Tabla 2***Criterios de dimensionamiento axial y circunferencial de las anomalías o clusters*

<b>Tipo de pérdida de metal</b>	<b>Criterio axial</b>	<b>Criterio Circunferencial</b>
General	3*t	3*t
Pitting	1*t	1*t
Axial grooving	2*t	1*t
Circunferencial grooving	1*t	2*t
Pinhole	0,5*t	0,5*t
Axial slotting	1*t	0,5*t
Circunferencial slotting	0,5*t	1*t

*Nota.* Esta tabla muestra los criterios axiales y circunferenciales para la configuración del software VX Integrity 2 de cada anomalía analizada.

Por tanto, la configuración de estos criterios de dimensionamiento en el software se observa de la siguiente manera (ver figura 8). Una vez configurados estos parámetros, se procede a seleccionar la opción de “Aplicar” para que el software genere los reportes con los parámetros establecidos.

**Figura 8***Configuración para pérdida de metal tipo general*

VXintegrity - Parámetros

Escanear  
Común  
Corrosión  
Daño mecánico  
Arruga

Análisis | Data UT | SFlow | Estado del elemento | Profundímetro | Mapa de color | Exportación de cuadrícula | Informe - In

Parámetros de interacción

Factor crítico: 8,00 % Método: Caja de conexión

Límite de la zona corroída:  Utilizar valor del factor crítico  Otro valor: 5,00 %

Criterios axiales (t): 3,00 t Criterio circunferencial (t): 3,00 t

Filtrar Elementos

Filtrar elementos pequeños:  Ninguno  Profundidad mínima para mantener: 2,00 %  Longitud mínima para mantener: 0,00 mm

Perfil de Peor Caso

Resolución: 1,00 mm  Mostrar resultados de WCP en la visualización de análisis e inform

Configuración: Creaform Demo Part \* Guardar Cargar OK Aplicar Cancelar

*Nota.* Selección de los criterios de dimensionamiento tanto axial como circunferencial.

Tomado de (CREAFORM, s. f.).

### 3.1.3 Cotejo de las anomalías o clusters

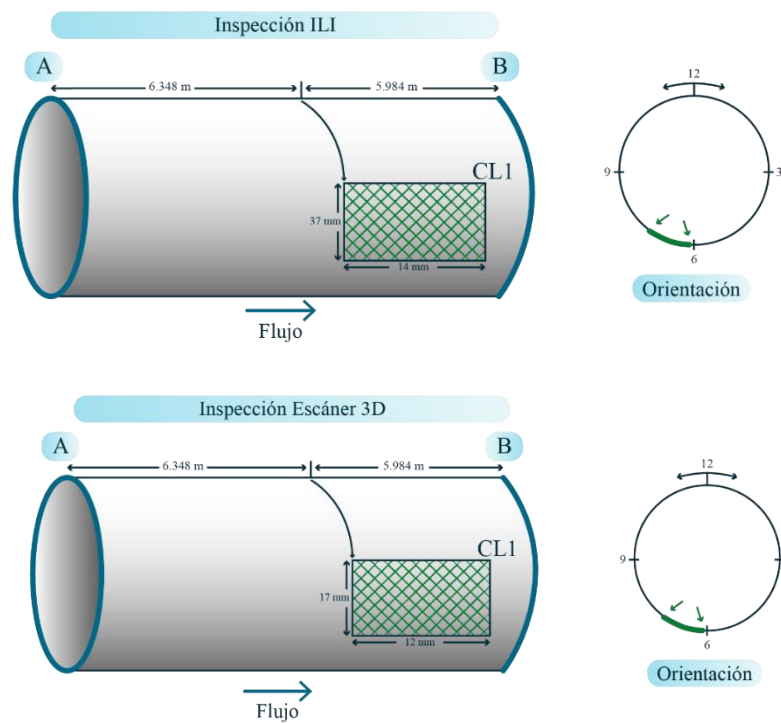
Dado que el escáner es una herramienta con mayor precisión va a detectar más anomalías o clusters en comparación con el ILI. Por tanto, es fundamental cotejar que se esté validando la misma anomalía en ambas herramientas, asegurando así que el procedimiento estipulado por la norma API 1163 se realice correctamente.

Para realizar este cotejo, primero se debe identificar la ubicación de los clusters o anomalías detectadas por el ILI en sus respectivos reportes en relación con los parámetros de distancia relativa soldadura aguas arriba y aguas abajo, así como la orientación o posición horaria en la que se encuentran respecto al ducto. Una vez obtenidos estos datos, se procede a compararlos con los valores correspondientes obtenidos por el escáner 3D, asegurando que las mediciones de ambos

métodos coincidan en ubicación y orientación (ver figura 9). Las anomalías detectadas por el escáner que no coincidan con estos parámetros respecto a los datos del ILI no se tendrán en cuenta para la validación.

### Figura 9

*Cotejo de clusters ubicados en un ducto*



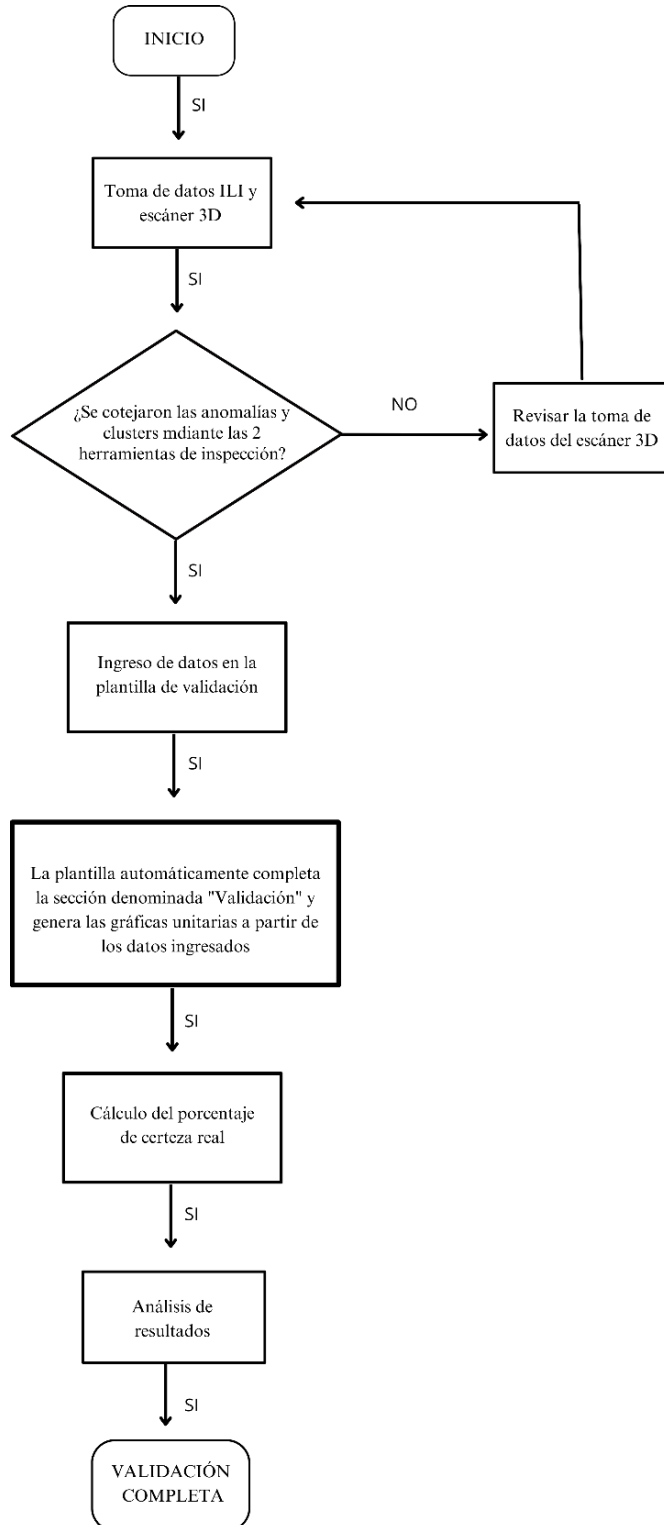
*Nota.* Cotejo entre el cluster detectado por el ILI y el escáner 3D comparando su ubicación y orientación para asegurar que se esté evaluando la misma anomalía.

### **3.2 Aplicación de la plantilla API 1163**

Para realizar el proceso de validación, se ha desarrollado una metodología que abarca los pasos generales para el uso de la plantilla (ver figura 10). No obstante, se ha elaborado una guía más específica, diseñada conforme a la norma API 1163, que detalla el uso de cada columna. Para consultar esta metodología se debe ver los apéndices adjuntos que pueden ser consultados en el repositorio de la Biblioteca UIS.

**Figura 10**

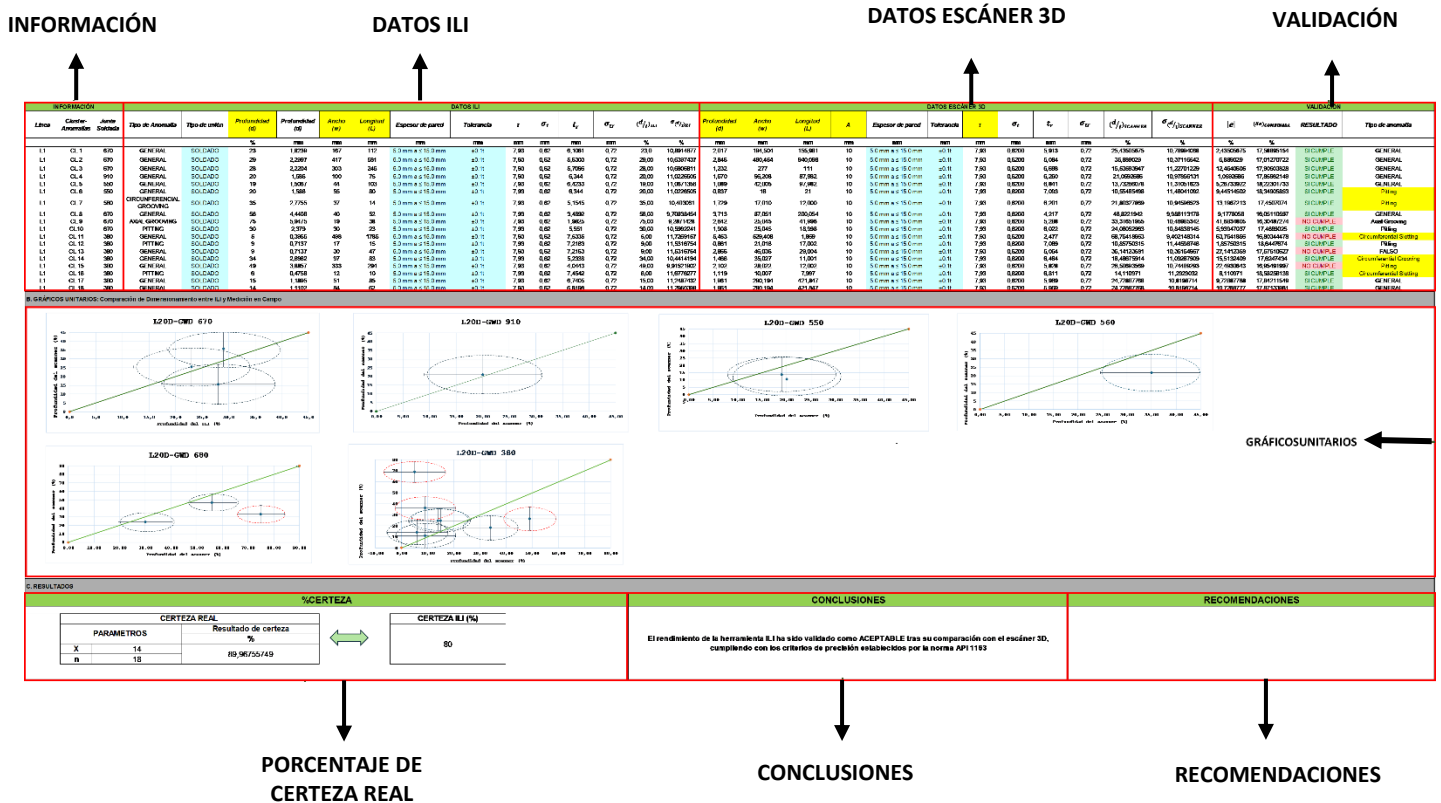
*Diagrama de Flujo de la metodología para el uso de la plantilla de validación*



A continuación, en la figura 11, se presenta un bosquejo de las secciones pertenecientes a la plantilla diseñada.

Figura 11

Secciones de la plantilla de validación bajo la norma API 1163



### 3.2.1 Información general

Primer paso, se debe completar la sección denominada “Información”. Esta sección se basa en los datos proporcionados del ducto inspeccionado.

### 3.2.2 Datos ILI

Para diligenciar esta sección de la plantilla, se deben suministrar manualmente los datos de las columnas denominadas como profundidad, ancho y longitud. El resto de las columnas se diligenciarán automáticamente una vez ingresados estos datos manuales.

### ***3.2.3 Datos escáner 3D***

Para completar esta sección de la plantilla, se requiere el ingreso manual de los datos obtenidos por el escáner 3D. Específicamente, se deben suministrar los valores correspondientes a la profundidad, ancho y longitud de las anomalías detectadas. Además, es necesario introducir el parámetro A, cuyo valor dependerá del espesor de pared general del ducto. Asimismo, se debe incluir el espesor de pared reportado por el escáner 3D.

### ***3.2.4 Validación***

En esta sección, la plantilla generará automáticamente los resultados correspondientes al proceso de validación. Específicamente, el sistema evaluará si los datos del ILI cumplen o no con los parámetros de validación establecidos por las especificaciones de dimensionamiento de la norma API 1163.

### ***3.2.5 Gráficos unitarios***

Para el desarrollo de estos gráficos, la plantilla tomará automáticamente los datos proporcionados en la tabla de validación y generará los gráficos correspondientes.

### ***3.2.6 Porcentaje de certeza real***

Para el cálculo del porcentaje, se debe utilizar la siguiente información: "n" representa el número total de anomalías y clusters analizados, mientras que "x" representa el número total de clusters y anomalías que cumplen con los criterios de validación. La plantilla calculará automáticamente este porcentaje.

Una vez obtenidos los resultados de la plantilla de validación, el siguiente paso es analizar los datos logrados y determinar si la inspección realizada por el ILI cumple con los criterios de dimensionamiento estipulados bajo la norma.

## 4. Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados de validación que se obtuvieron del análisis de los datos proporcionados por el proveedor el ILI y de los datos tomados por medio del escáner 3D.

### 4.1 Ingreso de datos

Al completar esta sección de la plantilla y analizar los resultados obtenidos, es importante tener en cuenta que el ducto analizado fue fabricado mediante uniones soldadas y su espesor general de pared corresponde a 7,93 mm. En este caso, se evaluaron 16 clusters y dos anomalías individuales. Durante la implementación del método de conexión “Connecting box”, estas anomalías individuales no se agruparon con otras, por lo que no formaron parte de los clusters generados. Esta falta de agrupación se debió a que al ampliar sus dimensiones en 0,5 veces tanto en longitud como en ancho no se superpusieron con otras anomalías.

Sin embargo, tal como se explicó en la metodología, la plantilla diseñada está preparada para evaluar tanto clusters como anomalías individuales, garantizando una evaluación integral independientemente de si las anomalías se agrupan o permanecen aisladas.

### 4.2 Análisis de las desviaciones estándar

En el proceso posterior de validación mediante la plantilla, una vez ingresados los datos de profundidad, ancho y longitud, es fundamental considerar la columna denominada “Desviación estándar del espesor de pared”. Este parámetro se asume como un error de medición que sigue una distribución normal, conforme a lo estipulado por la norma API 1163. En un proceso de fabricación, es común encontrar pequeñas diferencias en el espesor.

La distribución normal implica que la mayoría de los errores de medición serán pequeños y se concentrarán en torno al espesor nominal, mientras que los errores más grandes serán menos frecuentes. Por lo tanto, la desviación estándar puede considerarse como la tolerancia de

fabricación, tal como se establece en la norma API 5L teniendo en cuenta un nivel de certeza que indique cuántas mediciones se encontrarán dentro de un rango específico. Según la norma API 1163, si la corrida del ILI se llevó a cabo con un 80% de certeza, el valor de Z será 1,28, es decir, el 80% de las mediciones estarán dentro de 1,28 desviaciones estándar del espesor nominal, pero si la corrida se realizó con un 90% de certeza, el valor de Z será 1,64.

Con base en esto, la fórmula utilizada para programar la columna de la desviación estándar  $\sigma t$  fue la siguiente:

$$\sigma t = \frac{\text{Tolerancia}}{Z} \quad (4)$$

Donde:

$\sigma t$  = *Desviación estándar del espesor de pared.*

$Z$  = *El valor del nivel de certeza deseado.*

Seguido de esto, se encuentra la desviación estándar del espesor remanente. En este caso, también como se estipula en la norma API 1163, se sumará 0,1 a la desviación estándar del espesor de pared. Esto se debe a que las mediciones de este espesor presentan una mayor incertidumbre. Al sumar este valor, se garantiza que se están considerando posibles errores adicionales como el margen de error que maneja el equipo de medición.

Por lo tanto, la estandarización del tratamiento de la incertidumbre asegura un análisis más confiable de los datos obtenidos. Asimismo, este mismo análisis de las desviaciones estándar del espesor nominal y del espesor remanente debe aplicarse a las columnas designadas para el escáner 3D, ya que se está evaluando el mismo ducto.

A continuación, se aborda la desviación estándar de la pérdida de metal, que se calcula a través de la propagación de los errores obtenidos en las mediciones. En este proceso, se combinan

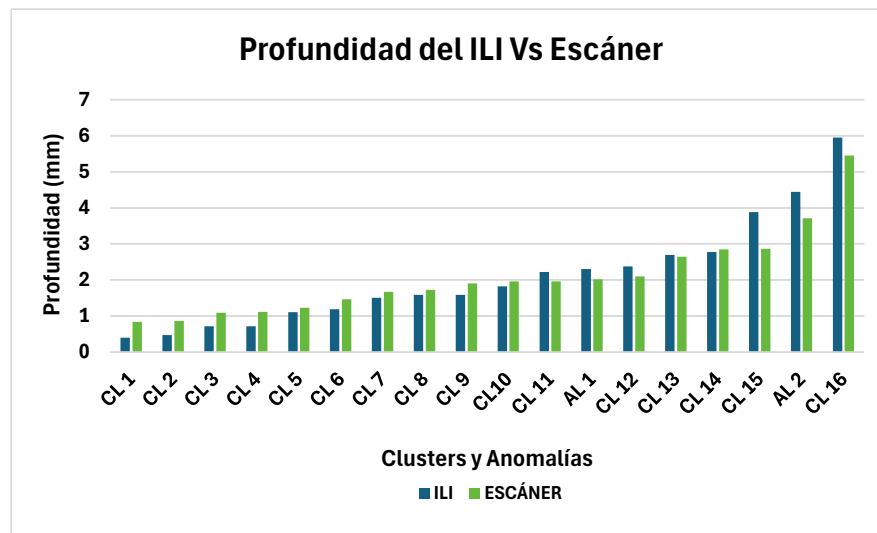
las desviaciones estándar del espesor general de pared y del espesor remanente, obteniendo así una desviación estándar total.

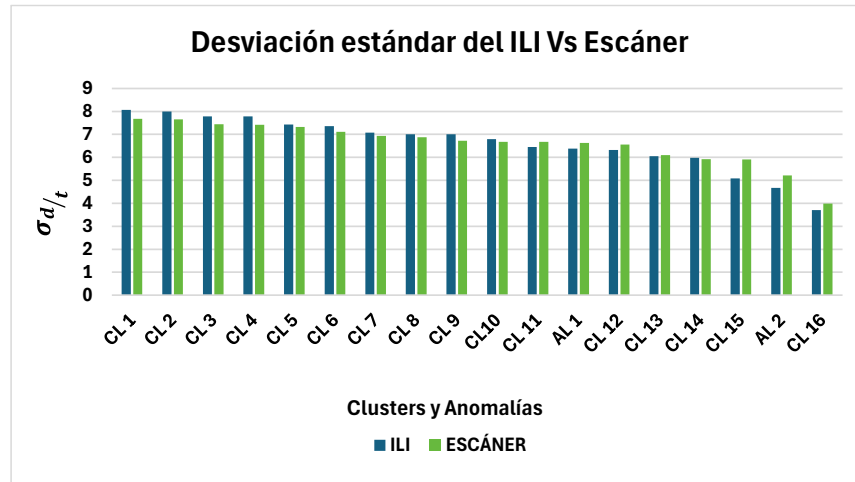
En el análisis de las profundidades obtenidas por el escáner y el ILI (ver figura 12), así como en la evaluación de la desviación estándar de la pérdida relativa de metal (ver figura 13), se identificó que los clusters 1 hasta el 10 presentaron profundidades de pérdida de metal en un rango de 0,837 mm a 1,908 mm, respectivamente. Al correlacionar estos valores con las desviaciones estándar obtenidas, se observó que el escáner mostró una desviación estándar menor en comparación con las dimensiones de profundidad detectadas por el ILI para las mismas anomalías.

Este comportamiento sugiere que el escáner, como herramienta de validación de campo con una mayor resolución, ofrece una precisión superior al detectar anomalías con pequeñas profundidades, logrando mediciones más cercanas al valor real. Por el contrario, el ILI presenta una mayor dispersión en las mediciones cuando se trata de detectar defectos de menor magnitud.

**Figura 12**

*Profundidades de los clusters y anomalías*



**Figura 13***Desviación estándar del ILI Vs Escáner 3D*

Al realizar este análisis sobre la profundidad y su desviación estándar con respecto a la pérdida de metal relativa, no es posible concluir de inmediato que los datos tomados por el ILI son erróneos. Para determinar si las dimensiones obtenidas por el ILI son válidas en comparación con las mediciones realizadas por el escáner, es necesario calcular primero un valor de tolerancia combinada. Este valor permitirá evaluar si las diferencias observadas entre ambas mediciones son aceptables.

Para llevar a cabo este análisis, el primer paso es calcular la diferencia entre las mediciones de la pérdida de metal obtenidas por el ILI y las del escáner. Este cálculo se realiza en la plantilla y se refleja en la columna denominada  $|e|$ . Posteriormente, se calcula la tolerancia combinada, que tiene en cuenta las desviaciones estándar individuales tanto del ILI como del escáner. De esta forma, se obtiene una tolerancia aceptable para las diferencias observadas entre las mediciones.

Por tanto, el criterio para determinar si una medición cumple o no con los requisitos viene dado por las siguientes condiciones:

*Si  $|e| < (\delta e)_{COMBINADA}$ , entonces las mediciones del ILI si cumplen*

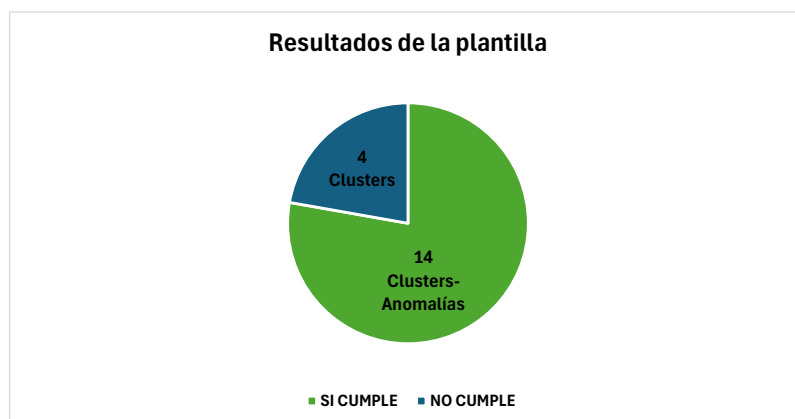
*Si  $|e| > (\delta e)_{COMBINADA}$ , entonces las mediciones del ILI no cumplen*

Esto significa que las diferencias calculadas en la plantilla se comparan con la tolerancia combinada. Si las diferencias entre las mediciones del ILI y las obtenidas por el escáner 3D se encuentran dentro de esta tolerancia, se puede concluir que las mediciones realizadas por el ILI en ese cluster o anomalía son aceptables en comparación con las mediciones del escáner. En caso contrario, si las diferencias exceden los límites de la tolerancia combinada, indica que las mediciones tomadas por el ILI presentan una discrepancia significativa en comparación con las del escáner, lo que sugiere que no cumplen con los criterios de validación establecidos.

Posteriormente, tras la validación con los datos obtenidos de la plantilla del ducto ubicado en Barrancabermeja, se determinó que 4 de los clusters analizados no cumplieron con las especificaciones establecidas para el análisis de dimensionamiento de la profundidad de estas anomalías (ver figura 14). Esto significa que las mediciones de profundidad realizadas por el ILI quedaron fuera del rango de la tolerancia combinada aceptable, lo que revela una discrepancia significativa en comparación con las mediciones tomadas por el escáner 3D.

### **Figura 14**

*Resultados obtenidos de la validación de la plantilla*



Otro análisis que se puede realizar, además de la profundidad de las anomalías, es en relación con la longitud y el ancho de las mismas. El ILI tiene la capacidad de clasificar las anomalías y los clusters detectados en su reporte, basándose en el tipo de pérdida de metal, conforme a lo estipulado en la tabla de criterios de dimensionamiento presentada en la Tabla 1 de la metodología. Sin embargo, el escáner no clasifica los clusters y anomalías según el tipo de pérdida de metal.

Por lo tanto, en la plantilla, en la sección de verificación, dentro de la columna “Tipo de anomalía”, se clasifican las anomalías y clusters según la pérdida de metal, empleando los parámetros establecidos por la norma API 1163. En cuanto a los resultados obtenidos de la clasificación del escáner, estos se comparan con los del ILI (ver tabla 3), observándose que varios de estos clusters no coinciden con la clasificación reportada por la herramienta de inspección en línea.

**Tabla 3***Resultados de la clasificación de los clusters y anomalías*

Cluster-anomalía	Tipo de anomalía	
	ILI	Escáner 3D
CL 1	General	General
CL 2	General	General
CL 3	General	General
CL 4	General	General
CL 5	General	General
CL 6	General	Pitting
CL 7	Circumferential grooving	Pitting
CL 8	General	General
CL 9	Axial grooving	Axial grooving
CL10	Pitting	Pitting
CL 11	General	General
AL 1	Pitting	Pitting
CL 12	General	General
CL 13	General	Circumferential grooving
CL 14	General	Pitting
CL 15	Pitting	Pitting
AL 2	General	General
CL 16	General	General

En la Tabla 4 se especifican los clusters que no coincidieron en la clasificación obtenida a partir del escáner. Se observa que, gracias a su mayor resolución y precisión, este equipo detecta anomalías con dimensiones más pequeñas en comparación con las reportadas por el ILI. Esta diferencia se debe a la capacidad del escáner para identificar detalles finos, mientras que la herramienta de inspección en línea tiende a una mayor dispersión y generalización en los datos

recolectados en la clasificación, especialmente en cuanto a las longitudes y anchos de las anomalías.

**Tabla 4**

*Clusters que presentaron discrepancia en la clasificación según su ancho y longitud*

Cluster-anomalía	ILI			Escáner 3D		
	Tipo de anomalía	Ancho (mm)	Longitud (mm)	Tipo de anomalía	Ancho (mm)	Longitud (mm)
CL 6	General	55	80	Pitting	16	21
CL 7	Circumferential grooving	37	14	Pitting	17	12
CL 13	General	97	83	Circumferential grooving	35	11
CL 14	General	333	294	Pitting	28	12

### 4.3 Análisis de los Gráficos Unitarios

Los gráficos unitarios desarrollados en la plantilla se hacen con el fin de ver radicalmente los resultados obtenidos en la sección de ingreso de datos analizada anteriormente, en estos gráficos se puede evaluar gráficamente la precisión de la herramienta del ILI respecto a las mediciones tomadas en campo con el escáner.

Entre los 16 clusters y 2 anomalías analizadas, se obtuvo como resultado que 4 de ellos no cumplían con las especificaciones de dimensionamiento de profundidad. Por lo tanto, para el análisis, los resultados deben coincidir con los valores presentados en las gráficas de dimensionamiento de las características de pérdida de metal.

En este caso, las gráficas se analizaron por junta de soldadura, es decir, se realizó un análisis en una sola gráfica para todos los clusters o anomalías detectadas en una junta soldada. Posteriormente, se repite el proceso para las demás soldaduras. A continuación, se presenta el análisis correspondiente a la interpretación de estos gráficos unitarios:

### 4.3.1 Línea diagonal (Verde)

Representa la línea de igualdad, que es cuando la profundidad reportada por el ILI y la medida en campo coinciden. Si los datos se alinearan perfectamente sobre esta línea, esto indicaría que no hay diferencias entre las mediciones en campo y los datos del ILI.

### 4.3.2 Elipses superpuestas

El gráfico muestra las profundidades del ILI en el eje horizontal y las mediciones de campo en el eje vertical. Las elipses de tolerancia, basadas en las desviaciones estándar, reflejan la incertidumbre en ambas mediciones, indicando el rango probable de variación. Si una elipse toca la línea unitaria (línea diagonal), la anomalía o cluster se considera dentro de las especificaciones de dimensionamiento.

Por tanto, para generar estos gráficos, se utilizaron las columnas de la plantilla correspondientes a profundidades de pérdida de metal  $(d/t)_{ILI; Escáner}$  y desviación estándar  $\sigma^{(d/t)_{ILI; Escáner}}$

En este caso, se analizaron seis juntas soldadas, lo que dio lugar a seis gráficos que contienen los 16 clusters y dos anomalías estudiadas.

A continuación, en la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos del proceso de validación, en la cual se detalla que la junta soldada 670 contiene tres clusters que cumplen con las especificaciones de dimensionamiento. En el gráfico correspondiente, aunque se observa cierta desviación estándar entre las mediciones del ILI y del escáner, dichas desviaciones se mantienen dentro del rango de tolerancia, ya que las elipses de error tocan la línea unitaria (ver figura 15). Este mismo análisis aplica para los resultados obtenidos en las juntas soldadas 910, 550 y 560, donde los clusters también cumplen con las especificaciones establecidas (ver figura 15).

En cuanto a la junta de soldadura 680, en la cual se analizaron tres clusters, dos de ellos cumplieron con las especificaciones de dimensionamiento durante el proceso de validación. Sin

embargo, el cluster que no cumplió también se reflejó en la gráfica correspondiente (ver figura 16). En esta gráfica, al comparar las profundidades obtenidas por el ILI y el escáner para el cluster CL 9, junto con sus respectivas desviaciones estándar, se observa que la elipse no toca la línea unitaria, lo que indica que el cluster no está dentro de las tolerancias o no cumple con las especificaciones dimensionales de la norma API 1163.

Este análisis es aplicable también a los clusters y anomalías detectados en la junta soldada 380. De los ocho clusters detectados, tres no cumplieron con las especificaciones, mientras que los otros tres clusters y dos anomalías sí las cumplieron. En la gráfica (ver figura 16), se puede observar que las elipses no tocan la línea unitaria, lo que indica que esos clusters no se encuentran dentro de las tolerancias establecidas.

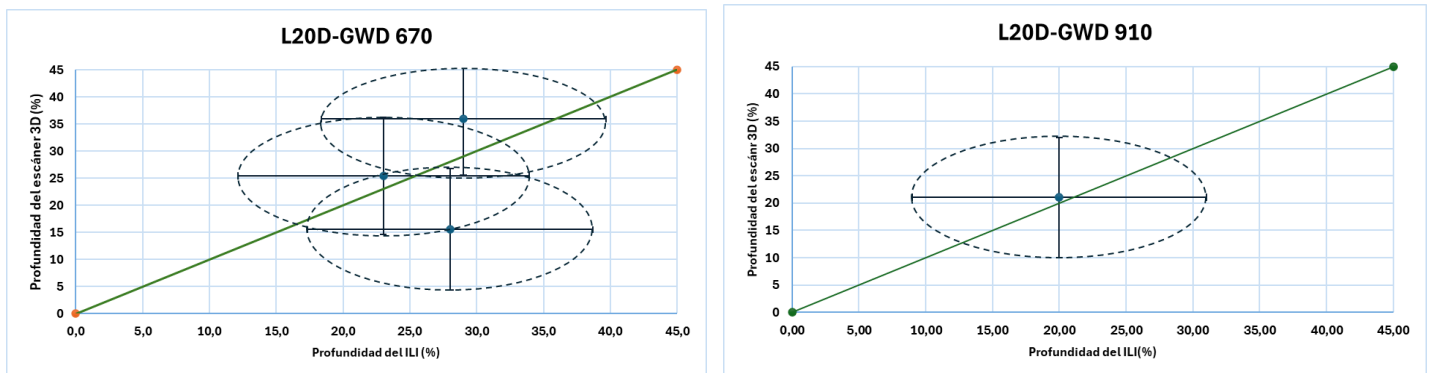
**Tabla 5**

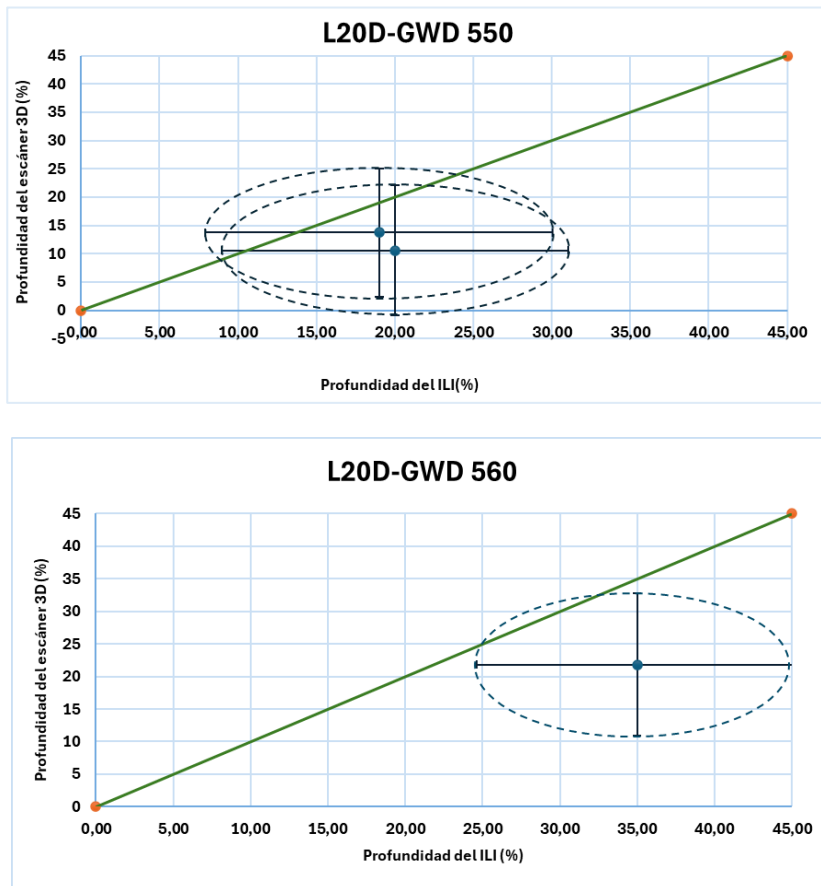
*Resultados del proceso de validación respecto a las profundidades de los clusters y anomalías*

Línea	Cluster-Anomalías	Junta Soldada	Resultado
L1	CL 1	670	Sí cumple
L1	CL 2	670	Sí cumple
L1	CL 3	670	Sí cumple
L1	CL 4	910	Sí cumple
L1	CL 5	550	Sí cumple
L1	CL 6	550	Sí cumple
L1	CL 7	560	Sí cumple
L1	CL 8	680	Sí cumple
L1	CL 9	680	No cumple
L1	CL10	680	Sí cumple
L1	CL 11	380	No cumple
L1	AL 1	380	Sí cumple
L1	CL 12	380	No cumple
L1	CL 14	380	Sí cumple
L1	CL 15	380	No cumple
L1	CL 16	380	Sí cumple
L1	AL 2	380	Sí cumple
L1	CL 18	380	Sí cumple

**Figura 15**

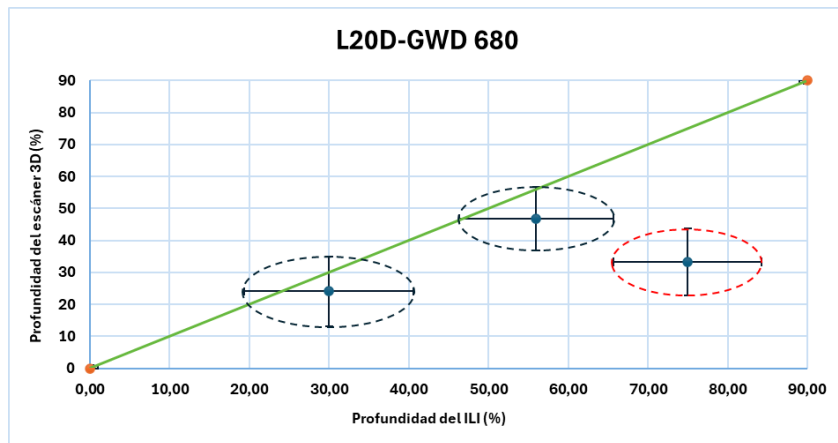
*Representación gráfica de los clusters y anomalías que cumplen con los criterios establecidos*

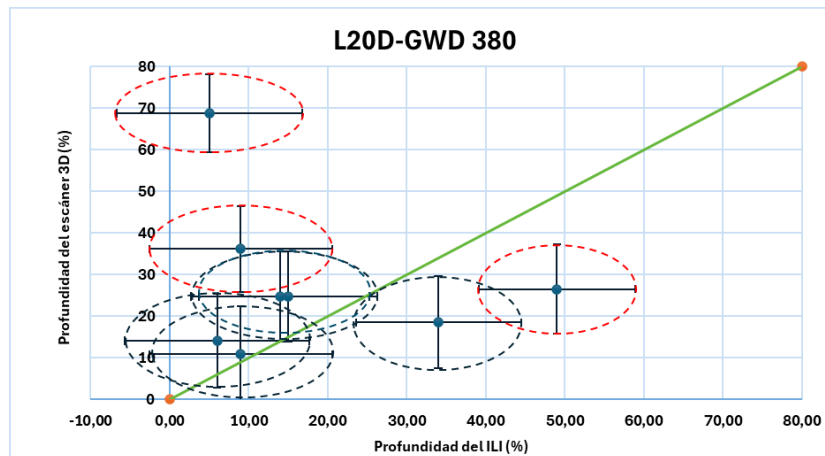




**Figura 16**

*Representación gráfica de los clusters y anomalías que no cumplen con los criterios*





#### 4.4 Análisis del Porcentaje de Certeza

Para evaluar la integridad del ILI, no es suficiente con identificar las anomalías que cumplen con las especificaciones de dimensionamiento según la norma. El paso crucial consiste en calcular el porcentaje de certeza real de las mediciones dentro de la tolerancia, utilizando la información validada.

Este cálculo de certeza es fundamental, ya que nos permite determinar con qué grado de confiabilidad podemos aceptar los resultados del ILI. Aunque ya se hayan identificado las anomalías que cumplen con las especificaciones, esto por sí solo no define la integridad completa de la inspección.

Para llegar a un criterio definitivo sobre la integridad del ILI es necesario aplicar una fórmula específica denominada “Proporción de mediciones dentro de la tolerancia”. Este análisis estadístico nos proporcionará el porcentaje de certeza de la validación, lo cual es un indicador confiable de la precisión general de la inspección.

$$\%Certeza\ real = \left[ \frac{x + 1,35}{n + 2,69} \right] + 1,64 \sqrt{\frac{\left[ \frac{x + 1,35}{n + 2,69} \right] \left( 1 - \left[ \frac{x + 1,35}{n + 2,69} \right] \right)}{n + 2,69}} \quad (5)$$

Donde:

*x*: Es el número de mediciones dentro de la tolerancia en la muestra.

*n*: Es el tamaño total de la muestra.

Por ende, la norma establece el siguiente análisis respecto al porcentaje de certeza de la validación:

Si el porcentaje de certeza real es mayor o igual al porcentaje de certeza proporcionado por el ILI, se considera que el rendimiento del ILI respecto a la validación del dimensionamiento es aceptable. Esto indica que la herramienta de inspección está cumpliendo con las expectativas de precisión establecidas por el proveedor.

Si el porcentaje de certeza real calculado es inferior al porcentaje de certeza del proveedor, se concluye que el rendimiento de la herramienta no es aceptable bajo las especificaciones de medición de la norma API 1163. En este caso, la precisión real de la inspección no cumple con los estándares prometidos por el proveedor del ILI.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el caso que se está analizando se tiene que de las 18 anomalías y clusters analizados, 4 no cumplen con las especificaciones. Por tanto, *x*: 14 y *n*: 18. Aplicando la fórmula, se obtiene que el porcentaje de certeza real corresponde a un 89,9675%. Siendo este superior al porcentaje de certeza especificado por el ILI correspondiente al 80% (ver figura 17). Esto quiere decir que el rendimiento de la herramienta del ILI es aceptable respecto a

las especificaciones de dimensionamiento estipuladas y, por ende, la herramienta ha funcionado de acuerdo con su especificación de rendimiento establecida por el proveedor.

**Figura 17**

*Resultado del porcentaje de certeza real de la validación*

%CERTEZA												
CERTEZA REAL		<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #e6e6fa;">CERTEZA ILI (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">80</td> </tr> </tbody> </table>	CERTEZA ILI (%)		80							
CERTEZA ILI (%)												
80												
PARÁMETROS		<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">Resultado de certeza</th> </tr> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">x</td> <td style="text-align: center;">14</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">n</td> <td style="text-align: center;">18</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">89,96755749</td> </tr> </tbody> </table>	Resultado de certeza		%		x	14	n	18	89,96755749	
Resultado de certeza												
%												
x	14											
n	18											
89,96755749												

## 5. Conclusiones

El análisis de esta investigación demostró que, a pesar de los avances significativos en la tecnología de inspección en línea (ILI) y su uso extendido en la industria de hidrocarburos para detectar tanto características internas como externas de los ductos, sigue siendo esencial validar su precisión en la detección de anomalías superficiales externas.

Al analizar la norma API 1163, se identificaron los criterios claves para la calificación de los sistemas de inspección en línea (ILI), destacándose el porcentaje de certeza global respecto a las profundidades de las anomalías detectadas como el principal parámetro de evaluación.

A través del proceso establecido para obtener los informes del escáner 3D y los datos proporcionados por la inspección en línea (ILI), se pudo realizar una comparación detallada de las anomalías detectadas. El uso del escáner 3D permitió una mayor precisión en la identificación de anomalías superficiales, sirviendo como referencia clave para la validación de los resultados del ILI.

El desarrollo de una metodología detallada para validar los datos obtenidos de los sistemas de inspección en línea (ILI) mediante una plantilla comparativa con los datos del escáner 3D sirve de guía al usuario en la correcta implementación y uso de la plantilla, facilitando la interpretación precisa de los resultados y la evaluación del rendimiento de las herramientas ILI.

Finalmente, este trabajo subraya la importancia de realizar verificaciones en campo, un proceso que no solo facilita la generación de recomendaciones futuras, como la calibración del equipo, sino que también garantiza la entrega de datos confiables, esenciales para una evaluación precisa y válida de la integridad del ducto.

### Referencias Bibliográficas

- American petroleum institute.(2013). in-line inspection systems qualification (1163).  
<https://www.api.org/~//media/files/publications/whats%20new/1163%20e2%20pa.pdf>
- American petroleum institute. (2018). in-line inspection systems qualification (5L).  
<https://www.api.org/products-and-services/es/standards>
- Arboleda, j. (2020). inspección en línea – ili - en ductos desafiantes o no  
 marraneables [monografía para obtener el título de especialista en gestión de la integridad  
 y corrosión, universidad pedagógica y tecnológica de colombia].  
<https://repositorio.uptc.edu.co/server/api/core/bitstreams/fa2e5454-7097-4fde-817c-30c542d70c68/content>
- Diseño e implementación de un escaner 3d para la reconstrucción de una superficie a través de una  
 nube de puntos. (2016). [tesis de grado, institución universitaria politécnico  
 grancolombiano]. <https://alejandria.poligran.edu.co/bitstream/handle/10823/653/escaner-3d.pdf?sequence=1&isallowed=y>
- Etudio y desarrollo de un escáner 3d de bajo costo. (2018). [tesis de pregrado, pontificia  
 universidad católica de valparaíso]. [http://opac.pucv.cl/pucv\\_txt/txt-7500/ucc7734\\_01.pdf](http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-7500/ucc7734_01.pdf)
- Specifications and requirements for in-line inspection of pipelines (pof 100). (2021).  
 recuperado 15 de julio de 2024, de <https://pipelineoperators.org/cdn/276341a3-f5e6-49cf-9897de6ab41bdd5a/pof%20100%20specifications%20and%20requirements%20for%20il-i%20-%20nov%202021.pdf>

Tolerancia y precisión de medición | fundamentos de medición | biblioteca de medición |

keyence méxico. (s. f.).

<https://www.keyence.com.mx/ss/products/measure/library/basic/tolerance.jsp>

Tomar, m. s., fingerhut, m., & yu, d. (2008). qualification of ili performance in accordance

with api 1163 and the potential impact for management of pipeline integrity. 7th

international pipeline conference, pc2008-64469. <https://doi.org/10.1115/ipc2008-64469>

pipecheck. (2021). en creaform inc (versión 6.1). recuperado 20 de agosto de 2024, de

<https://www.creaform3d.com/es/centro-de-recursos/tips-tricks/pipecheck-asignacion-manual-de-areas-corroidas>