



**ANÁLISIS DE LOS DIFERENTES MODELOS DE VELOCIDAD DE CRECIMIENTO DE DEFECTOS CAUSADOS POR CORROSIÓN EN LA CONFIABILIDAD DE TUBERÍAS DE ACERO AL CARBONO QUE TRANSPORTAN HIDROCARBUROS**

**ANALYSIS OF THE DIFFERENT MODELS FOR THE GROWTH RATE OF THE CORROSION DEFECTS IN THE CARBON STEEL PIPELINES RELIABILITY THAT TRANSMIT HYDROCARBONS**

F. Caleyó<sup>1</sup>, A. Valor<sup>1</sup>, J.C. Velázquez<sup>2\*</sup>, J.M. Hallen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Metalúrgica, ESIQIE, IPN, UPALM, EDIF. 7, Zacatenco, México D.F., 07738.

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Química Industrial, ESIQIE, IPN, UPALM, EDIF. 7, Zacatenco, México D.F., 07738.

Recibido 21 de Diciembre de 2012; Aceptado 28 de Febrero de 2014

**Resumen**

En esta investigación se realizó un análisis de la evolución de la confiabilidad de ductos enterrados que transportan hidrocarburos basándose en cinco distribuciones de velocidad de crecimiento de defectos. Las distribuciones de velocidad de crecimiento utilizadas fueron: el valor único de velocidad de corrosión recomendado por la Asociación Nacional de Ingenieros en Corrosión (NACE) de Estados Unidos de América, el modelo lineal de crecimiento de defectos, un modelo de crecimiento no lineal que contempla las características del suelo y el modelo obtenido mediante cadenas de Markov. Los resultados logrados fueron comparados con el propósito de mostrar que considerar la edad, profundidad y tiempo de evolución de los defectos causados por corrosión resultan fundamentales en las estimaciones de la confiabilidad de ductos.

*Palabras clave:* acero al carbono, corrosión, confiabilidad, tuberías, modelación.

**Abstract**

In this research, it was carried out an analysis of the evolution of the underground pipelines structural reliability using five corrosion growth rate distributions. These distributions were based on: a single value recommended by NACE, linear growth model, nonlinear growth model taking into account the soil characteristics and Markov chains. The results obtained were compared among them in order to show that to take into consideration age, depth and time evolution of corrosion active defects are critical to estimate the pipeline reliability.

*Keywords:* carbon steel, corrosion, reliability, pipelines, modelling.

## 1 Introducción

Alrededor del mundo, el análisis de confiabilidad ha sido una herramienta importante para evaluar la integridad estructural de los ductos que transportan hidrocarburos (Caleyó y col., 2002; Caleyó y col., 2003; Caleyó y col., 2003; Stephens y col., 2006; Li y col., 2009). De forma específica, la confiabilidad de tuberías afectadas por la corrosión puede ser evaluada mediante aproximaciones probabilistas que consideran las incertidumbres asociadas con el

dimensionamiento de los defectos causados por la corrosión, los procesos de manufactura de la tubería y las condiciones de operación. En este contexto, la distribución de velocidad de crecimiento de defectos causados por corrosión debe ser establecida para predecir las futuras dimensiones de los defectos (Caleyó y col., 2002; Stephens y col., 2006; Race, y col., 2007). También es requerido construir un modelo de falla que utilice datos previos de daños

\*Autor para la correspondencia. E-mail: jcva8008@yahoo.com.mx  
Tel. (+52)-55-5729600 ext. 54205

por corrosión para determinar la probabilidad de falla por fuga o por ruptura (Stephens y col., 2006) de un ducto, tal y como se establece en los estudios de inspección basada en riesgo (RBI, *Risk Based Inspection*) (API RP 580). En este sentido, estimar la confiabilidad ayuda a programar de mejor manera los planes de inspección y reparación, así como reducir de forma significativa las fugas y rupturas que pudieran presentar en un ducto en operación (Caleyo y col., 2003).

De los diferentes métodos desarrollados para evaluar la confiabilidad de ductos afectados por la corrosión, se ha puesto gran énfasis en corregir las incertidumbres inherentes en el dimensionamiento de los defectos (errores de medición) y en la conveniencia del modo de falla estudiado (Caleyo y col., 2002; Stephens y col., 2006; NACE RP 0169-92). Sin embargo, no se ha puesto la suficiente atención en el desarrollo de modelos para estimar la distribución de la velocidad de crecimiento de defectos, la cual determina la evolución en el tiempo de la confiabilidad.

La mayoría de los trabajos realizados hasta hoy determinan la confiabilidad utilizando un modelo de crecimiento lineal (velocidad de crecimiento constante en el tiempo) para estimar la distribución de velocidad de crecimiento (Caleyo y col., 2002; Caleyo y col., 2003; Stephens y col., 2006; Li y col., 2009; Sheikh y col., 1990). La Ecuación (1) describe este método de cálculo.

$$d(t) = d_0 + d't \quad (1)$$

Donde  $d(t)$  es la profundidad del defecto en función del tiempo,  $d_0$  es la profundidad inicial del defecto y  $d't$  es la derivada del modelo que estima la profundidad del defecto multiplicado por el tiempo.

Cuando se obtienen datos de una inspección en línea con equipo instrumentado, la distribución de velocidad de crecimiento puede ser estimada a partir de la Ecuación (1) para cada defecto, definiendo previamente un intervalo de tiempo desde que el ataque por corrosión comenzó. Para las tuberías que son inspeccionadas por primera vez, este intervalo puede ser obtenido a partir de la fecha de interferencia de terceros o por estimación de fecha del desprendimiento del recubrimiento. Cuando esta información no está disponible, se puede asumir que la profundidad inicial del defecto es cero y que el defecto ha crecido en un intervalo de tiempo proporcional al tiempo que lleva en operación (Race y col., 2007).

También es posible determinar la velocidad de crecimiento a partir de dos inspecciones consecutivas.

La velocidad de crecimiento es calculada de forma individual para cada defecto. Sin embargo, la disponibilidad de utilizar dos inspecciones consecutivas no es muy alta, debido a los cambios de tecnología entre ambas inspecciones, errores del odómetro y de medición.

A menudo, la velocidad de distribución de velocidad de crecimiento de defectos en ductos enterrados se basa en el conocimiento que tiene el operador de las características del suelo. Cuando no hay datos disponibles de velocidad de corrosión la Asociación Nacional de Ingenieros en Corrosión (NACE) de Estados Unidos de América recomienda utilizar una tasa de 0.4 mm/año (16 milésimas de pulgada) (Race, y col., 2007; NACE RP 0169-92).

Algunos autores han propuesto el uso de las distribuciones de Weibull y Normal para estimar las velocidades de crecimiento de defectos causados por corrosión. En este caso, la misma distribución es utilizada para cada uno de los defectos en cualquier punto en el tiempo de la vida útil del ducto.

Sin embargo, es ampliamente aceptado que la dependencia del tiempo de la profundidad de un defecto causado por corrosión sigue una ley de potencias, tal y como lo describe la Ecuación (2) (Velázquez y col., 2011). Por lo tanto, la velocidad de crecimiento de defectos causados por corrosión es dependiente del tiempo y sigue la Expresión (3).

$$d(t) = \alpha(t - t_{ini})^\nu \quad (2)$$

$$v(t) = \alpha\nu(t - t_{ini})^{\nu-1} \quad (3)$$

Donde  $\alpha$  y  $\nu$  son parámetros de regresión y  $t_{ini}$  es el tiempo en el que el defecto comienza a crecer; mientras que  $v(t)$  es la velocidad de crecimiento del defecto en función del tiempo.

Considerando la dependencia en el tiempo del crecimiento de defectos, la distribución de la velocidad de corrosión debe ser diferente a cuando se considera que la velocidad de crecimiento es constante en el tiempo.

Otras características de la velocidad de crecimiento de defectos causados por corrosión es la dependencia de la profundidad del defecto y su marcada aleatoriedad. Con el propósito de ilustrar esto, la Fig. 1 muestra como la media y la varianza de la velocidad de crecimiento dependen de la profundidad del defecto; estos resultados se obtuvieron mediante dos inspecciones consecutivas realizadas con equipos instrumentados a dos ductos en operación. Los resultados de las inspecciones realizadas a estos ductos fueron mostrados en

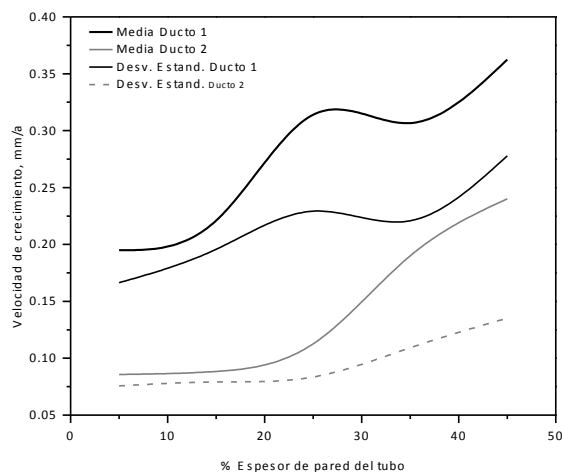


Fig. 1. Efecto de la profundidad en la velocidad de crecimiento.

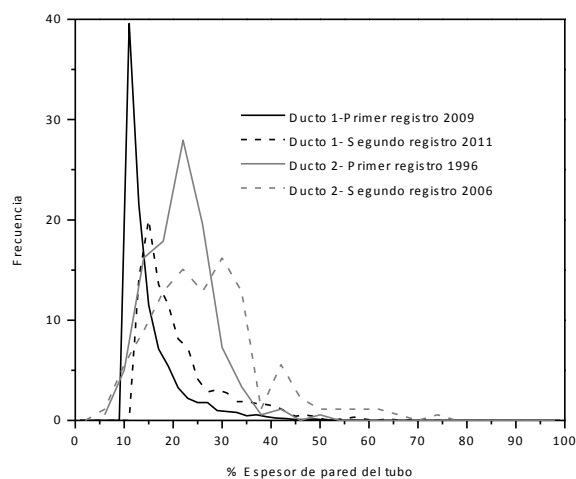


Fig. 2. Distribución de la profundidad de defectos para cada inspección.

la Fig. 2. Los defectos de corrosión fueron agrupados conforme a su profundidad en intervalos de 10% de espesor de pared del tubo, mientras que la media y la varianza de las distribuciones de velocidad de crecimiento para cada intervalo de profundidad fueron estimadas para los defectos cuya profundidad estuvo dentro del intervalo. Para cada defecto, su velocidad de crecimiento fue determinada obteniendo la diferencia entre las profundidades de la primera y la segunda inspección y dividiendo esta diferencia entre el tiempo transcurrido entre dichas inspecciones, tal y como fue establecido en la Ecuación (1).

La media y la varianza de la velocidad de crecimiento de los defectos encontrados en el Ducto 1 son mayores que para el Ducto 2, esto debido

a que los defectos del Ducto 1 son más jóvenes y de menor profundidad. También es importante mencionar que tanto la media como la varianza se incrementan conforme se aumenta la profundidad del defecto. Estos dos hechos, previamente descritos en investigaciones anteriores (Velázquez y col., 2011; Caleyo y col., 2009), son fundamentales para soportar la hipótesis de que los modelos que determinan la velocidad de crecimiento deberían considerar la edad y la profundidad de los defectos que evolucionan en el tiempo, junto con la función que describe la dependencia de la profundidad del defecto en el tiempo.

Basándose en lo anterior, el objetivo de este estudio es esclarecer qué modelo de crecimiento de defectos, de los mencionados con anterioridad, predice de mejor manera la evolución de la profundidad de defectos en ductos enterrados. Dicha información ayudará a determinar la distribución de velocidad de crecimiento que determina de mejor manera la confiabilidad. Los modelos utilizados en esta investigación están basados en publicaciones previas y en aproximaciones utilizadas en la industria. Para evaluar la precisión de los resultados obtenidos de cada modelo, las distribuciones futuras de profundidad de defecto fueron comparadas con los resultados obtenidos de una segunda medición utilizando equipo instrumentado en el mismo ducto.

Las distribuciones de velocidad de corrosión utilizadas en esta investigación incluyen la distribución de valor único basada en la recomendación de la NACE para ductos enterrados (NACE RP 0169-92), la distribución obtenida del modelo de crecimiento lineal, distribuciones dependientes e independientes del tiempo obtenidas de un modelo de crecimiento no lineal desarrollado por los autores en un trabajo previo y que considera las principales características del suelo (Velázquez y col., 2011; Caleyo y col., 2009) y una distribución obtenida mediante cadenas de Markov que también fue publicada por los autores en otro trabajo previo (Caleyo y col., 2009).

Las distribuciones futuras de profundidad de defectos fueron predichas para diferentes tiempos mediante los diferentes modelos de velocidad de crecimiento. Las profundidades de defectos iniciales y futuras fueron analizadas mediante simulaciones de Monte Carlo para calcular la presión de falla por presión de un ducto y posteriormente determinar el índice de falla anual en un lapso de tiempo. Los resultados de este estudio muestran la importancia de seleccionar adecuadamente la distribución de

velocidad de crecimiento para lograr un análisis de confiabilidad adecuado de un ducto que presente problemas de corrosión.

## 2 Metodología

Este estudio incluye procesamiento y análisis de datos de defectos tanto generados de forma artificial como los medidos a través de equipo instrumentado. Esto con la finalidad de establecer tanto el modelo más apropiado que describa el crecimiento de defectos como el funcionamiento de estos modelos cuando se incluyen en el análisis de confiabilidad de ductos.

Los datos experimentales utilizados en este trabajo fueron recolectados de dos mediciones de equipo instrumentado utilizando la técnica de Fuga de Flujo Magnético (MFL, *Magnetic Flow Leak*) llevadas a cabo en 1996 y en 2006 en un ducto de 8230 mm (18 pulgadas) de diámetro nominal, 28 Km de longitud utilizado para transportar gas natural en México, puesto en operación desde 1985. Este ducto es de acero al carbono API-5L-X52 recubierto con alquitrán de hulla y con un espesor de pared de 8.74 mm (0.344 pulgadas).

Antes de utilizar los datos de la inspección, los defectos de las dos inspecciones fueron seleccionados bajo las restricciones de coincidir en la localización y que la profundidad de los defectos seleccionados de la segunda medición sea mayor o igual a la de la primer medición. El equipo instrumentado fue calibrado siguiendo el procedimiento indicado en la publicación realizada por Caleyo y col. (2004). Considerando los errores generados por el odómetro y en la medición de espesores. Solamente los defectos seleccionados fueron utilizados en este estudio, esto con el propósito de asegurar que sólo los defectos que mostraron crecimiento fueran considerados y no se consideraron defectos que podrían haber nucleado en el intervalo de ambas inspecciones. Desde este punto de vista, los datos de la inspección fueron nombrados “1996-IEI” y “2006-IEI” para indicar datos de defectos seleccionados conforme a las inspecciones realizadas en 1996 y 2006 respectivamente.

La distribución de profundidad de defectos medidos en 1996 fue considerada como distribución inicial. Después de afectar esta distribución por la distribución de velocidad de crecimiento la distribución resultante fue comparada con la distribución “2006-IEI” para evaluar qué modelo describe de mejor manera el crecimiento de defectos en el lapso de 10 años que existe entre estas

dos inspecciones. Adicionalmente, una distribución empírica de velocidad de corrosión fue determinada utilizando datos de ambas inspecciones basándose en el cambio de profundidad de los defectos seleccionados. Esta distribución empírica fue comparada con distribuciones de velocidad de crecimiento obtenidas de otros modelos.

Las distribuciones de profundidad y longitud de defectos, diámetro y espesor de pared del tubo, y esfuerzo último a la tensión fueron utilizadas en este estudio y se detallan en la siguiente sección de este artículo.

## 3 Modelos de velocidad de corrosión

Un total de cinco modelos de velocidad de crecimiento fueron utilizados para determinar la distribución de profundidades iniciales de defectos utilizando “1996-IEI”. El intervalo de análisis o tiempo de evolución fue de 10 años. La modelación del crecimiento fue diseñada de tal forma que excluye la evolución de la longitud de los defectos. El propósito de esto, surge del hecho de que los cambios en la longitud del defecto tienen poca influencia en el cálculo de la probabilidad de falla, tal y como es mencionado por Caleyo y col. (2002).

Los modelos de velocidad de corrosión utilizados, son los siguientes:

- (i) Modelo de crecimiento lineal.
- (ii) Modelo Markoviano.
- (iii) Modelo basado en una distribución Generalizada de Valores Extremos independiente del tiempo (IT-GEVD).
- (iv) Modelo basado en una distribución Generalizada de Valores Extremos dependiente del tiempo (DT-GEVD).
- (v) Modelo de valor único siguiendo la recomendaciones de la NACE.

(i) Modelo de crecimiento lineal. Este modelo asume que la profundidad de cada defecto causado por la corrosión evoluciona en el tiempo a través de la Ecuación (1) y la ecuación de velocidad de crecimiento se calcula conforme a la (4). Para los defectos seleccionados por la inspección de 1996, se asumió una profundidad inicial de cero y un intervalo

de tiempo de 11 años desde el comienzo de operación de ducto (1985).

$$d' = d(t_1)/t_1 \quad (4)$$

La profundidad predicha de cada defecto en el tiempo de la segunda inspección (2006) puede ser calculada también utilizando la Expresión (1). En este caso se utilizaron los defectos seleccionados con las profundidades medidas en 1996, la velocidad de corrosión es obtenida por la Ecuación (4) y el intervalo de tiempo es de 10 años.

Es importante notar que en el modelo de crecimiento lineal, la velocidad de crecimiento asociada a cada defecto es constante dentro del intervalo de tiempo analizado, mientras que la profundidad inicial se obtiene a partir de la inspección realizada en 1996. Por lo tanto, la edad y las profundidades de los defectos son consideradas en este modelo, pero no se considera la naturaleza no lineal en el crecimiento de estos defectos; trayendo como consecuencia un efecto conservador en el cálculo de la confiabilidad, sobre todo si el tiempo de servicio es muy largo.

La distribución de velocidad de crecimiento que resulta de este modelo sigue una distribución normal con media igual a la velocidad de crecimiento estimada por el valor medio de las distribuciones de profundidades de defectos observadas. La desviación estándar de estas distribuciones de crecimiento está dada por errores aleatorios encontrados en las mediciones del equipo instrumentado. Consecuentemente, durante el cálculo de la confiabilidad, cada defecto es afectado por una distribución normal de velocidad de corrosión, la cual varía de un defecto a otro sólo en su valor medio. Esta observación limita el modelo de crecimiento lineal, dado que la naturaleza estocástica del fenómeno de corrosión difieren conforme a las dimensiones y edad de los defectos, tal y como se ilustra en las figs. 1 y 2 (Velázquez y col., 2011; Caleyo y col., 2009).

(ii) Modelo Markoviano. El modelo markoviano utilizado en esta investigación es descrito por Caleyo y col. (2009). Este modelo está basado en un proceso de Markov de nacimiento puro, capaz de modelar el crecimiento de defectos localizados en ductos enterrados. Esto permite una predicción de la evolución de la profundidad de defectos y de distribución de velocidades a partir de las características del suelo y del tipo de recubrimiento. Para utilizar este modelo, sólo se necesita la distribución inicial de los defectos y el exponente ?

de la Ecuación (2), el cual es característico del tipo de suelo (Velázquez y col., 2011; Caleyo y col., 2009).

Utilizando las profundidades inicial y final de los defectos, el exponente  $\nu$  fue calculado, en lugar de utilizar los valores previos mencionados en publicaciones anteriores (Velázquez y col. 2011; Caleyo y col., 2009). El espesor de pared fue dividido en  $N$  igualmente espaciados estados de Markov (0.1 mm). Entonces, la profundidad de defectos observada fue convertida en estados de Markov y la distribución de profundidad es dada en términos de probabilidad  $p_m(t_0)$  para la profundidad en un estado igual o menor que  $m$  en un tiempo  $t_0$ . Recientemente, se mostró que la probabilidad de que un defecto esté en el estado  $n(n \geq m)$  en un tiempo  $t = t_0 + \delta t$  está dado por las Ecuaciones (5) y (6) (Caleyo y col., 2009).

En la Ecuación (5),  $t_{ini}$  y  $\nu$  son parámetros que describen la evolución no lineal en el tiempo de la profundidad de defectos en ductos enterrados conforme a la Ecuación (2), mientras que  $t_0$  corresponde al tiempo en el que  $p_m(t_0)$  fue observada, en otras palabras, el tiempo en el que se llevó a cabo la inspección inicial.

$$p_n(t) = \sum_{m=1}^n p_m(t_0) \binom{n-1}{n-m} \left( \frac{t_0 - t_{ini}}{t - t_{ini}} \right)^{\nu m} \left[ 1 - \left( \frac{t_0 - t_{ini}}{t - t_{ini}} \right) \right]^{n-m} \quad (5)$$

$$\binom{n-1}{n-m} = \frac{(n-1)!}{(n-m)!(m-1)!} \quad (6)$$

El tiempo de incubación de los defectos causados por corrosión en las tuberías fue considerado de 2.8 años, el cual corresponde al tiempo de iniciación promedio encontrado en otro trabajo de investigación realizado por los autores (Velázquez y col., 2011). Aunque los autores también reportan el valor del exponente ? en trabajos previos, este parámetro fue determinado utilizando la Ecuación (7) para el tipo de suelo que está en contacto con la tubería en cuestión. Esto se llevó a cabo utilizando las medias de las profundidades de picadura utilizando los datos de las inspecciones realizadas en 1996 y 2006. El parámetro  $\nu$  fue calculado utilizando  $t_{ini} = 2.8$  años,  $t_{06} = 21$  años (de 1985 a 2006) y  $t_{96}$  de 11 años (de 1985 a 1996).

$$\frac{\bar{d}_{06}}{\bar{d}_{96}} = \frac{\alpha(t_{06} - t_{ini})^\nu}{\alpha(t_{96} - t_{ini})^\nu} \quad (7)$$

La función de densidad de probabilidad para la población de defectos afectados por corrosión al tiempo de la segunda inspección (2006) fue predicha utilizando la Ecuación (5) y comparada con la distribución observada. La función de distribución de



velocidades de crecimiento en el tiempo  $t$  a partir del tiempo  $t_0$ , fue determinada por medio de la expresión (8).

$$f(v; t_0, t) = \sum_{m=1}^N p_m(t_0) \binom{m + v(t - t_0) - 1}{v(t - t_0)} \left( \frac{t_0 - t_{ini}}{t - t_{ini}} \right)^{vm} \left[ 1 - \left( \frac{t_0 - t_{ini}}{t - t_{ini}} \right)^v \right]^{v(t-t_0)} (t - t_0) \quad (8)$$

Las propiedades de la distribución de velocidad de crecimiento descritas por la Ecuación (8) se detallan y discuten en la referencias (Velázquez y col., 2011; Caleyo y col., 2009). Las características sobresalientes de la distribución de velocidad de crecimiento que son fundamentales para este estudio son: que dicha distribución por si misma depende del tamaño y de la edad de cada defecto y que tal dependencia refleja la naturaleza no lineal del proceso de corrosión en ductos enterrados. A diferencia del resto de los modelos utilizados en este trabajo de investigación, no solamente la media, sino también la varianza y la forma de la distribución de velocidad de crecimiento depende de la edad de los defectos y su tamaño. Esta dependencia, y el hecho de que las propiedades del suelo determinan el valor de los parámetros del modelo, hacen que este modelo sea más realista.

(iii) Modelo basado en una distribución Generalizada de Valores Extremos dependiente del tiempo (DT-GEVD). Este modelo utiliza las variaciones en el tiempo de la distribución de velocidad de crecimiento que los autores estudiaron en trabajos previos (Velazquez y col., 2011; Caleyo y col., 2009). En aquella investigación, se mostró que la velocidad de crecimiento de defectos puede describirse como una Distribución Generalizada

de Valores Extremos (*Generalized Extreme Value Distribution*, GEVD). La función de distribución de la velocidad de crecimiento  $v$  es descrita por la Ecuación (9) y el valor de sus parámetros varían en función del tiempo, tal como se indican en las Ecuaciones (10). (Caleyo y col., 2009).

$$G(v) = \exp \left\{ - \left[ 1 + \xi \left( \frac{v - \mu}{\sigma} \right)^{-1/\xi} \right] \right\} \quad (9)$$

Donde  $\xi$ ,  $\mu$  y  $\sigma$  representan los parámetros de forma, localización y escala respectivamente.

La Tabla 1 enlista estos valores de los parámetros, los cuales fueron ajustados a una ley de potencias conforme a lo indicado en las Ecuaciones (10), en la que los parámetros de localización y escala son dados en unidades de 0.1 mm o estados de markov y el parámetro de forma es adimensional. La función de densidad de probabilidad de la distribución de profundidades de futuras  $f_t(x)$  en el tiempo  $t$  puede ser determinada a partir de una función de distribución de crecimiento de defectos dependiente del tiempo y una distribución de profundidad inicial  $f_{t0}(x)$  en un tiempo  $t_0$  utilizando una integral de convolución definida por la Ecuación (11), donde  $G(v)$  es considerada la distribución de velocidad de crecimiento en una punto medio del intervalo de tiempo entre inspecciones ( $\delta t/2$ ). La distribución de defectos estimada puede ser comparada con la distribución de defectos obtenida en la última inspección y con los resultados obtenidos en los demás modelos.

$$\begin{aligned} \mu(t) &= -0.04816 + (t - 3.21819)^{-0.2411} \\ \sigma(t) &= -0.53243 + (t - 3.42572)^{-0.0619} \\ \zeta(t) &= -1.12501 + (t - 3.58835)^{0.0719} \end{aligned} \quad (10)$$

Tabla 1. Parámetros de la Distribución Generalizada de Valores Extremos para la velocidad de crecimiento de defectos.

Tiempo (años)	Parámetro de localización $\mu$ (mm)	Parámetro de escala $\sigma$ (mm)	Parámetro de forma $\zeta$
5	0.082	0.044	-0.100
10	0.058	0.036	0.019
15	0.051	0.032	0.065
20	0.046	0.032	0.102
25	0.044	0.030	0.105
30	0.040	0.028	0.151
35	0.037	0.027	0.168
40	0.038	0.027	0.160

$$f_t(x) = \int_0^{\infty} G(v')f_{t_0}(x - v'\delta t)dv' \quad (11)$$

Donde  $f_t(x)$  es la función de probabilidad que expresa la profundidad de los defectos en un tiempo  $t$ .

(iv) Modelo basado en una distribución Generalizada de Valores Extremos independiente del tiempo (IT-GEVD). Este modelo es similar al anterior, con la excepción que para el hecho de que los parámetros de la distribución Generalizada de Valores Extremos, se asumen constantes en todo el intervalo de tiempo a analizar. En el caso presentado en este estudio, la primera inspección fue llevada a cabo a los 11 años de servicio, por lo tanto  $t_0$  puede ser considerada como 11 años. Así como en el modelo dependiente del tiempo, la distribución de profundidad de defectos  $f_t(x)$  en un tiempo futuro puede ser determinada por la Ecuación (11) y entonces comparada con la distribución experimental y con los resultados obtenidos del resto de los modelos.

(v) Valor único de velocidad de crecimiento (recomendación de NACE). Con el propósito de comparar, la velocidad de crecimiento recomendada por la Asociación Nacional de Ingenieros en Corrosión de Estados Unidos de América (NACE) de 0.4 mm/a (16 mpy), fue utilizada como una tasa de crecimiento promedio que evoluciona la profundidad de defectos. Aunque ha sido probado que esta tasa de crecimiento es muy conservadora, en la práctica se recomienda utilizarla cuando no existe información de por medio. Para incluir esta situación en la presente modelación, la Ecuación (1) fue utilizada con un valor de  $d'=0.4$  mm/año para cada uno de los defectos seleccionados de la primera inspección para obtener las profundidades futuras de los defectos. Por lo tanto, este caso representa una situación muy especial y limitada del modelo de crecimiento lineal en el que el crecimiento de los defectos es independiente de la edad y del tiempo.

#### 4 Análisis de confiabilidad

Una descripción de la metodología probabilista para la estimación de la probabilidad de falla de ductos en operación se detalla en las Referencias (Caleyo y col., 2002; Caleyo y col., 2003; Caleyo y col., 2003). Las Figuras 3 y 4 ilustran la metodología utilizada en este estudio.

La Figura 3 muestra como cada profundidad en la distribución de profundidad de defectos es afectada

por los errores de medición del equipo instrumentado durante el estudio de confiabilidad. Dada su naturaleza, las incertidumbres son descritas por una distribución normal con media cero y desviación estándar de 8% del espesor de pared. Por lo tanto, para cada defecto localizado y dimensionado por la primera inspección, la distribución resultante es una normal con media  $d_0$  y desviación estándar  $\sigma_{ILL}$ . Esta distribución aparece en el tiempo inicial  $t_0$  y evoluciona utilizando cada uno de los cinco modelos de crecimiento de defectos ya descritos, representados por  $g(v)$  en la Figura 3, para obtener la distribución de profundidad de defectos a un tiempo futuro con ayuda de la Ecuación (11).

Por otra parte, la Figura 4 ilustra el procedimiento para realizar las simulaciones de Monte Carlo. En cada  $k$ -ésima etapa de la simulación de Monte Carlo, un vector con una realización de cada una de las siguiente variables aleatorias básicas  $X_k^i = \{d, L, D, pwt, UTS\}_k^i$  es introducido dentro del método PCORR (N. Leis y col., 1997) para calcular la presión de falla asociada al defecto  $i$ -ésimo. Las variables estadísticas involucradas en calculo son: la profundidad  $d$  y longitud  $L$  del defecto en un determinado tiempo  $t$ ; el diámetro del tubo  $D$ , el espesor de pared  $pwt$ , el esfuerzo último a la tensión  $UTS$  y la presión de operación. Las distribuciones de  $L, D, pwt, UTS$ , y la  $p_{op}$  se asumen que se ajustan a una distribución Normal, mientras que la profundidad del defecto resulta del proceso ilustrado por la Figura 3.

Para cada defecto, la presión de falla calculada  $f_{P_k}^i$  es comparado con el valor de la variable aleatoria, tomada de la distribución de la presión de operación. Se asume que ocurre cuando  $p_{op_k} \geq f_{P_k}^i$ , es decir, que la presión de operación es mayor o igual a la presión de falla. Al final, el número de fallas  $n_{fail}$  es dividido

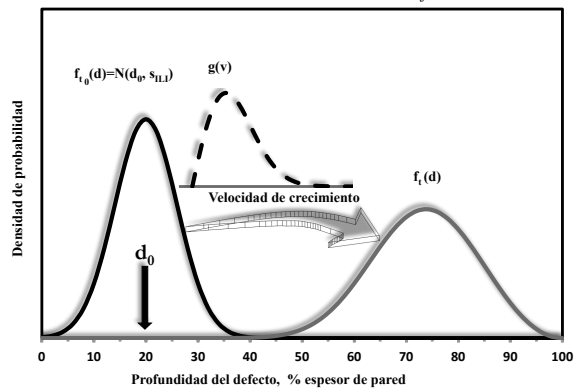


Fig. 3. Evolución de la profundidad de defectos.

entre el número total de simulaciones de Monte Carlo para producir un estimación de la probabilidad de falla  $PoF_i$  del defecto.

Para cada uno de los  $N_{def}$  defectos encontrados en las inspecciones, la descripción anterior es repetida  $n$  veces. Por lo tanto, el proceso es repetido  $n \times N_{def}$  veces durante la evaluación. Este proceso es repetido para tiempos futuros  $t_j$  con intervalos de un año. Al final, fue calculada la probabilidad de falla  $PoF_i(t_j)$  para cada defecto de la tubería en cada tiempo estudiado.

La Ecuación (12) se aplica para calcular la probabilidad de falla condicional  $PoF_i^{ann}$  del  $i$ -ésimo defecto en el tiempo  $t_j$ . Bajo la suposición que los defectos son independientes, un umbral de la probabilidad de falla anual del ducto puede ser

calculada por medio de la Ecuación (13). Además el índice de falla anual del ducto  $\lambda$  al final del año  $j$  puede ser calculado por la Ecuación (14); la longitud del ducto  $l_{pipe}$  está expresada en km. Con esta definición,  $\lambda$  tiene unidades de falla o incidentes por km por año o “km-año”, que es comúnmente expresada en 1/(km-año).

$$PoF_i^{ann}(t_j, t_{j+1}) = \frac{PoF_i(t_{j+1}) - PoF_i(t_j)}{1 - PoF_i(t_j)} \quad (12)$$

$$PoF(t_j, t_{j+1}) = 1 - \prod_i [1 - PoF_i^{ann}(t_j, t_{j+1})] \quad (13)$$

$$\lambda(t_j, t_{j+1}) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{def}} PoF_i^{ann}(t_j, t_{j+1})}{l_{pipe}} \quad (14)$$

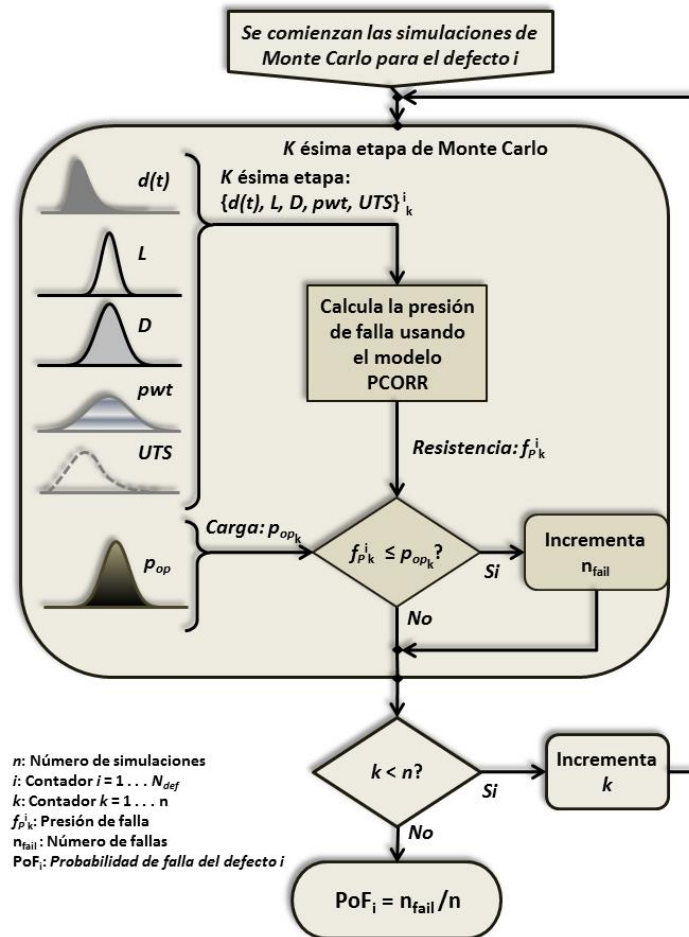


Fig. 4. Procedimiento aplicado para realizar las simulaciones de Monte Carlo.



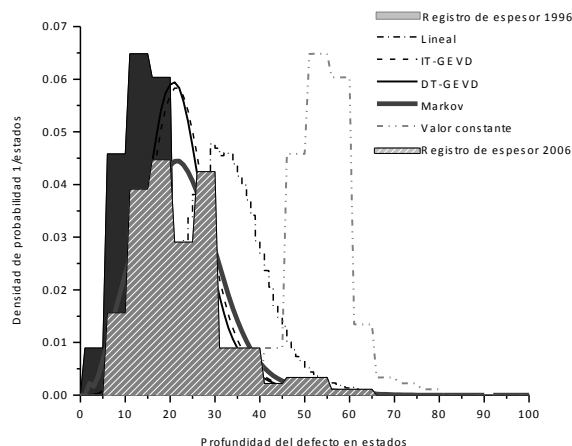


Fig. 5. Distribuciones de profundidad de defectos medidas y predichas.

## 5 Desempeño de los modelos

Los cinco modelos de velocidad de crecimiento utilizados en esta investigación fueron aplicados a los datos de la inspección de 1996, el lapso de tiempo analizado  $\delta t = t - t_0$  es de 10 años. En el caso del modelo markoviano, el tiempo de iniciación de picadura  $t_{ini}$  fue asumido igual a 2.8 años,  $t_0 = 11$  años y  $t = 21$  años. Para el modelo de DT-GEVD, la distribución de velocidad de corrosión utilizada para intervalo de tiempo analizado, desde al año 11, que es 1996, hasta el año 21 (2006). En contraste, para el modelo IT-GEVD, la distribución de velocidad de crecimiento utilizada fue predicha por las ecuaciones (9) y (10) para el año decimoprimer.

La Figura 5 muestra las distribuciones de profundidad de defectos en la inspección inicial 1996-IEI y la final 2006-IEI de los defectos seleccionados y medidos por el equipo instrumentado. En esta figura, la profundidad de los defectos están dados en 0.1 mm o estados de markov. La distribución de profundidad inicial ha sido representada en dos formas: por un histograma compuesto por barra de cinco estados de ancho y por una línea que va de estado por estado. La segunda opción ha sido incluida en este trabajo de investigación para representar las mediciones predichas. Mientras tanto, la distribución final de profundidades medidas se muestra en forma de histograma. La Figura 5 también muestra la distribución de profundidad de defectos estimada después de un intervalo de 10 años como resultado de la predicción de los cinco modelos mencionados con anterioridad.

Es importante hacer notar en la Figura 5

que el modelo de valor único (VU) reproduce la forma de la distribución inicial, pero está significativamente desplazada a la derecha. Los valores de profundidades estimadas son mayores que los observados experimentalmente y por los predichos por el resto de los modelos. De la misma forma, los modelos de crecimiento lineal sobrestiman las profundidades futuras y vuelven conservadores los planes de mantenimiento.

Se puede concluir que los modelos que mejor representan la distribución de profundidades obtenida en la segunda inspección (2006) son aquellos que consideran las propiedades del suelo. Sin embargo, se puede observar que el modelo markoviano predice una profundidad de defectos más cercana a la experimental que los modelos provenientes de la distribución generalizada de valores extremos (GEVD).

Para tener una evaluación cuantitativa de la precisión de los cinco modelos, se definió un índice de calidad relativo  $\Delta_{model}$ , el cual consiste en obtener el error entre la profundidad del defecto predicha y la observada en las funciones de distribución de probabilidad (FDP). Si  $f(x)$  la FDP empírica y  $f_{model}(x)$  es la FDP predicha por el modelo, entonces  $\Delta_{model}$  puede ser obtenida por la Ecuación (15), donde  $q$  es válido para todas las profundidades de defectos posibles para ambas inspecciones, expresadas en estados de 1 a  $N$ .

$$\Delta_{model} = \left( \sum_{q=1}^N (f(x_q) - f_{model}(x_q))^2 \right)^{1/2} \quad (15)$$

La Tabla 2 contiene los valores calculados del índice de calidad para los cinco modelos; la primera fila de la tabla es para el total de datos,  $N_{def}$ , de la distribución con 179 defectos. Se puede observar, que aunque los índices de calidad para los modelos basados en GEVD y Markov son cercanos entre sí, el modelo markoviano es el mejor de todos, ya que no sólo tiene el mejor índice de calidad; sino que describe también la forma de la distribución.

Con el propósito de comparar, la Figura 6 ilustra las distribuciones de velocidades de corrosión para cada uno de los modelos utilizados en este trabajo. Nuevamente, el modelo markoviano es el que reproduce mejor la distribución empírica de velocidades de corrosión. El modelo markoviano no es el mejor en estimar la evolución en el tiempo de la distribución de la profundidad de defectos, pero es el más apropiado para estimar la evolución de sub-poblaciones de defectos categorizadas por profundidad.

Tabla 2. Índice de calidad por modelo.

$d_{ini} - d_{fin}$ (estados)	Crecimiento lineal	Markov	IT-GEVD	DT-GEVD	Valor único
Todos (1-100)	1.0290	0.6709		0.6908	0.6927 1.9106
3-9	1.4509	1.0534		1.3005	1.2742 2.0000
6-12	.3764	0.8107		0.9273	0.8861 2.0000
9-15	1.3604	0.6942		0.7744	0.7567 2.0000
12-18	1.6757	0.8445		0.8354	0.8276 1.9655
15-21	1.7367	0.8863		0.9166	0.9268 1.9718
18-100	1.5717	0.7396		0.7465	0.7649 1.9444

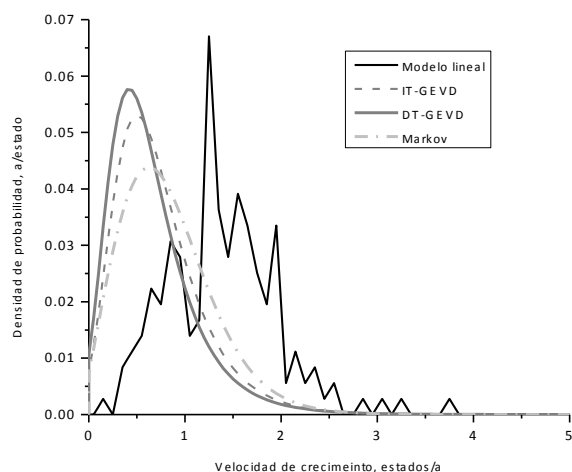


Fig. 6. Distribuciones medidas y predichas de la velocidad de crecimiento en estados por año.

Esto se muestra en la Figura 7, en el cual los defectos de la primera inspección fueron categorizados en intervalos de 6 estados de profundidad y la distribución de profundidad para cada intervalo fue graficada de forma separada. En esta figura también se ilustran la distribución de profundidades de la segunda inspección y las distribuciones de profundidad predichas por los modelos utilizados.

Los resultados presentados en la Figura 7, confirman que el modelo basado en la distribución de valor único y el modelo lineal no son capaces de reproducir la profundidad de defectos observados en la segunda inspección. Como se mencionó anteriormente, el modelo de valor único simplemente desplaza la distribución original y no cambia la forma de la distribución. Este resultado, contradice abiertamente la naturaleza estocástica del fenómeno de corrosión porque el modelo no reproduce el incremento inherente de la varianza de la profundidad de defectos en el tiempo. Este incremento ha sido experimentalmente observado en la Figura 1 y en estudios previos (Caleyo y col., 2009). Por lo

tanto, el uso de una distribución de velocidad de corrosión como valor único en estudios de análisis de confiabilidad debería ser evitado.

Por otro lado, el modelo de crecimiento lineal se desvía de la distribución de profundidades observada para valores mayores de profundidad de defectos iniciales. Adicionalmente, las distribuciones predichas son más estrechas que las observadas experimentalmente. Esta observación hace evidente el hecho de que el modelo de crecimiento lineal también toma valores de profundidad de una cierta parte de la distribución inicial y las cambia a regiones de mayor profundidad, sin considerar la naturaleza estocástica del proceso. Este comportamiento difiere de lo observado experimentalmente, por ejemplo, la Figura 7 muestra que los intervalos de profundidad inicial estrechos evolucionan en distribuciones menos estrechas que cubren un rango de profundidad mayor.

En contraste, los modelos que consideran las propiedades del suelo, basadas en GEVD y Markov, son capaces de reproducir el resultado experimental. En la mayoría de los casos, el modelo markoviano muestra un mejor desempeño que los modelos basados en GEVD, que es cuantitativamente ilustrado en la Tabla 2, en la cual se muestra el índice de calidad de cada uno de los casos mostrados en la Figura 7. Con excepción del caso cuando se tiene una profundidad inicial de entre 12 y 18 estados, el modelo markoviano tiene el menor índice de calidad que el resto de los modelos utilizados. La Figura 7 y la Tabla 2 muestran que el modelo basado en las cadenas de markov es capaz de considerar la dependencia del tiempo de la velocidad de corrosión sino su dependencia de la profundidad, tal y como los autores lo mencionaron en otras publicaciones (Velázquez y col., 2011; Caleyo y col., 2009).

La habilidad que tiene el sistema markoviano de capturar la influencia de la profundidad y la edad de los defectos de corrosión, junto con su habilidad de reproducir la naturaleza estocástica del proceso

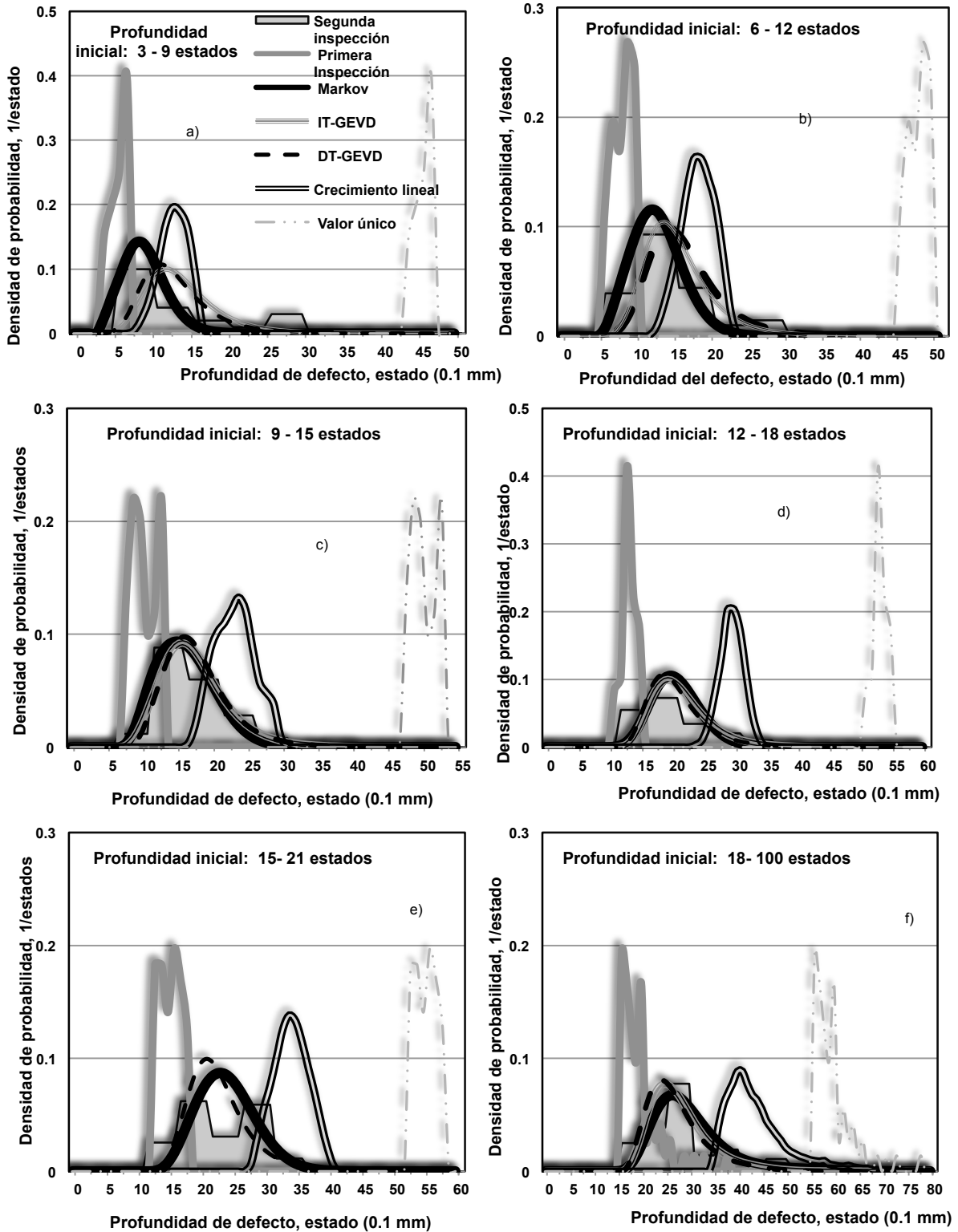


Fig. 7. Predicciones de los modelos por intervalos de profundidad.

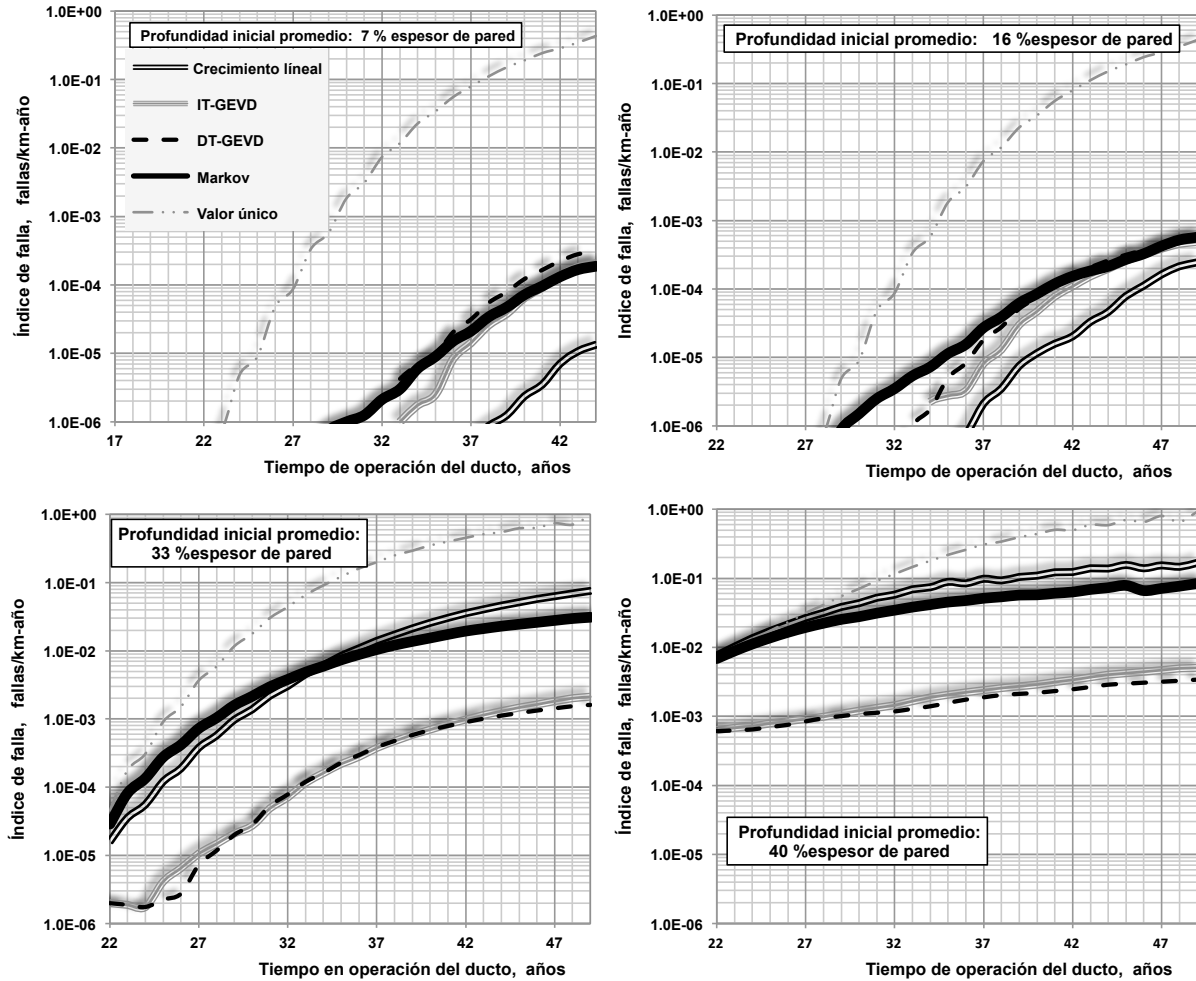


Fig. 8. Índice de falla predicho.

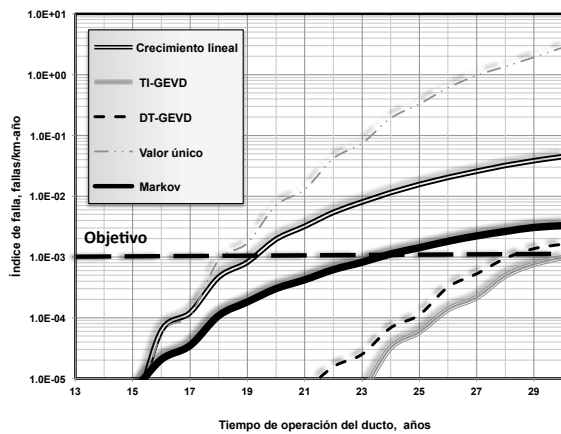


Fig. 9. Evolución del índice de falla.

justifican el hecho de que sea el mejor modelo. Comparando estas habilidades con el resto de los

modelos, se puede decir lo siguiente:

- El modelo de crecimiento lineal utiliza solamente la incertidumbre de la herramienta de inspección para definir la varianza de la distribución de velocidad de crecimiento asociada a cada defecto. Por lo tanto, la distribución futura de profundidad de defecto estimada depende fuertemente del tipo de herramienta utilizada en la inspección y no de las características del ambiente corrosivo.
- Los modelos DT-GEVD y IT-GEVD reproducen resultados parecidos, pero con calidad inferior respecto al markoviano, esto debido a que sólo considera las características del suelo en el cual el ducto está en contacto.
- El modelo de valor único, no reproduce la

naturaleza estocástica del proceso de corrosión y su dependencia sobre la profundidad del defecto y la edad. Al igual que en el caso del modelo de crecimiento lineal, su única ventaja es su uso pragmático.

Las diferencias en las habilidades de los diferentes modelos para describir correctamente las distribuciones de velocidad de crecimiento impactan de manera significativa en los resultados del cálculo de la confiabilidad. La siguiente sección explora de manera más detallada este cálculo.

## 6 Impacto en las estimaciones de confiabilidad

La metodología de análisis de confiabilidad ya descrita fue aplicada a datos generados de forma artificial mediante simulación computacional. Un ducto hipotético de 100 km de longitud, 762 mm de diámetro, espesor de pared de 11.4 mm y esfuerzo último a la tensión de 455 MPa. Estas variables fueron consideradas a ser normalmente distribuidas con una desviación estándar de  $\sigma_D = 0.254$  mm,  $\sigma_{pwt} = 1.14$  mm,  $\sigma_{UTS} = 21$  MPa, respectivamente. Con el propósito de simplificar, se asumió que el ducto tenía sólo 150 defectos después de 20 años de operación. Los cálculos fueron realizados para un intervalo de tiempo de 20 a 45 años, en lapsos de 2 años; las propiedades del suelo fueron consideradas dentro de la categoría de “todos los suelos” de la investigación realizada por J.C. Velázquez y col., en el año 2011.

La longitud de los defectos fue tomada de una distribución normal con  $\mu_L = 11.4$  mm y  $\sigma_L$  de 1.14 mm. Esta longitud fue seleccionada para garantizar que ruptura es el modo de falla de todos los defectos. Esta decisión no altera considerablemente el resultado de la presente investigación, ya que se ha probado el bajo impacto que tienen las incertidumbres relacionadas a la longitud del defecto (Caleyo y col., 2002).

Para investigar el comportamiento de los diferentes modelos de velocidad de crecimiento como una función de la profundidad de defectos, distribuciones Log-normal con media  $\mu_d$  y varianza  $\sigma_d^2$  fueron utilizadas para modelar la distribución de profundidad inicial en las tuberías. La Figura 8 muestra un compendio de los resultados obtenidos para las cuatro distribuciones de profundidades de defectos iniciales con media y desviación estándar (en mm) de (0.762,2.54), (1.778,3.81), (3.81,5.080) y (4.572,

7.62). Estos datos corresponden a 7, 16,33 y 40 % del espesor de pared, respectivamente.

Se puede observar que para profundidades pequeñas (7 y 16% espesor de pared), el modelo de crecimiento lineal subestima los valores promedio de la profundidad futura, lo que provocaría que el índice de falla sea menor al de los modelos que consideran las propiedades del suelo. Por otro lado, las estimaciones hechas por el modelo Markoviano son parecidas a las obtenidas por los modelos que utilizan la teoría de valores extremos, especialmente en intervalos de tiempo prolongados. Esta coincidencia puede atribuirse al hecho de que los parámetros de corrosión utilizados en estos modelos fueron obtenidos de un estudio de campo. Donde la profundidad promedio de los defectos fue de 2.02 mm y la edad promedio de los ductos fue de 23 años (Velázquez y col., 2011). Por lo tanto, es natural esperar que estos modelos funcionen mejor para profundidades y tiempos de este orden. Para intervalos de tiempo cortos, el modelo basado en cadenas de markov estima índices de falla ligeramente superiores a los modelos IT-GEVD y DT-GEVD. El modelo DT-GEVD provoca índices de falla superiores que el modelo IT-GEVD, pero la diferencia no es significativa.

Para defectos de profundidades entre 33 y 40% de espesor de pared, los modelos lineal y markoviano producen índices de falla anual similares, aunque el primero produce valores de índices de falla que exceden los resultados por cadenas de markov para defectos más profundos y de mayor tiempo de exposición. Estos índices son de más de un orden de magnitud superiores a los obtenidos utilizando los modelos basados en la distribución generalizada de valores extremos. Esto muestra que los modelos basados en GEVD no presentan un buen desempeño cuando los valores de profundidad y los intervalos de tiempo son significativamente diferentes a los observados en el trabajo experimental donde los modelos basados en esta distribución se obtuvieron. Esto confirma el hecho de que los modelos markovianos son la mejor opción al momento de modelar la velocidad de crecimiento.

El siguiente ejemplo incluye la aplicación del análisis de confiabilidad ya descrito, a los datos de la inspección realizada en 1996 con equipo instrumentado al ducto mencionado anteriormente. La Figura 9 muestra los índices de falla obtenidos para estos datos experimentales utilizando las cinco distribuciones de velocidad de corrosión ya mencionadas. Los modelos basados en el valor único y en el crecimiento lineal sobreestiman el índice de



falla del ducto, lo cual significa que estos modelos traerán predicciones conservadoras y conducirán a reparar con mayor frecuencia la tubería. Este hecho es confirmado cuando el nivel de confiabilidad objetivo de  $1 \times 10^{-3}$  por km-año es alcanzado. Para este objetivo hipotético, el modelo basado en el valor único y los modelos de crecimiento lineal recomendarían acciones de mantenimiento 5 años antes que cuando se utiliza el modelo markoviano. Como se mostró anteriormente, la predicción markoviana es la que mejor describe la evolución de la corrosión en el tiempo (Figura 5), de tal forma que los resultados obtenidos por este modelo en el análisis de confiabilidad pueden ser considerados los más cercanos al verdadero nivel de confiabilidad del ducto.

Por otro lado, los modelos IT-GEVD y DT-GEVD subestiman el índice de falla en todo el lapso de evaluación, produciendo intervalos de tiempo poco creíbles para acciones de mantenimiento. Sin embargo, para tiempo más prolongados, las diferencias entre las predicciones hechas por estos modelos y las obtenidas por el modelo markoviano son pequeñas, una observación consistente hecha por los autores en trabajos previos, los cuales están indicados en la referencias: Velázquez y col. (2011), Caleyo y col. (2009), Caleyo y col. (2009) y Valor y col. (2013). Con el paso del tiempo, las profundidades de los defectos llegan a ser mayores y la incertidumbre debido a la naturaleza estocástica de la corrosión se incrementa, tal y como se muestra en la Figura 1. Esto explica porque los resultados obtenidos utilizando los modelos basados en GEVD se aproximan a los resultados obtenidos por las cadenas de markov para tiempos de exposición prolongados.

Es significativo mencionar que los modelos: markoviano, IT-GEVD y DT-GEVD toman en consideración de forma implícita las variables físicas (resistividad, densidad del suelo, humedad, potencial de corrosión y tipo de recubrimiento) y químicas (contenido iónico y pH) del suelo utilizadas para la modelación del crecimiento de defectos causados por corrosión. Esto conforme a lo desarrollado en un trabajo de investigación previo (Velázquez y col., 2011).

## Conclusiones

Durante el análisis de confiabilidad, es crucial seleccionar correctamente el modelo de crecimiento de defectos para hacer mejores predicciones de la evolución de los defectos causados por corrosión

y de la probabilidad de falla de estos defectos. El modelo markoviano ha sido probado como el mejor modelo para predecir la evolución de los defectos causados por corrosión y de la confiabilidad del ducto. Este modelo funciona correctamente para tuberías de un amplio rango de edades y profundidades de defectos. El modelo markoviano es capaz de predecir correctamente la evolución en el tiempo de la población total de profundidad de defectos y las subpoblaciones de la población total. Además reproduce en el tiempo la evolución de los defectos a partir de datos de inspección, estimando solamente el valor del parámetro  $\lambda$ . Este resultado significa que no necesariamente se requiere conocer las propiedades físicas y químicas del suelo para evaluar la confiabilidad de ductos enterrados. Finalmente, es el único modelo capaz de capturar de manera intrínseca, la naturaleza estocástica del proceso de corrosión, independientemente de los errores de medición que ocurren en las herramientas de inspección o de la distribución de profundidad de defectos encontrados en el ducto.

Es importante mencionar que para los autores de este trabajo resulta fundamental conocer diferentes técnicas de modelación del crecimiento de defectos causados por la corrosividad del suelo. Esto con el objetivo de un mayor entendimiento del fenómeno y en la aplicación para cálculo de confiabilidad estructural, por tal motivo, los datos referentes al estudio de corrosividad de suelos en México realizado por los autores, fueron publicados por Velázquez y col. (2010).

## Referencias

- API RP 580 (2009). *Risk Based Inspection*. Second Edition, Washington DC, E.U.A.
- Caleyo, F., González J. L., Hallen, J. M. (2002). A Study on the Reliability Assessment Methodology for Pipelines With Active Corrosion Defects. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 79, 77-86.
- Caleyo, F., Hallen, J., Gonzalez J.L., Fernandez F. (2003). In-Line Inspection Guides Integrity Assessment, Rehabilitation of Sour-Gas Pipeline. *Oil and Gas Journal* 101, 54-61.
- Caleyo F., Velázquez J. C., Valor A., Hallen J. M. (2009). Probability distribution of pitting corrosion depth and rate in underground

- pipelines: A Monte Carlo study. *Corrosion Science* 51, 1925-1934.
- Caleyo F., Velázquez J. C., Valor A., Hallen J. M. (2009). Markov chain modelling of pitting corrosion in underground pipelines. *Corrosion Science* 51, 2197-2207.
- Caleyo F., Valor A., Venegas V., Hernández J.H.E., Velazquez J.C., Hallen J.M. (2012). Accurate corrosion modeling improves reliability estimations. *Oil and Gas Journal* 10, 122-129.
- Leis N., Stephens D.R. (1997). An Alternative Approach to Assess the Integrity of Corroded Line Pipe - Part II: Alternative Criterion. *Proc. 7th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., Honolulu, USA, May 25-30*, 624-641.
- Li S. X., Yu S. R., Zeng H. L., Li J. H., Liang R. (2009). Predicting corrosion remaining life of underground pipelines with a mechanically-based probabilistic model. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 65, 162-166.
- Race J.M., Dawson S.J., Stanley L.M., Kariyawasam S. (2007). Development of a Predictive Model for Pipeline External Corrosion Rates. *Journal of Pipeline Engineering* 6, 15-29.
- Sheikh A. K., Boah J. K., Hansen D. A. (1990). Statistical Modeling of Pitting Corrosion and Pipeline Reliability. *Corrosion* 46, 190-197.
- Standard Recommended Practice RP 0169-92 (1992). *Control of external corrosion on underground or submerged metallic piping systems*, NACE.
- Stephens M., Nessim M. (2006). Risk A Comprehensive Approach to Corrosion Management Based on Structural Reliability Methods, Proceedings of IPC2006, 6th Int. Pipeline Conf., Calgary, Alberta, Canada, ASME, Paper No. IPC2006-10458.
- Valor A., Caleyo F., Hallen J.M., Velázquez J.C. (2013). Reliability assessment of buried pipelines base on different corrosion rate models. *Corrosion Science* 66, 78-87.
- Velázquez J.C., Caleyo F., Valor A., Hallen J.M. (2010). Technical Note: Field Study-Pitting corrosion of underground pipelines related to local soil and pipe characteristics. *Corrosion* 66, 0160011-0160015.
- Velázquez J.C., Caleyo F., Valor A., Hallen J.M. (2011). Modelado del crecimiento de picaduras en tuberías enterradas que transportan hidrocarburos utilizando técnicas estadísticas. *Rev. Metal, Madrid* 47, 244-261.