

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño metodológico para la evaluación de daños por corrosión interna en tuberías
de agua potable

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniera en Materiales

Presentado por:

Karen Stefania Aquino Fornes

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a todas las personas que a lo largo de estos años formaron parte de mí, me inspiraron y dieron la fortaleza para seguir este camino.

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a mis padres Isabel y Pedro, quienes han sido mis guías durante todos estos años, a mis tíos, que han sido como mis segundos padres. En especial a mi tía Mariela, quien se convirtió en una madre por mucho tiempo y me enseñó que debemos ser resiliente ante las situaciones adversas. A mi amigo por muchos años y ahora mi esposo Robinson Flores, este camino fue más llevadero con tus ocurrencias y amor. A todos mis profesores de la carrera, gracias por aquellas experiencias y conocimientos que gratificaron mi vida profesional. A Luis Campoverde, tutor de la empresa, quien me guio y aconsejo en la realización de esta tesis con mucha paciencia. Y sobre todo a Dios, quien fue mi pilar espiritual y fortaleza para seguir todo este proceso.

Declaración Expresa

"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Karen Stefania Aquino Fornes y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Karen Stefania Aquino Fornes

Evaluadores

Jonathan David Reyes Ortiz

Profesor de Materia

Julián Peña Estrella

Tutor de proyecto

Resumen

La corrosión interna en tuberías metálicas de los sistemas de agua potable implica impactos económicos, fallos estructurales y la degradación de la calidad del agua, lo que la convierte en una preocupación sustancial. Este proyecto desarrolla un diseño metodológico de los daños causados por la corrosión interna en tuberías de agua potable, debido a la presencia de incrustaciones de origen desconocido. La metodología consistió en la evaluación de la superficie interna mediante técnicas laboratorio como difracción de rayos X, análisis químico y análisis metalográfico; y la estimación de la tasa de corrosión por medio de pérdida de espesores calculada con inspección ultrasónica.

Los resultados revelaron que el agua presento Índices de Langelier corrosivos con disolución de CaCO_3 , y presencia de sólidos disueltos que implicó una corrosión severa del agua sobre el material. Las incrustaciones caracterizadas mostraron composición de goethita, magnesioferrita, maghemita y compuestos amorfos. La tasa de corrosión estimada para la corrosión uniforme se encontró dentro de un rango óptimo. Finalmente, los parámetros estudiados implican problemas sobre la calidad del agua potable, la corrosión no localizada puede llegar a ser más severa debido a la presencia de los sólidos disueltos que influye sobre la corrosión microbiológica.

Palabras clave: Corrosión interna, corrosión no localizada, difracción de rayos X, análisis metalográfico.

Abstract

Internal corrosion in metal pipes of drinking water systems entails economic impacts, structural failures, and degradation of water quality, making it a substantial concern. This project develops a methodological design for damage caused by internal corrosion in drinking water pipes due to the presence of unknown origin scale deposits. The methodology involved evaluating the internal surface using laboratory techniques such as X-ray diffraction, chemical analysis, and metallographic analysis; and estimating the corrosion rate through thickness loss calculated using ultrasonic inspection.

The results revealed that the water exhibited corrosive Langelier indices with CaCO_3 dissolution and the presence of dissolved solids, which led to severe water corrosion on the material. The characterized deposits showed a composition of goethite, magnesium ferrite, maghemite, and amorphous compounds. The estimated corrosion rate for uniform corrosion was found within an optimal range. Finally, the parameters studied imply issues regarding the quality of drinking water, as non-localized corrosion can become more severe due to the presence of dissolved solids that influence microbiological corrosion.

Keywords: *Internal corrosion, non-localized corrosion, X-ray diffraction, metallographic analysis.*

Índice general

Resumen.....	I
<i>Abstract</i>	II
Índice general.....	III
Abreviaturas.....	VI
Simbología.....	VII
Índice de figuras.....	VIII
Índice de tablas.....	IX
Capítulo 1.....	1
1. Introducción.....	2
1.1 Descripción del problema.....	2
1.2 Justificación del problema.....	4
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo general.....	5
1.3.2 Objetivos específicos.....	6
1.4 Marco teórico.....	6
1.4.1 Corrosión.....	6
1.4.2 Corrosión en sistemas de tuberías de distribución para agua potable.....	7
1.4.3 Parámetros que afectan la corrosividad.....	9
1.4.4 Incrustaciones.....	10
1.4.5 Estudios relacionados a la problemática de corrosión e incrustaciones en tuberías de agua potable.....	12
Capítulo 2.....	2
2. Metodología.....	14
2.1 Alternativas de solución del problema.....	14
2.1.1 Método de muestreo y caracterización.....	14

2.1.2	Método de cupones.....	15
2.1.3	Método de prueba ultrasónica.	16
2.2	Descripción y selección de la mejor alternativa	16
2.3	Diseño conceptual.....	19
2.3.1	Descripción del área de estudio.....	19
2.3.2	Calidad del agua potable.	19
2.3.3	Modelo de corrosividad del agua potable.....	20
2.3.4	Parámetros fisicoquímicos de la agresividad corrosiva del agua.	21
2.4	Diseño experimental	22
2.4.1	Recopilación de información inicial.....	25
2.4.2	Inspección Visual.	25
2.4.3	Recopilación y procesamiento de las muestras.	26
2.4.4	Aplicación de técnicas de laboratorio.....	28
2.4.5	Análisis de la información.....	30
2.4.6	Obtención de resultados.	30
2.4.7	Correlación entre los resultados obtenidos e información recopilada.....	31
2.5	Consideraciones éticas y legales.....	31
Capítulo 3.....		14
3.	Resultados y análisis.....	34
3.1	Resultados de la investigación inicial.....	34
3.2	Resultados de la inspección visual	41
3.3	Resultados de la evaluación de las incrustaciones.....	45
3.4	Resultados de la evaluación de las superficies metálicas	48
3.5	Resultados de la estimación de la tasa de corrosión	50
3.6	Análisis de costos	52
3.7	Viabilidad económica	53
Capítulo 4.....		34

4.	Conclusiones y recomendaciones.....	57
4.1	Conclusiones.....	57
4.2	Recomendaciones	59

Referencias

Apéndice A

Apéndice B

Apéndice C

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
AWWW	American Water Works Association
NACE	National Association of Corrosion Engineer
PIB	Producto Interno Bruto
ANC	Agua no Contabilizada
MIC	Corrosión influenciada microbiana
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
INEN	Servicio Ecuatoriano de Normalización
ISL	Índice de Saturación de Langelier
CIDNA	Centro de Investigación y Desarrollo en Nanotecnología
LABQUINS	Laboratorio de Análisis Químico Instrumental
DRX	Difracción de rayos X
FLAA	Espectrometría de absorción atómica de llama
K	Tasa de descuento
VAN	Valor Actual Neto
TIR	Tasa Interna de Retorno

Simbología

L	Litro
mg	Miligramo
pH	Potencial de Hidrógeno
mm	milímetro
°C	Grado Celsius
ppm	Partes por millón
Fe	Hierro
O	Oxígeno
H	Hidrógeno
Mg	Magnesio
Ca	Calcio
Na ⁺	Ion sodio
Mg ²⁺	Ion magnesio
Ca ⁺	Ion calcio
Cl ⁻	Ion cloruro
SO ₄ ²⁻	Ion sulfato
CO ₃ ²⁻	Ion carbonato
HCO ₃ ⁻	Ion bicarbonato

Índice de figuras

Figura 1.1 Representación de una celda electroquímica	7
Figura 1.2 Interacción entre el agua y la tubería metálica	8
Figura 1.3 Presencia incrustaciones en tubería de acero	9
Figura 2.1 Esquema de la red de distribución de agua potable	19
Figura 2.2 Diseño experimental de la evaluación	24
Figura 2.3 Factores de evaluación para el diseño metodológico.....	25
Figura 3.1 Índice de Langelier periodo 2017-2020.....	34
Figura 3.2 Índice de Langelier periodo 2021 y 2022	35
Figura 3.3 Parámetros fisicoquímicos año 2017	36
Figura 3.4 Parámetros fisicoquímicos año 2018	37
Figura 3.5 Parámetros fisicoquímicos año 2021	38
Figura 3.6 Parámetros fisicoquímicos año 2022	39
Figura 3.7 Superficie externa de las piezas en estudio.....	42
Figura 3.8 Superficie interna del codo	42
Figura 3.9 Superficie interna del codo	43
Figura 3.10 Superficie interna de los carretes	44
Figura 3.11 Superficie donde se observa perforación de la incrustación.....	44
Figura 3.12 Incrustaciones encontradas en la superficie interna.....	45
Figura 3.13 Resultados generales de DRX.....	46
Figura 3.14 Incrustaciones para el análisis químico	47
Figura 3.15 Probetas del codo	48
Figura 3.16 Macrográficas de las probetas del codo.....	49
Figura 3.17 Probetas de T2	49
Figura 3.18 Macrográficas de las probetas de T2	50

Índice de tablas

Tabla 1.1 Tipos de incrustaciones	11
Tabla 2.1 Criterios de evaluación.....	17
Tabla 2.2 Ponderado de los criterios de evaluación	18
Tabla 2.3 Selección de la alternativa a implementar.....	18
Tabla 2.4 Parámetros de calidad del agua potable	20
Tabla 2.5 Valoración del índice de Langelier	21
Tabla 2.6 Clasificación de la agresividad corrosiva del agua	21
Tabla 2.7 Clasificación del agua según su dureza.....	22
Tabla 2.8 Efecto de la alcalinidad en el agua potable	22
Tabla 2.9 Especificaciones del diseño metodológico para la evaluación de daños por corrosión interna en tuberías de agua potable	23
Tabla 2.10 Puntos de muestreo	26
Tabla 2.10 Muestras obtenidas.....	28
Tabla 2.11 Espesores encontrados en las muestras	30
Tabla 2.12 Resultados esperados	31
Tabla 3.1 Características técnicas de las tuberías en estudio	41
Tabla 3.3 Resultados de análisis químico	48
Tabla 3.4 Tasas de corrosión estimadas	50
Tabla 3.5 Detalle de la resistencia a la corrosión.....	51
Tabla 3.6 Costos fijos.....	53
Tabla 3.7 Costos variables	53
Tabla 3.8 Detalle de los beneficios anuales	54
Tabla 3.9 Flujo de caja anual	54
Tabla 3.10 Parámetros de viabilidad económica.....	55

Capítulo 1

1. Introducción

Las empresas de distribución de agua potable son conscientes de la variabilidad en la calidad del agua y las afectaciones que tienen los sistemas de distribución debido a las condiciones de las tuberías u operaciones del sistema [1], provocando diversas situaciones que afectan el suministro de agua potable en una comunidad. Existen reportes de pérdidas en los sistemas de distribución de agua potable en todo el mundo que oscilan entre un 10% y 30%, y en casos más extremos se llega hasta el 50% [2].

Es de conocimiento público que, en el Ecuador, sobre todo en sus principales ciudades, se evidencian diversas problemáticas relacionadas al servicio de agua potable. Una de las agravantes es la corrosión de las tuberías metálicas de conducción de agua. A pesar de los distintos conocimientos actuales que se tienen de corrosión y protección. La corrosión interna de las tuberías de acero sigue siendo una fuente de problemas para los sistemas municipales de distribución de agua potable, debido a las expectativas de vida útil que se da sobre la infraestructura, donde presentan fugas o perforaciones, lo que genera inconvenientes sociales y gastos operativos [3].

Las empresas buscan disminuir el impacto negativo de estos daños, para lo cual se requieren de distintas evaluaciones que permitan conocer las causas y efectos de las fallas generadas. Por tanto, el presente proyecto integrador desarrolla un método de evaluación de daños por corrosión interna en tuberías de agua potable, con el fin de analizar los productos de corrosión encontrados y la tasa de corrosión que tienen las tuberías de acero al carbono.

1.1 Descripción del problema

El fenómeno de corrosión consiste en el deterioro de materiales metálicos, el cual conlleva muchas repercusiones a nivel económico, operativo y de conservación de materiales, por tanto su estudio y mitigación es de suma importancia [4].

La corrosión es un problema latente en todo el mundo, anualmente en los diferentes países se deben realizar inversiones que buscan mitigar los daños ocasionados. El costo global de la corrosión se estima en \$2.5 billones de dólares, lo que equivale al 3.4% del Producto Interno Bruto (PIB) mundial (2013) [5]. En Estados Unidos, se encuentran casi 170,000 sistemas públicos de agua potable y se estima que hay 240,000 roturas de tuberías de agua por año, la mayoría de las cuales son causadas por la corrosión [5]. En 2012, la American Water Works Association (AWWA) concluyó que el valor de reemplazo agregado para más de un millón de millas de tuberías es de aproximadamente \$ 2.1 billones si todas las tuberías fueran reemplazadas a la vez [6].

Según las Naciones Unidas, los servicios públicos de agua potable en países en desarrollo presentan un bajo rendimiento ocasionado por la ineficiente administración y falta de planes en mantenimiento preventivo de las redes de distribución [7]. En Ecuador, las pérdidas económicas debido a volúmenes de agua no contabilizada (ANC) alcanzan los 320 millones de dólares, correspondientes al desperdicio de 696.2 millones de m³ al año. Estas pérdidas relacionadas con la medición defectuosa, recopilación insuficiente de datos, y, sobre todo, a las fugas [8].

Uno de los problemas más comunes que puede presentar un sistema de distribución de agua potable es la corrosión de sus instalaciones, generando daños sobre las tuberías [9]. La corrosión interna de las tuberías puede causar la degradación de la calidad del agua, el rendimiento de la infraestructura y fallos estructurales, así como problemas de incrustaciones. Conlleva impactos económicos sustanciales tanto en las empresas de servicios de agua como en los consumidores.

El resultado de la corrosión de las superficies internas en las tuberías de metal o la disolución de las incrustaciones presentes implica problemas de calidad del agua, preocupaciones potenciales para la salud, decoloración y cambios en el sabor y olor. Estos problemas son principalmente el resultado de la corrosión de las superficies de las tuberías de

metal, soldadura de tuberías y accesorios de plomería, o la disolución de las escamas presentes en las tuberías [6].

Una reconocida empresa de distribución de agua potable en el país actualmente presenta problemas de corrosión interna en las tuberías metálicas de conducción. Las tuberías de acero al carbono muestran capas de incrustaciones, donde se visualiza una corrosión agravante bajo ciertas zonas en forma de picaduras, además de presentar perforaciones externas o fugas de agua. Los daños fueron encontrados en el presente año 2023, para el cual existieron dos casos que generaron la necesidad de una revisión y remplazo de las tuberías. El primer caso corresponde a un reclamo de fugas, mientras que el segundo caso se presentó en actividades de repotenciación de la red. Según datos de la empresa, del total de reclamos, el 23% corresponde a productos de fugas, que se relacionan con daños en el medidor o fugas registradas en la red [10].

La empresa como tal no reporta la naturaleza de estas fugas, de modo que se desconoce cuáles fueron inducidas por corrosión externa o interna, o algún otro motivo. Por tanto, no existe información de carácter cuantitativo acerca de la corrosión o incrustación en la red de distribución de agua potable. Además, se desconoce si en otros sitios de la red existe presencia de incrustaciones, debido a que no se puede detener las operaciones para la revisión de tuberías hasta que por lo menos se presenten fugas agravantes.

El recubrimiento superficial de las tuberías encontradas es de carácter desconocido, así como las normas y técnicas que fueron usadas para la aplicación del recubrimiento, debido a que en años anteriores no se llevaba un control riguroso de los trabajos que se realizaban en tuberías de conducción.

1.2 Justificación del problema

Los sistemas de distribución de agua potable corresponden a una de las infraestructuras más importantes para el desarrollo actual de la sociedad, el agua, líquido indispensable para la vida del ser humano. Las tuberías constituyen el activo más importante de todo el sistema de

abastecimiento, representan la mayor necesidad de capital, comprendiendo 3/4 de las necesidades totales de una empresa [5]. Por ende, se destaca la importancia de una metodología de evaluación de los daños por corrosión interna en las tuberías de distribución de agua potable.

Los mecanismos de distribución de agua potable tienen como objetivo brindar un servicio de manera óptima y continua a la comunidad, por tanto, un sistema donde se mitiga la corrosión y formación de incrustaciones proveerá de una mejor calidad de agua potable a sus consumidores y tendrá una mayor aceptación del servicio en la sociedad. Además, de evitar los posibles efectos adversos en la salud.

Las incrustaciones y perforaciones encontradas se vuelven relevantes para su control y mitigación, puesto que se genera un deterioro del material metálico y la posible contaminación del agua potable. Por ende, la empresa requiere de una evaluación técnica, donde se pueda encontrar los posibles factores que han generado y agravado el deterioro del material.

Este proyecto permite a la empresa identificar el estado actual de las tuberías afectadas, favoreciendo la toma de decisiones sobre el mantenimiento preventivo o reparación de las tuberías dañadas, de modo que al anticiparse a los problemas de corrosión interna se evitan interrupciones del servicio, asegurando el suministro continuo de agua potable y aumentando la eficiencia operativa. Además, se minimiza las pérdidas económicas relacionadas a las fugas y rupturas, evitando la pérdida de grandes volúmenes de agua y la generación de costos adicionales a su reparación y reabastecimiento, asegurando una buena calidad en su infraestructura.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un diseño metodológico mediante técnicas de caracterización y medición de la tasa de corrosión para la evaluación de daños por corrosión interna en tuberías de distribución de agua potable.

1.3.2 *Objetivos específicos*

1. Seleccionar los parámetros y variables relevantes mediante el diseño de evaluación óptimo para el reconocimiento de las posibles causas de los daños.
2. Caracterizar las incrustaciones desconocidas por medio de técnicas como difracción de rayos X y análisis químico para el análisis de los componentes químicos que provocan daños sobre la superficie.
3. Establecer una metodología de estimación mediante la medición de la tasa de corrosión que evalúe la severidad y extensión de los daños por corrosión interna de las tuberías.

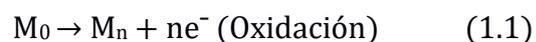
1.4 **Marco teórico**

1.4.1 *Corrosión*

La Corrosión describe el proceso de deterioro de materiales metálicos, mediante reacciones químicas y electroquímicas. El fenómeno de la corrosión ocurre debido a que, con el tiempo, dichos materiales tratan de alcanzar su estado natural, el cual constituye un estado energético de menor potencial, lo que les permite estabilizarse termodinámicamente. La mayoría de procesos de corrosión involucran reacciones de reducción-oxidación (reacciones electroquímicas), donde para que se desarrollen estos procesos, es necesaria la existencia de cuatro elementos: un ánodo y un cátodo (electrodos), un electrolito, como medio conductor, que en la mayoría de casos corresponde a una solución acuosa y una conexión eléctrica entre los electrodos [4].

Las ecuaciones de las reacciones que ocurren son las siguientes:

Ánodo:



Cátodo



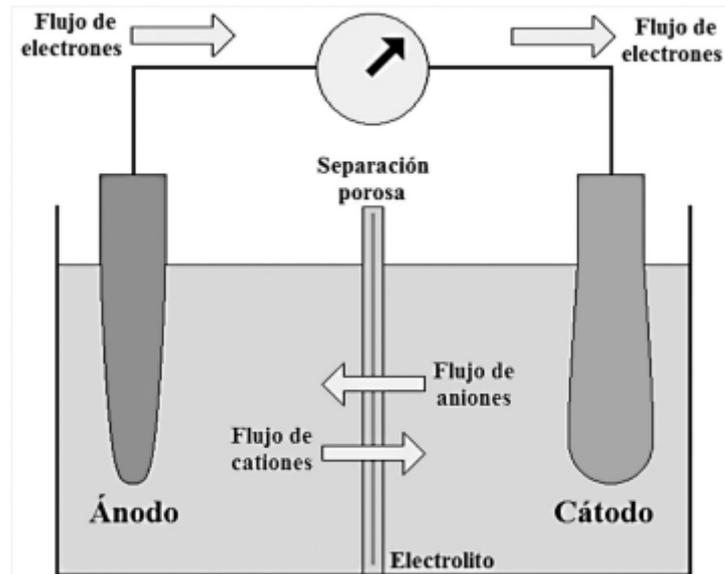


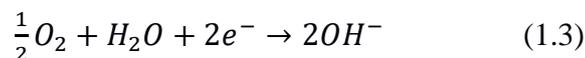
Figura 1.1 Representación de una celda electroquímica [4]

1.4.2 Corrosión en sistemas de tuberías de distribución para agua potable

El término corrosión en los sistemas de agua potable hace referencia a la interacción electroquímica entre la superficie del metal, es decir, las paredes de las tuberías con el agua [6].

Cuando los materiales están expuestos al agua, las reacciones entre el agua y el material de la tubería inevitablemente conducen a la degradación y corrosión. La extensión, velocidad y mecanismos de la corrosión experimentada por el material depende de muchos factores, incluida la química del agua (por ejemplo, pH, alcalinidad, carbono, cloruro y sulfato, dureza, inhibidores, desinfectantes, oxígeno disuelto, etc.), temperatura, velocidad de flujo y los materiales de construcción [11].

En general, la corrosión del acero en el rango de un pH neutro de las aguas naturales se relaciona directamente a la difusión del oxígeno hacia la superficie del metal, produciéndose la siguiente reacción catódica [3]:



La corrosión implica la oxidación de átomos de metal a cationes, que a su vez pueden reaccionar para formar óxidos, hidróxidos y otras especies en la superficie del metal, tal como se indica en la figura 1.2. En estos casos, el metal no se libera estrictamente en el agua. La

formación de estas películas o capas no es posible si la corrosión ocurre lo suficientemente rápido, o las películas formadas son suficientemente protectoras, por tanto, se produce la liberación de cationes metálicos en el agua [11].

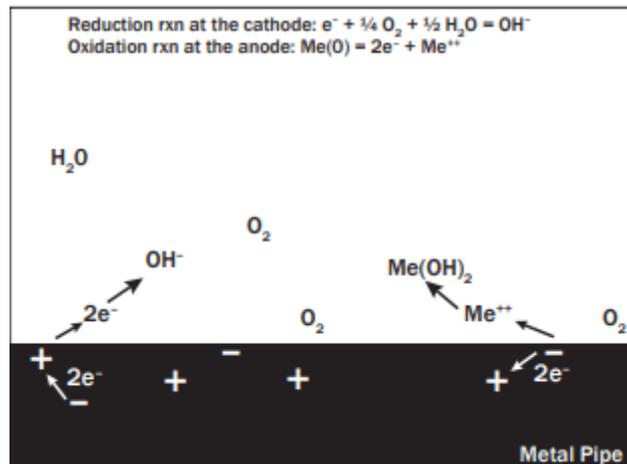


Figura 1.2 Interacción entre el agua y la tubería metálica [6]

También se dan procesos de precipitación y disolución de otros compuestos metálicos, como carbonatos, silicatos y otras incrustaciones. Dificultando la situación, los metales de interés tienen diferentes estados de oxidación y también pueden sufrir procesos de erosión que pueden dar como resultado la liberación de partículas. De modo que el metal ha sufrido corrosión, pero, ha reaccionado para formar películas o escamas en la superficie. Las películas o incrustaciones pueden interactuar entre sí y también pueden disolverse y erosionarse como partículas. Cuando el metal se corroe y el catión metálico liberado no reacciona en la superficie para formar una película. En estos casos, el metal disuelto puede ser transportado, pero también puede reaccionar y precipitar para formar capas y óxidos en la superficie del metal. Además, también puede formar precipitados en el agua, que a su vez también pueden disolverse para liberar metales [11].

El material de la tubería metálica puede reaccionar con especies en el agua para formar películas y escamas que, a su vez, pueden ser protectoras y reducir la tasa de degradación. En la figura 1.3 se pueden apreciar estas incrustaciones dentro de la tubería.



Figura 1.3 Presencia incrustaciones en tubería de acero [12]

1.4.3 Parámetros que afectan la corrosividad

Uno de los principales factores que controlan qué reacciones y vías tienen lugar es la química del agua, algunos de los factores claves son los siguientes:

pH. Los pH excesivamente altos y bajos pueden ser perjudiciales para el uso de agua. La cantidad de oxígeno en el agua aumenta a medida que aumenta el pH. El agua con pH bajo corroerá o disolverá metales y otras sustancias, es decir en pH ácidos [13]. A valores de pH alcalinos superiores a 9, la corrosión de estos metales suele reducirse debido a la formación de películas protectoras [11].

Alcalinidad. La alcalinidad del agua es causada principalmente por la presencia de iones hidróxido (OH^-), iones de bicarbonato (HCO_3^-) e iones de carbonato (CO_3^{2-}), o una mezcla de dos de estos iones en agua. La posibilidad de OH^- y HCO_3^- juntos no es posible porque reaccionan, tal como se muestra en la ecuación 1.4 [13].



Dureza total. La dureza del agua potable es altamente variable y se define como la concentración de calcio y magnesio disueltos en el agua. El agua dura tendrá una alta concentración de calcio y magnesio, lo que tiende a hacer que el agua sea menos corrosiva [4].

Sales disueltas. Las sales ácidas, al diluirse en la solución electrolítica, disminuyen su pH, acelerando el proceso de corrosión por el efecto de acidez. En cambio, las sales alcalinas, incrementan el pH de la solución electrolítica, por lo que en algunos casos funcionan como inhibidores del proceso de corrosión [4].

Sólidos disueltos totales. Representa una medida de la cantidad total de especies iónicas disueltas en el agua. Sólidos disueltos más altos generalmente conducen a mayores conductividades y, como resultado, a mayores tasas de corrosión [4].

Bacterias. Las bacterias a menudo están presentes en el agua potable, a pesar del uso de desinfectantes. Algunas de estas bacterias pueden provocar corrosión influenciada microbiana (MIC) [4].

1.4.4 Incrustaciones

Se define como incrustación a la deposición o acumulación de compuestos inorgánicos en forma de cristales que pueden estar compuestos por sales sólidas, óxidos e hidróxidos, usualmente provenientes de soluciones acuosas [14]. Las incrustaciones se originan cuando los iones presentes en el agua asociada al fluido sobrepasan el límite de solubilidad que tiene el agua para mantenerlos en solución, de esta manera se unen y se precipitan formando depósitos sólidos [15].

Algunos ejemplos de las incrustaciones que se forman en las tuberías se presentan en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Tipos de incrustaciones [16]

Tipo de incrustación	Descripción
Carbonato de calcio	A elevadas temperaturas y presiones, la solubilidad del carbonato de calcio disminuye.
Cloruro de calcio	Altamente soluble en agua
Sulfato de calcio	Baja solubilidad a temperaturas elevadas y a que produce una incrustación dura y adherente
Carbonato de magnesio	Los iones de calcio y magnesio forman precipitados de sales insolubles que causan incrustaciones en las tuberías
Cloruro de magnesio	Se presenta en la naturaleza bajo la forma de diferentes minerales. Es bastante soluble en agua.

Otras incrustaciones importantes son los compuestos de hierro, estos depósitos pueden ser originados por dos fuentes, la primera, iones de hierro presentes en el agua y la segunda, resultado de la corrosión de la estructura metálica [16].

Los compuestos de hierro ocasionado por el O_2 son depósitos incrustantes de óxidos muy comunes, pueden presentarse como duras o blandas, y en distintos colores, rojizos para el Fe_2O_3 coloidal y negros para $FeO(Fe_2O_3)$.

Los compuestos de hierro ocasionados por el CO_2 forman depósitos de carbonato de hierro debido al hierro soluble, precipitando principalmente en zonas donde se presenten caídas de presión drásticas.

Los compuestos de hierro ocasionado por la acción bacteriana y el H_2S , pueden ser Fe_9S_8 kansifa, $Fe_{0.875}S$ piratita y FeS_2 pirita. Estos depósitos son delgados y adherentes. Cuando las incrustaciones de sulfuro de hierro esta oxidada puede formar incrustaciones magnéticas de hierro, lo cual ocasiona severos daños. Son catódicas al hierro del acero en las estructuras provocando la corrosión por picaduras.

1.4.5 Estudios relacionados a la problemática de corrosión e incrustaciones en tuberías de agua potable

El estudio examina la formación de incrustaciones y el potencial de corrosión del agua potable en la red de distribución de la ciudad de Shiraz. Se analizó la composición química de incrustaciones mediante el método de difracción de rayos X. Los resultados indicaron que las principales composiciones en las muestras de incrustación eran carbonato de calcio, sulfato de calcio, carbonato de magnesio, sulfato de magnesio, hematita, maghemita, magnetita, goethita, óxido de zinc, yeso, vivianita, dolomita, hidroxiapatita y troilita. Los principales elementos en las muestras de incrustación fueron magnesio, silicio, fósforo, azufre, zinc, cobre y plomo. El aumento en el grado de dureza, acidez, alcalinidad y presión conduce a un aumento en la tasa de formación de incrustaciones. En una de las zonas de estudio probablemente el factor principal que implica una alta formación de incrustación es un nivel significativo de alta dureza en el agua [17].

Se realizó un estudio sobre tuberías de hierro corroídas con incrustaciones presentes. Los resultados de caracterización indicaron depósitos porosos de fases de Fe (III) (goethita (α -FeOOH), magnetita (Fe_3O_4) y magemita (α - Fe_2O_3)) con una capa densa en forma de concha en la parte superior de las incrustaciones, y altas concentraciones de contenido de Fe (II) fácilmente soluble que estaban presentes dentro. La siderita (FeCO_3) también se identificó como una fase componente, aunque solo estaba presente en cantidades menores. El hierro se liberó al agua a granel principalmente en forma ferrosa. Cuando existía oxígeno presente en el agua, se observaron mayores cantidades de liberación de hierro durante el estancamiento en comparación con las condiciones de flujo de agua [18].

Capítulo 2

2. Metodología

El diseño del proyecto integrador consiste en la evaluación de los daños por corrosión interna en tuberías de agua potable, para lo cual se requirió investigación bibliográfica de la problemática, recopilación de información referente a parámetros relacionados a la calidad del agua y condiciones de operación de las tuberías, y técnicas de caracterización para incrustaciones.

La evaluación de la corrosión conlleva el estudio de las incrustaciones internas, la superficie interna metálica y la tasa de corrosión de las tuberías. Tiene como meta de investigación conocer y describir incrustaciones de la superficie interna para su posterior análisis composicional y medición de la tasa de corrosión.

La metodología de diseño busca establecer correlaciones entre los resultados obtenidos de los ensayos con los parámetros evaluativos de corrosión, de tal forma que se lleguen a las posibles causas de los daños internos en las superficies de la tubería metálica.

2.1 Alternativas de solución del problema

La evaluación de daños por corrosión interna en tuberías de agua potable requiere de un método factible que permita encontrar las posibles causas de la problemática debido a los efectos de incrustaciones de origen desconocido presentes en las paredes internas de las tuberías.

Existen diversos métodos que permiten evaluar la corrosión en tuberías de distribución de agua potable. A continuación, se presentan diferentes métodos encontrados en la literatura para evaluar la corrosión interna en estos materiales, los cuales fueron seleccionados como alternativas de solución al problema [19].

2.1.1 Método de muestreo y caracterización

Este método implica tomar muestras del agua y/o de los depósitos en el interior de la tubería para su posterior análisis en laboratorio. Se realizan pruebas químicas para determinar la presencia y concentración de sustancias corrosivas en el agua, así como análisis de los depósitos

para identificar la presencia de productos de corrosión. Estos métodos de muestreo se pueden utilizar de forma independiente, o en combinación, para determinar el alcance y las causas sospechosas de corrosión interna. Esta información se puede utilizar para determinar si los métodos de mitigación son necesarios [19]. Las muestras obtenidas pueden ser valoradas por diversos ensayos de laboratorio como microscopia electrónica de barrido, difracción de rayos X, análisis químico, absorción atómica. El tiempo de ensayo necesario para los muestreos depende del alcance del estudio que se esté realizando, por ejemplo, los muestreos realizados en agua pueden perdurar diversas semanas y llegar a meses para su respectivo análisis, así como también puede ser obtenida una sola muestra y caracterizada. De manera general, el tiempo dependerá de la finalidad de la muestra y técnicas de laboratorio utilizadas.

2.1.2 Método de cupones

También conocido como sistema piloto de distribución, permite estudiar los fenómenos de la superficie interna con la interacción del agua potable. El deterioro superficial, calidad del agua y depósitos formados en las tuberías, son parte del estudio de este método. Se analizan parámetros fisicoquímicos del agua y para el estudio de las superficies metálicas se determinan en diferentes tiempos de exposición, la velocidad de corrosión, crecimiento de biopelícula y productos formados [1]. Básicamente es una prueba cerrada con estante de cupones ubicados en el centro de la instalación, que sirven de indicadores para la evaluación de la corrosión [19]. El cambio o pérdida de peso que ocurre en cada cupón se convierte en una base para calcular la tasa de corrosión [19].

En relación al tiempo del ensayo, el estudio normalmente se efectúa con una duración cercana a 1 año, o aún mayor para el caso de evaluación de la corrosión de los materiales metálicos y la formación de biopelícula en el sistema de distribución [1].

2.1.3 Método de prueba ultrasónica

El método de prueba ultrasónica para tuberías de corrosión interna es una técnica de prueba no destructiva utilizada para evaluar el estado de las paredes internas de las tuberías y detectar corrosión u otros defectos. Implica el uso de ondas sonoras de alta frecuencia, típicamente en el rango de 1 a 20 MHz, para penetrar en el material de la tubería y proporcionar información sobre su espesor e integridad. Para realizar el monitoreo, se pasa un transductor de ultrasonido conectado a una máquina de diagnóstico sobre el objeto que se está inspeccionando. En esta técnica, el material no tiene que someterse a ningún corte de metal, seccionamiento o reacciones químicas para fines de prueba [20].

Parte de la información clave obtenida a través de este método incluye medición del espesor de la pared, detección de pérdida y adelgazamiento de la pared, detección de corrosión por picaduras, localización de la corrosión y evaluación de la integridad general de la tubería. Al evaluar el espesor y detectar la corrosión, las pruebas ultrasónicas proporcionan una evaluación general de la integridad estructural de la tubería. Esta información es crucial para determinar la vida útil restante de la tubería y tomar decisiones con respecto al mantenimiento, reparación o reemplazo. Al realizar mediciones de espesor ultrasónico periódicas en ubicaciones específicas de la tubería, es posible rastrear los cambios en el espesor de la pared de la tubería a lo largo del tiempo. La velocidad a la que disminuye el espesor de la pared indica la tasa de corrosión. Los costos del método de prueba ultrasónica incurren desde la logística del proyecto, uso de equipos, asesorías de personal especializado, accesibilidad de la tubería y los reportes con los análisis de datos. [21]

2.2 Descripción y selección de la mejor alternativa

Como se observó el estudio de la corrosión interna de tuberías de agua potable puede seguir diversos métodos de evaluación, que dependen de diferentes factores, instrumentos o equipos, tiempo de ensayo, etc. Sin embargo, para la elección correcta de la metodología se

consideran los siguientes criterios de evaluación expuestos en la Tabla 2.1, que fueron evaluados en una matriz de decisión.

Tabla 2.1 Criterios de evaluación

Criterio	Descripción
Cobertura de inspección	Capacidad que tiene el método para evaluar la superficie interna de la tubería en un sistema de distribución de agua potable.
Tiempo de ensayo	Se refiere al tiempo estimado de evaluación que tiene el método para encontrar resultados, para este caso no puede sobrepasar los 4 meses de evaluación.
Costo	Es el precio o valor monetario requerido para la aplicación de la metodología de evaluación, se consideran los costos de ensayos que generan las técnicas de evaluación.
Disponibilidad de equipo	Se refiere a la disponibilidad o existencia de un equipo de caracterización en los laboratorios o instalaciones de ESPOL.
Información encontrada	Información relevante obtenida después de aplicar el método de evaluación en las tuberías, para este caso debe permitir obtener la naturaleza o componentes químicos de las incrustaciones y medir una tasa de corrosión promedio de las superficies metálicas.

Según la necesidad del proyecto el criterio con mayor valor seleccionado fue el de “Información encontrada”, quedando la valoración de los criterios en el orden que se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Ponderado de los criterios de evaluación

Criterio	Información encontrada	Cobertura de inspección	Tiempo de ensayo	Disponibilidad de equipo	Costo	$\Sigma+1$	Ponderado
Información encontrada		1	1	1	1	5	0,333
Cobertura de inspección	0		0,5	1	1	3,5	0,233
Tiempo de ensayo	0	0,5		1	1	3,5	0,233
Disponibilidad de equipo	0	0	0		0,5	1,5	0,1
Costo	0	0	0	0,5		1,5	0,1
					Suma	15	1,000

Realizando los cálculos respectivos de todos los criterios y ponderando con las alternativas de selección, el mayor puntaje obtenido fue para el método de muestreo, tal como se presenta en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Selección de la alternativa a implementar

Conclusión	Información encontrada	Cobertura de inspección	Tiempo de ensayo	Disponibilidad de equipo	Costo	Σ
Método de muestreo	0,167	0,039	0,097	0,042	0,050	0,394
Método de cupones	0,111	0,078	0,039	0,017	0,033	0,278
Método de prueba ultrasónica	0,056	0,117	0,097	0,042	0,017	0,328

Por tanto, la alternativa elegida para el desarrollo del diseño experimental de evaluación de daños por corrosión interna en tuberías de agua potable es el método de muestreo. A continuación, se procede a explicar el diseño conceptual requerido.

2.3 Diseño conceptual

El diseño conceptual es la base teórica sobre la que se desarrolla el presente proyecto, que consiste en diversos conceptos, aspectos o parámetros que serán aplicados durante la evaluación del método.

2.3.1 Descripción del área de estudio

El presente proyecto se realiza en una ciudad costera del país, que posee una red de distribución de agua potable que consta de 3 plantas de captación de agua cruda para su proceso de potabilización. En la figura 2.1 se muestra el esquema del sistema de abastecimiento de agua potable.

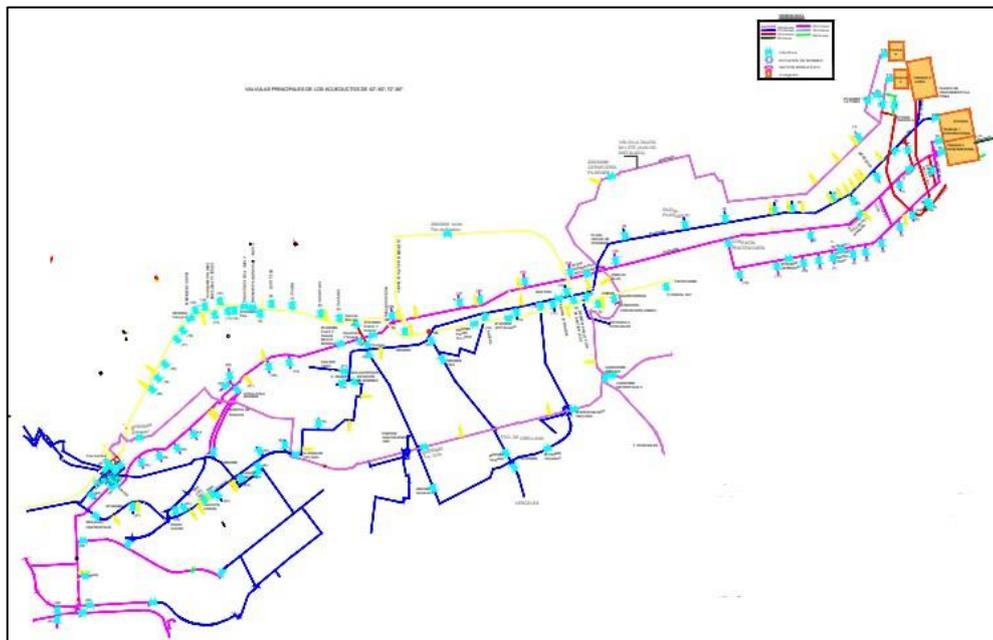


Figura 2.1 Esquema de la red de distribución de agua potable

2.3.2 Calidad del agua potable

El agua potable debe cumplir con requisitos para el consumo humano y doméstico según la Norma de Calidad Ecuatoriana NTE INEN 1108, en la Tabla 2.4 se presentan los rangos de valores que aseguran la calidad del agua.

Tabla 2.4 Parámetros de calidad del agua potable [22]

Parámetro	Unidad	Límite máximo permitido
Color	Unidad de color aparente (Pt-Co)	15
Turbiedad	NTU	5
Olor	-	No objetable
Sabor	-	No objetable
Antimonio, Sb	mg/l	0.02
Arsénico, As	mg/l	0.01
Bario, Ba	mg/l	0.7
Boro, B	mg/l	2.4
Cadmio, Cd	mg/l	0.003
Cianuros, CN ⁻	mg/l	0.07
Cloro libre residual	mg/l	0.3 a 1.5 ¹⁾
Cobre	mg/l	2.0
Cromo, Cr	mg/l	0.05
Fluoruros	mg/l	1.5
Mercurio, Hg	mg/l	0.006
Níquel, Ni	mg/l	0.07
Nitratos, NO ₃ ⁻	mg/l	50.0
Nitritos, NO ₂ ⁻	mg/l	3.0
Plomo, Pb	mg/l	0.5
Selenio	mg/l	0.04
¹⁾ Es el rango en el que debe estar el cloro libre residual luego de un tiempo mínimo de contacto de 30 minutos.		

2.3.3 Modelo de corrosividad del agua potable

El índice de saturación de Langelier (ISL) es una evaluación cuantitativa del potencial del agua para precipitar carbonatos de calcio. Se define de la siguiente manera [16]:

$$LSI = pH - pH_s \quad (3.1)$$

Donde, pH corresponde al valor del pH del agua y pH_s valor del pH del agua bajo las condiciones de saturación de calcio.

En la Tabla 2.5 se describen los parámetros con su interpretación.

Tabla 2.5 Valoración del índice de Langelier [17], [23]

Índice	Condición del agua		Corrosión y formación de incrustaciones			
	Valor del índice	Interpretación	Valor del índice	Interpretación	Valor del índice	Interpretación
Índice de saturación de Langelier (ISL)	ISL>0	Super saturada, tiende a precipitar CaCO ₃ .	-5	Corrosión grave	0	Equilibrio
			-4	Corrosión leve	0,5	Baja formación de incrustación
	ISL=0	Saturada, CaCO ₃ está en equilibrio.	-3	Corrosión leve	1	Moderada formación de incrustación
			-2	Corrosión leve	2	Moderada formación de incrustación
	<0	Baja saturación, tiende a disolver CaCO ₃ .	-1	Baja corrosión	3	Mediana formación de incrustación
			-0,5	Baja corrosión	4	Alta formación de incrustación

2.3.4 Parámetros fisicoquímicos de la agresividad corrosiva del agua

La determinación de la criticidad del agua potable tiene como norma base a la SP 0106-2006 “Control of Internal Corrosión in Steel Pipeline and Piping System” perteneciente a National Association of Corrosion Engineers (NACE International). En la tabla 2.6 se encuentra la clasificación de la agresividad corrosiva del agua según el criterio NACE.

Tabla 2.6 Clasificación de la agresividad corrosiva del agua [16]

Parámetro	Límite permitido		
	Corrosión baja	Corrosión moderada	Corrosión severa
pH	>7	6 a 7	<6
Temperatura	0 a 40°C	40 a 70°C	>70°C
Sólidos disueltos	<50 ppm	50 a 100 ppm	>100 ppm

En la tabla 2.7 se muestra la clasificación del agua según la dureza cálcica.

Tabla 2.7 Clasificación del agua según su dureza [13]

Clasificación del agua	Dureza cálcica mg/L CaCO₃
Agua suave	<50 mg/L como CaCO ₃
Dura moderadamente	50-150 mg/L como CaCO ₃
Agua dura	150-300 mg/L como CaCO ₃
Agua muy dura	>300 mg/L como CaCO ₃

En la tabla 2.8 se muestra el efecto corrosivo de la alcalinidad en el agua potable.

Tabla 2.8 Efecto de la alcalinidad en el agua potable [24]

Intervalos de alcalinidad	Dureza cálcica mg/L CaCO₃
Baja: 0 a 100 mg/L CaCO ₃ ⁻	Agua corrosiva si el pH<7
Ideal: 100 a 200 mg/L CaCO ₃ ⁻	Sin efectos
Alto: >200 mg/L CaCO ₃ ⁻	Depósitos o incrustaciones tuberías

2.4 Diseño experimental

El desarrollo experimental del diseño se enfocó en la evaluación de las muestras seleccionadas con el fin de evaluar los daños por corrosión presentados en las tuberías, se requirió la aplicación de técnicas de laboratorio. Se realizó la evaluación de la superficie interna de la tubería, donde se caracterizó las incrustaciones y revisión visual de la superficie metálica, además, de la estimación de la tasa de corrosión.

Se presentan las especificaciones necesarias para desarrollar el diseño experimental de evaluación del codo y carretes en su superficie interna en la tabla 2.9.

Tabla 2.9 Especificaciones del diseño metodológico para la evaluación de daños por corrosión interna en tuberías de agua potable

Característica	Descripción	Observación
<i>Materiales por evaluar</i>	Acero al carbono	No se conoce la naturaleza del acero, no existe ficha técnica de las tuberías en los archivos de la empresa, ni información técnica de proveedores. Se cree que los materiales de las piezas corresponden a un acero al carbono A36.
<i>Evaluación de la superficie interna de la tubería</i>	Requiere del análisis de la composición química de los depósitos e incrustaciones formados en su superficie.	La empresa desconoce por completo el contenido químico de estos sedimentos formados en la superficie, debido a que es la primera que trata este tipo de materiales.
	Requiere del análisis de la superficie metálica de la tubería debido a que se presentó perforaciones agravantes sobre la superficie interna.	La empresa considera que los sedimentos internos son los causantes de las picaduras internas que llegan hasta el exterior de la superficie metálica.
<i>Estimación de la tasa de corrosión</i>	La tasa de corrosión se estima sobre superficies corroídas de la tubería, para lo cual es necesario el año de instalación y el año de desahucio de esta.	Algunas de las partes de las piezas que presentan zonas corroídas por picadura, no presentaran una tasa de corrosión uniforme. Se considera la tasa de corrosión sobre piezas de zonas con mayor uniformidad debido a la complejidad y el tiempo necesario para evaluar zonas picadas.
<i>Numero de muestras</i>	<i>Codo: 3</i> <i>Carrete: 4</i>	Las muestras del codo fueron obtenidas según zonas de ubicación, centro del codo y exteriores. El carrete se encuentra cortado en cuatro partes, por ende cada muestra es obtenida de cada una de ellas.
<i>Ensayos</i>	Difracción de rayos X Análisis químico Análisis metalográfico (macrografías)	Los ensayos permitirán evaluar la superficie interna e incrustaciones de la tubería.

Según estas especificaciones, el diseño experimental se ilustra en la figura 2.2.

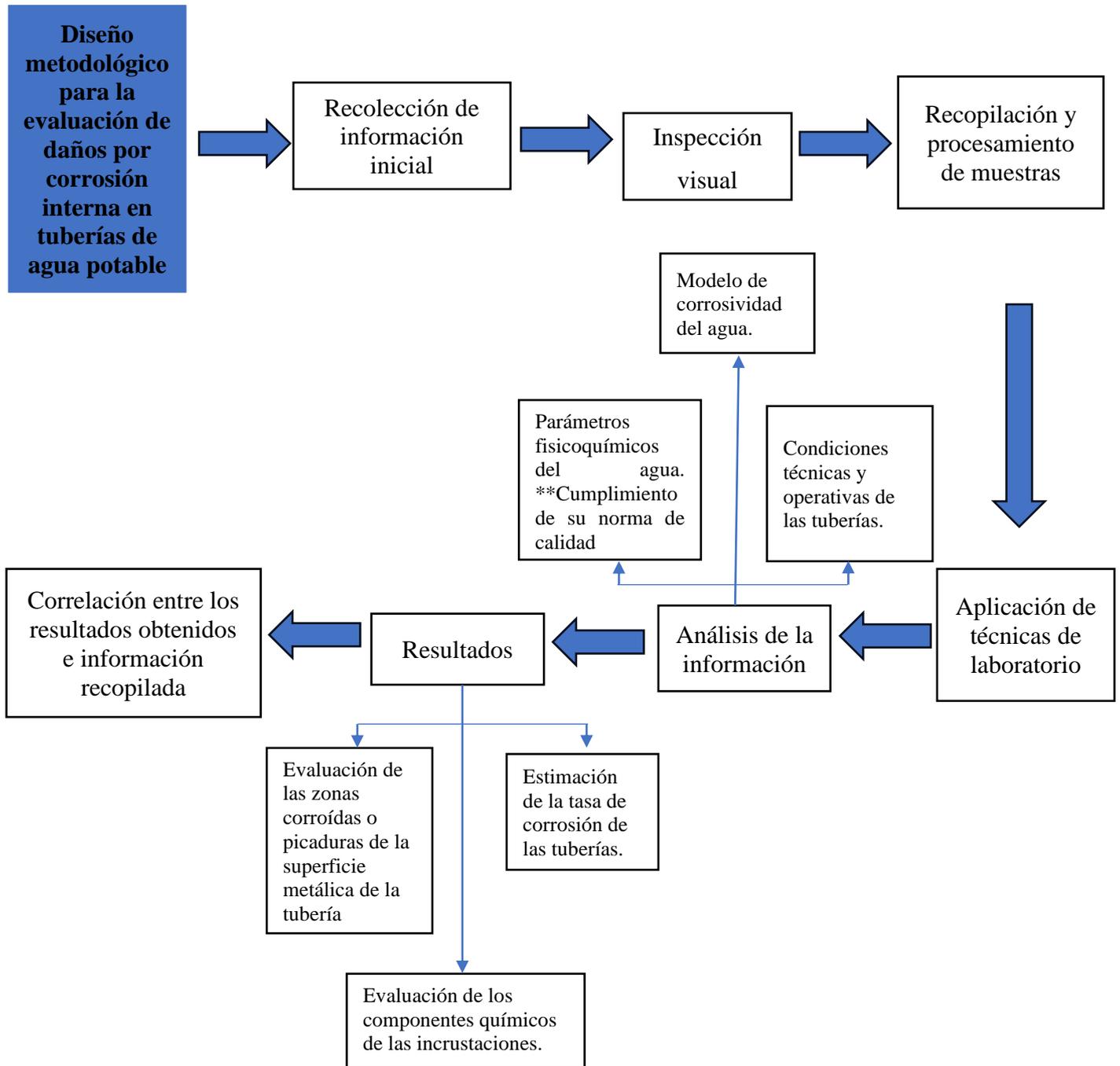


Figura 2.2 Diseño experimental de la evaluación

De esta manera se observa que el planteamiento de un diseño metodológico consta de diferentes etapas para poder llegar a la evaluación de los daños por corrosión interna, los cuales son descritos a continuación:

2.4.1 Recopilación de información inicial

Este proceso inicia en la búsqueda y recopilación de información que determina las condiciones de la problemática y su conexión con ciertas variables y parámetros como las características técnicas del sistema de distribución de agua potable tanto en sus tuberías, calidad del agua y otros factores internos involucrados directamente a los daños por corrosión interna, expuestos en el diseño conceptual.

A continuación, se detalla la información inicial necesaria para el desarrollo del diseño metodológico y que, posteriormente, fue analizada para su correlación con resultados, tal como se muestra en la Figura 2.3.

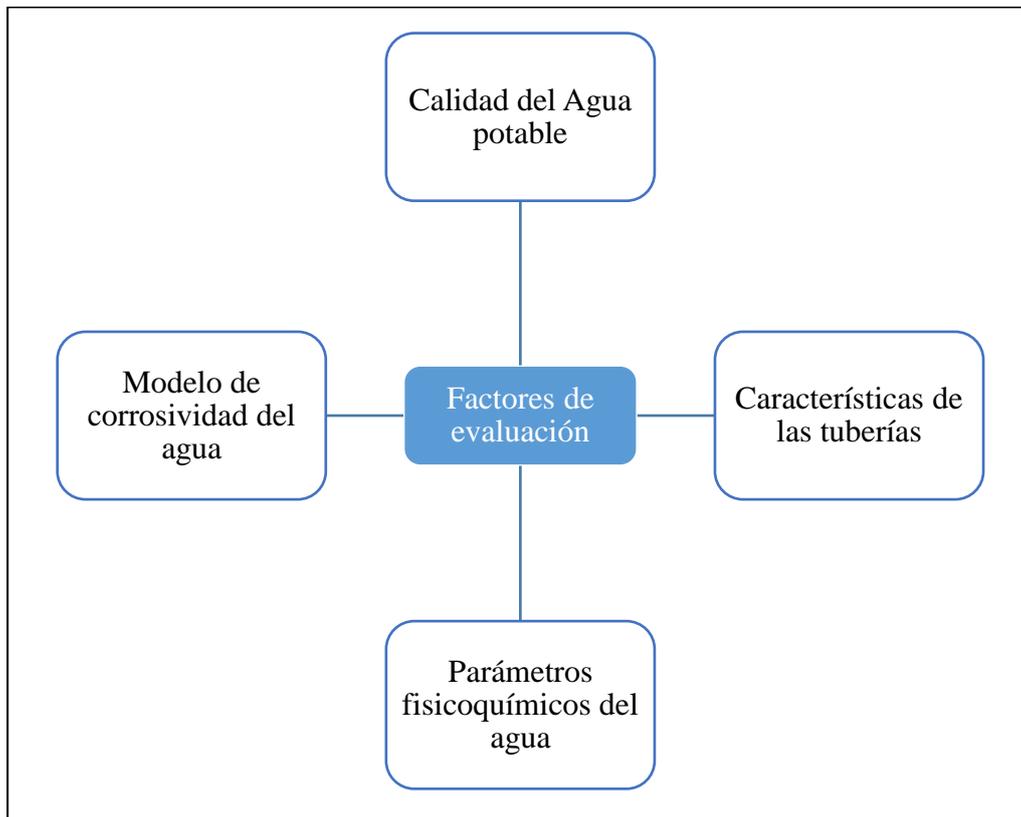


Figura 2.3 Factores de evaluación para el diseño metodológico

2.4.2 Inspección Visual

La inspección visual es una necesidad debido a que se están estudiando los daños de un material de ingeniería, por lo cual permite detectar las fallas o discontinuidades que son visualmente perceptibles durante el fenómeno de la corrosión [25].

La inspección visual fue realizada sobre las incrustaciones desconocidas en las tres piezas, para lo cual fueron encontradas características relacionadas a su color, tamaño, volumen y formación sobre picaduras. En el codo se pudo apreciar la calidad del revestimiento interno.

2.4.3 Recopilación y procesamiento de las muestras

Los puntos de muestreo fueron entregados por la empresa para su respectivo estudio, debido a las fallas presentadas sobre las tuberías. El factor determinante fue la presencia de incrustaciones en la superficie interna de la tubería. En la Tabla 2.10 se define el número de muestras para las dos zonas de estudios

Tabla 2.10 Puntos de muestreo

Zona	Parte de infraestructura	N° de piezas	N° de muestras	Denominación de las muestras
JM001	Carrete (Tramo de tubería)	2	4	T1, T2, T3, T4
CE002	Codo	1	3	C1, C2, C3

Las actividades de recolección y posterior manejo de las muestras son algunos de los aspectos más importantes en la caracterización de muestras, ya que la confiabilidad de los resultados analíticos finales dependerá no solo del desempeño de los métodos de ensayo aplicados, sino que también, y en forma muy trascendente, de la representatividad de la muestra.

La toma de muestras se realiza de acuerdo con el tipo de evaluación que se realizó, para la evaluación de los componentes químicos de incrustaciones, es necesario la recolección del material sólido incrustado en el interior de las tuberías; para la evaluación de la superficie metálica interna, es necesario la selección y corte del área metálica, de acuerdo con el tipo de pieza seleccionada.

Debido a las características que presentaron las incrustaciones, material sólido con ciertas zonas duras y con diversas coloraciones, para su extracción en el carrete y en el codo se

seleccionaron diferentes zonas de ubicación de las incrustaciones en el cual se requirió realizar un raspado con espátula.

En el carrete se recolecto muestras de diversos puntos en toda su longitud, obteniendo diversas morfologías y colores de la incrustación. Esta forma de recolección fue necesaria debido a que se obtiene una mayor cantidad de características de incrustaciones al ser recolectadas en diversos puntos.

Por otro lado, para el muestreo del codo se ubicaron tres zonas interiores, el centro y sus dos lados, de cada zona fueron recolectada las muestras, debido a que se tenía un instrumento de menor tamaño a comparación con el carrete, era más fácil poder marcar zonas de identificación de las incrustaciones.

El número de muestras tomadas para cada pieza, 3 para el codo (C1, C2, C3) y 4 (T1, T2, T3, T4) para el carrete, se vuelve necesario puesto que la evaluación de este número de muestras permite obtener resultados más fiables. Las 4 muestras obtenidas del carrete corresponden a cada tramo cortado respectivamente, mientras que las 3 muestras del codo corresponden a muestras de solo esa pieza.

El procesamiento de muestras dependió de cada tipo de evaluación a implementar. Para la caracterización de las incrustaciones fue necesario convertirlas en polvo con el uso de un mortero y tamizador de 300 micras. En el mortero se molieron las incrustaciones hasta obtener partículas más pequeñas, las cuales fueron tamizadas para conseguir un solo tamaño de muestra. Este procedimiento se realizó para la caracterización mediante difracción de rayos X y análisis químico, posteriormente se procedió a recolectar las muestras dentro de un empaque plástico, donde se obtuvieron los siguientes pesos para cada muestra presentadas en la tabla 2.11.

Tabla 2.11 Muestras obtenidas

Ensayo	Pieza	Muestra	Peso (g)
Difracción de rayos X (7 muestras)	Codo	C1	10.2456
		C2	10.1909
		C3	10.1541
	Carrete	T1	15.2663
		T2	15.0166
		T3	15.0504
		T4	14.0424
Análisis químico (1 muestra)	Carrete	T1-T2-T3	99.1070

Las muestras que se presentan en la tabla 2.11 fueron obtenidas de cada sección/tramo de la tubería, para el caso del análisis químico la muestra fue recolectada de los tramos T1, T2 y T3

2.4.4 Aplicación de técnicas de laboratorio

El diseño de evaluación por daños de corrosión interna en tuberías de agua potable requiere de técnicas de laboratorio para los análisis de las incrustaciones y la superficie metálica, de tal manera se obtienen resultados sobre la composición química, la morfología y extensión de la corrosión en su superficie interna y la estimación de la tasa de corrosión. Las metodologías aplicadas se explican de acuerdo con cada evaluación implementada mencionada en la tabla 2.4.

2.4.4.1 Evaluación de la superficie interna de la tubería. Para la caracterización de las incrustaciones las técnicas necesarias fueron la difracción de rayos X y el análisis químico.

La difracción de rayos X (DRX) es muy utilizado para estudiar las fases cristalinas que se pueden determinar de diferentes materiales. Debido al caso expuesto se utilizó un difractómetro de rayos X, modelo X'Pert Pro, marca PANALYTICAL. Las condiciones de operación fueron de 45 kV y 30 mA, con un paso de 0.05°, 20 segundos de tiempo de

escaneo por paso, con abertura de 1/4 mm en el incidente y máscara de 10 mm, entre los ángulos 2° - 90° (2θ). Para este ensayo se utilizó 1 gramo de muestra, 90% de material a ensayar y 10 % de peso de cerianite (patrón interno que permite el análisis cuantitativo). La técnica de ensayo fue realizada por medio de método interno de CIDNA-ESPOL.

La caracterización de las incrustaciones por medio del análisis químico dependió de los analitos que se eligieron para su posterior estudio, en este caso correspondió a Ca, Mg, carbonatos y sulfatos.

El Ca y Mg fue analizado mediante el método EPA 3050B; que corresponde a espectrometría de absorción atómica de llama (FLAA), carbonatos por medio de titulación, y azufre mediante método gravimétrico según la norma INEN 237, ensayos que fueron realizados en LABQUINS ESPOL.

Para la evaluación de la superficie metálica se requirió de macrografías por medio de análisis metalográfico. Se obtuvo una placa metálica de cada pieza, el codo y los 4 tramos del carrete, donde se procedió a cortar dos probetas, que fueron analizadas en el microscopio con un aumento de 10X. Las probetas fueron analizadas con los óxidos presentes en su superficie sin incrustaciones.

2.4.4.2 Estimación de la tasa de corrosión. La inspección por ultrasonido fue necesaria en la estimación de la tasa de corrosión, debido a que permitió conocer el espesor actual, dato necesario para el cálculo de la tasa de corrosión.

Para la medición del espesor se realizó una limpieza mecánica sobre las placas extraídas mencionadas anteriormente (T1, T2, T3, T4 y codo), se procedió a colocar gel conductor sobre el transductor del instrumento, el cual fue situado sobre la placa limpia y empezó la medición de datos. Esta técnica fue implementada mediante la norma API 570 “Inspección y reparación de tuberías”, de los cuales se realizaron tres mediciones de espesor en diferentes zonas de la placa limpia, obteniendo los espesores mostrados en la tabla 2.12.

Tabla 2.12 Espesores encontrados en las muestras

Muestra	Espesor original	Espesor 1 mm	Espesor 2 mm	Espesor 3 mm	Espesor promedio mm
Codo	8 mm	7.32	7.59	7.42	7.443
T1	4 mm	3.18	3.32	3.23	3.243
T2	4 mm	3.40	3.48	3.75	3.543
T3	4 mm	3.34	3.77	3.39	3.500
T4	4 mm	3.12	3.66	3.59	3.457

Según la norma API 570, para la estimación de la tasa de corrosión se aplica la siguiente fórmula.

$$VC = \frac{\Delta e}{\Delta t} = \frac{e_f - e_0}{t_f - t_0} \quad (2.1)$$

e_f : *Espesor final de la placa*

e_0 : *Espesor inicial de la placa*

t_f : *Tiempo final de uso*

t_0 : *Tiempo inicial de uso*

2.4.5 Análisis de la información

El análisis de la información se realizó sobre parámetros o factores de evaluación elegidos, obtenidos de la recopilación de la información inicial debido a que se encuentran relacionados como los posibles causantes de los daños por corrosión interna de las superficies metálicas de las tuberías en estudio.

2.4.6 Obtención de resultados

Se refiere a los resultados obtenidos de las técnicas de laboratorio implementadas, los cuales se relacionan con sus evaluaciones como se presenta en la Tabla 2.13.

Tabla 2.13 Resultados esperados

Tipo de evaluación	Técnica de laboratorio	Resultados esperados
Evaluación de las incrustaciones	Difracción de rayos X	Análisis de los compuestos químicos de las incrustaciones.
	Análisis químico	Análisis de elementos o sustancias químicas elegidas.
	Macrografías	Detalles de la extensión de la corrosión y sus zonas.
Estimación de la tasa de corrosión	Inspección por ultrasonido	Espesor actual de la placa en estudio.

2.4.7 Correlación entre los resultados obtenidos e información recopilada

Se refiere a la última etapa del diseño metodológico para la evaluación de daños por corrosión en las tuberías, en la cual, se relaciona los resultados de las técnicas de laboratorio implementadas con el análisis de la información inicial recopilada. Esta etapa busca a llegar a las posibles causas que provocaron los daños por corrosión interna.

2.5 Consideraciones éticas y legales

Se observa que todas las evaluaciones del método necesitaron de la aplicación de técnicas de laboratorio, en el cual se pudo caracterizar el material, en este caso las incrustaciones y superficie metálica de la tubería. Cada tipo de evaluación fue anexada a diversas técnicas de caracterización debido a la finalidad que se encontró en ellas.

La evaluación de las incrustaciones por medio de la difracción de rayos X y análisis químico permitieron conocer la composición de estos sólidos.

Es importante mencionar que, según bibliografía revisada, cuando se presenta la problemática de incrustaciones en tuberías de distribución de agua potable, la difracción de rayos X es una de las técnicas más usadas para hallar su composición [26] a causa de obtener resultados de toda la gama de elementos o compuestos químicos presentes en las muestras, de tal

forma es posible conocer la naturaleza de estas incrustaciones. Esta técnica muchas veces es realizada en conjunto con un análisis químico, de tal forma que el investigador puede delimitar ciertas cantidades de sustancias o elementos presentes en las incrustaciones para hallar la cantidad presente dentro de las muestras. Por ello, esta técnica fue importante para cuantificar las sustancias químicas que más se presentaron en las incrustaciones, y conocer cuáles eran los compuestos con mayor presencia y relacionarlo a un posible efecto de la corrosión.

La evaluación de la superficie metálica fue necesaria realizarla por técnicas de obtención de imagen, en la cual se pueda estudiar sus características. Para evaluar la extensión de daños sobre zonas corroídas y observar la textura o rugosidad sobre una zona a nivel macro se requirió de la caracterización por medio de macrografías, con el fin de poder comparar distintas zonas sobre las que se encuentran incrustaciones y observar similitudes y diferencias en la superficie del material.

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

En esta sección se presentan los resultados encontrados del diseño metodológico para la evaluación de daños por corrosión interna en tuberías de distribución de agua potable, que consistió en la caracterización de las incrustaciones y evaluación de las superficies internas de la tubería, además de la estimación de la tasa de corrosión por medio de la pérdida de espesor durante los años de actividad.

3.1 Resultados de la investigación inicial

En primer lugar, se presentan los resultados obtenidos de la investigación de las variables y parámetros que se correlacionan con los posibles efectos de la corrosión interna. En la figura 3.1 se muestran el comportamiento de los índices de Langelier (ISL) promedio del año 2017 al 2020.

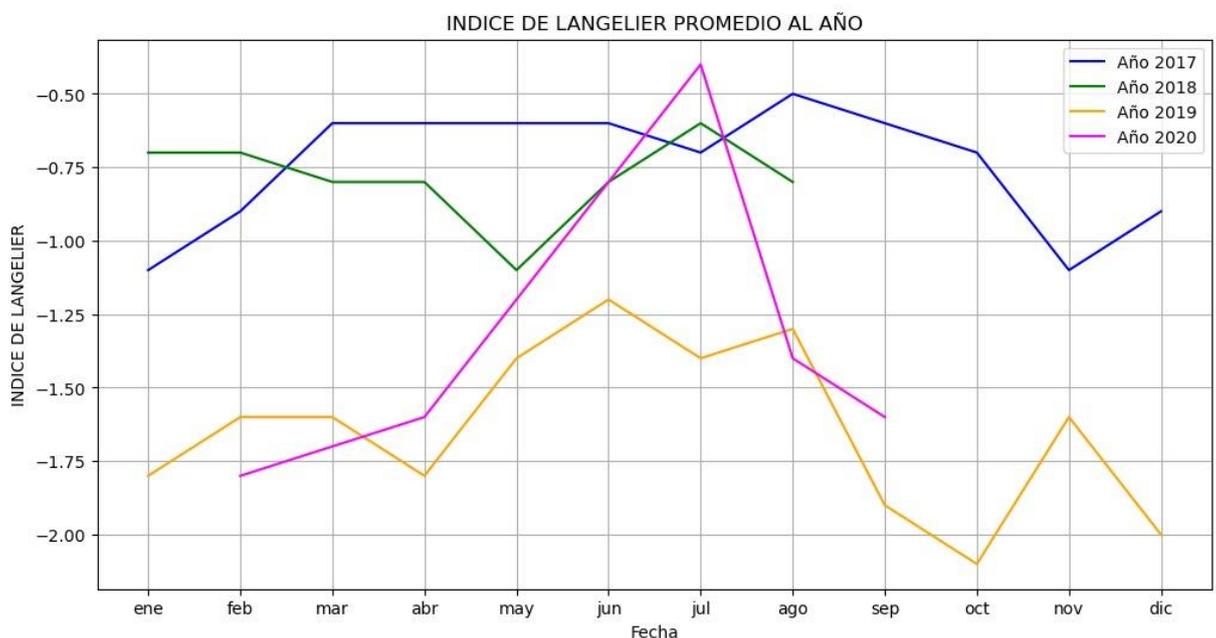


Figura 3.1 Índice de Langelier periodo 2017-2020

Con estos índices se pudo asociar la corrosividad del agua con la formación de las incrustaciones. Durante los años 2017 al 2020 se presentaron Índices de Langelier negativos fluctuando desde -0.50 a -2.00. Debido a que el ISL presenta valores menores a 0, se considera

que existe una tendencia a la disolución de CaCO_3 , y el agua es corrosiva, a valores más negativos aumenta su corrosividad. La variabilidad en su comportamiento depende de la temperatura, dureza, alcalinidad y sólidos totales disueltos en el agua, parámetros controlados según la calidad de agua que ingresa a ser potabilizada y que se dosifica para cumplir con las normas para consumo humano. Como tal, no existe una norma aplicable para la empresa en estudio que certifique que valor de ISL debe ser el ideal para que este cumpla con las normas de consumo.

En la figura 3.2 se presentan los índices de Langelier promedio del año 2021 y 2022.

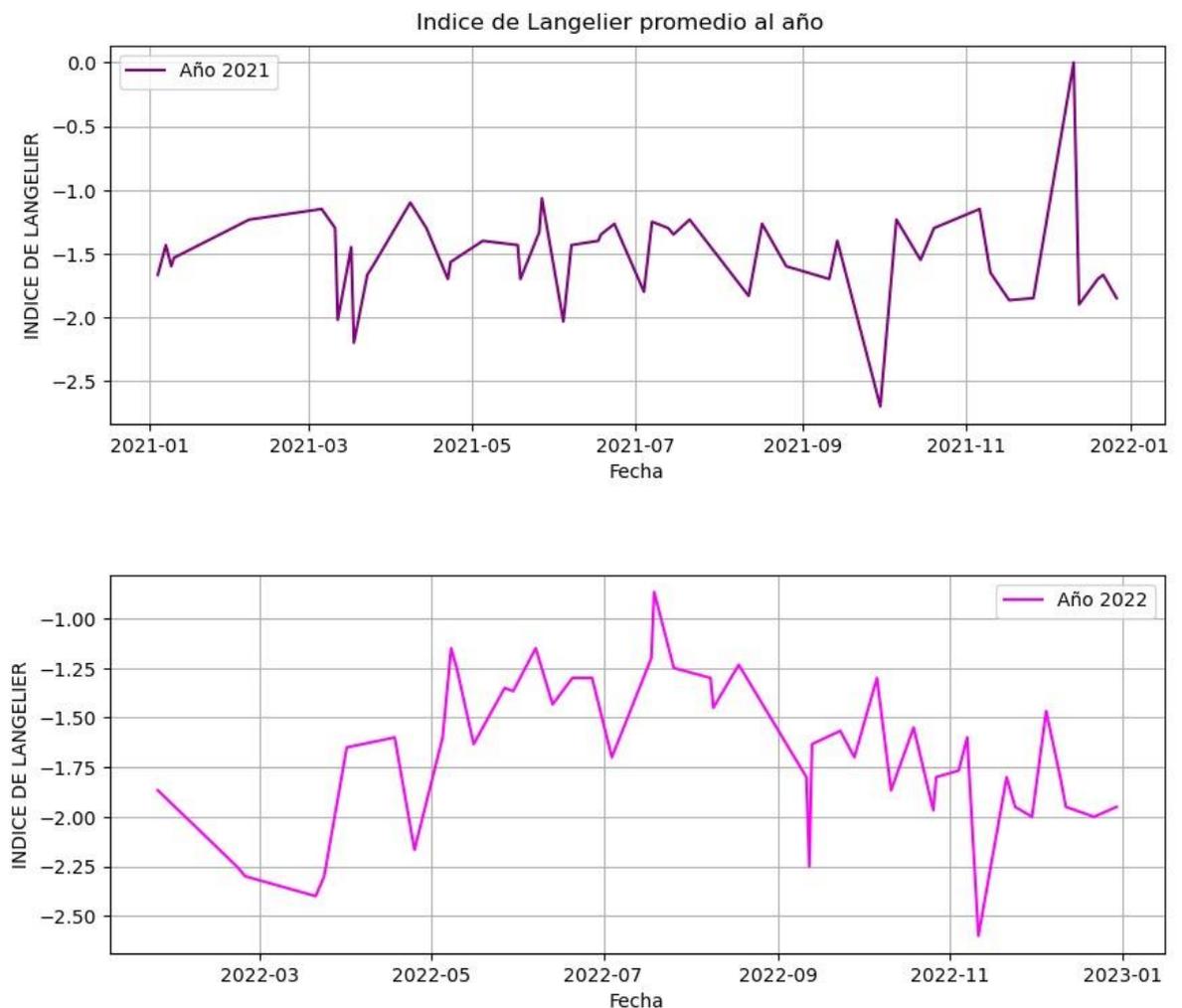


Figura 3.2 Índice de Langelier periodo 2021 y 2022

Durante los años 2021 y 2022 se presentaron ISL negativos, para el año 2021 existe una fluctuación desde 0 a -2.50 y en el año 2022 existe una fluctuación desde -1 a -2.50, todos estos

valores indican disolución de CaCO_3 y corrosividad del agua. El comportamiento durante estos años es mucho más variable que en años anteriores, por ende, existió un mayor cambio en los parámetros químicos del agua.

Los parámetros fisicoquímicos revisados durante el año 2017 son expuestos en la figura 3.3.

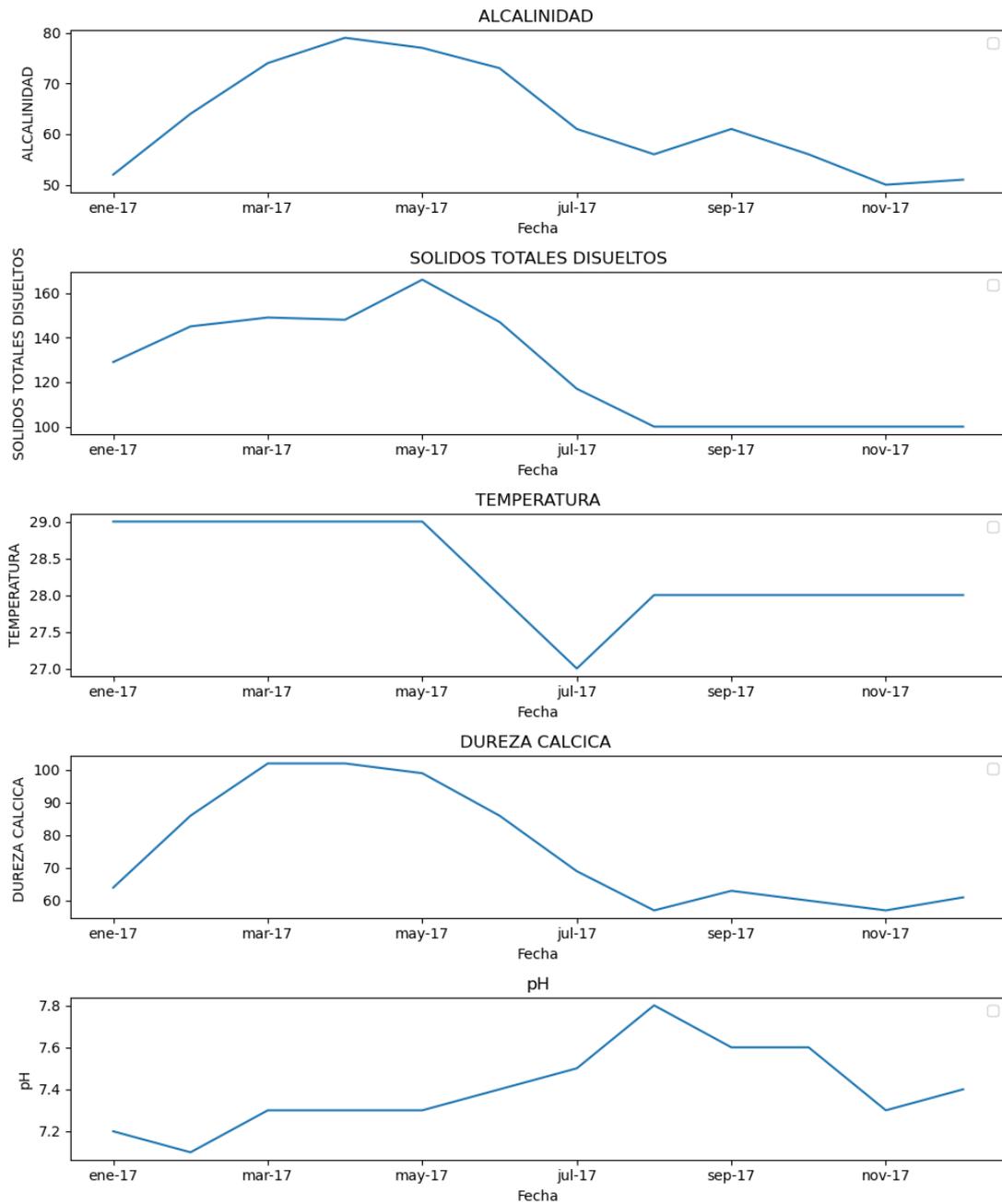


Figura 3.3 Parámetros fisicoquímicos año 2017

Los parámetros fisicoquímicos revisados durante el año 2018 son expuestos en la figura

3.4.

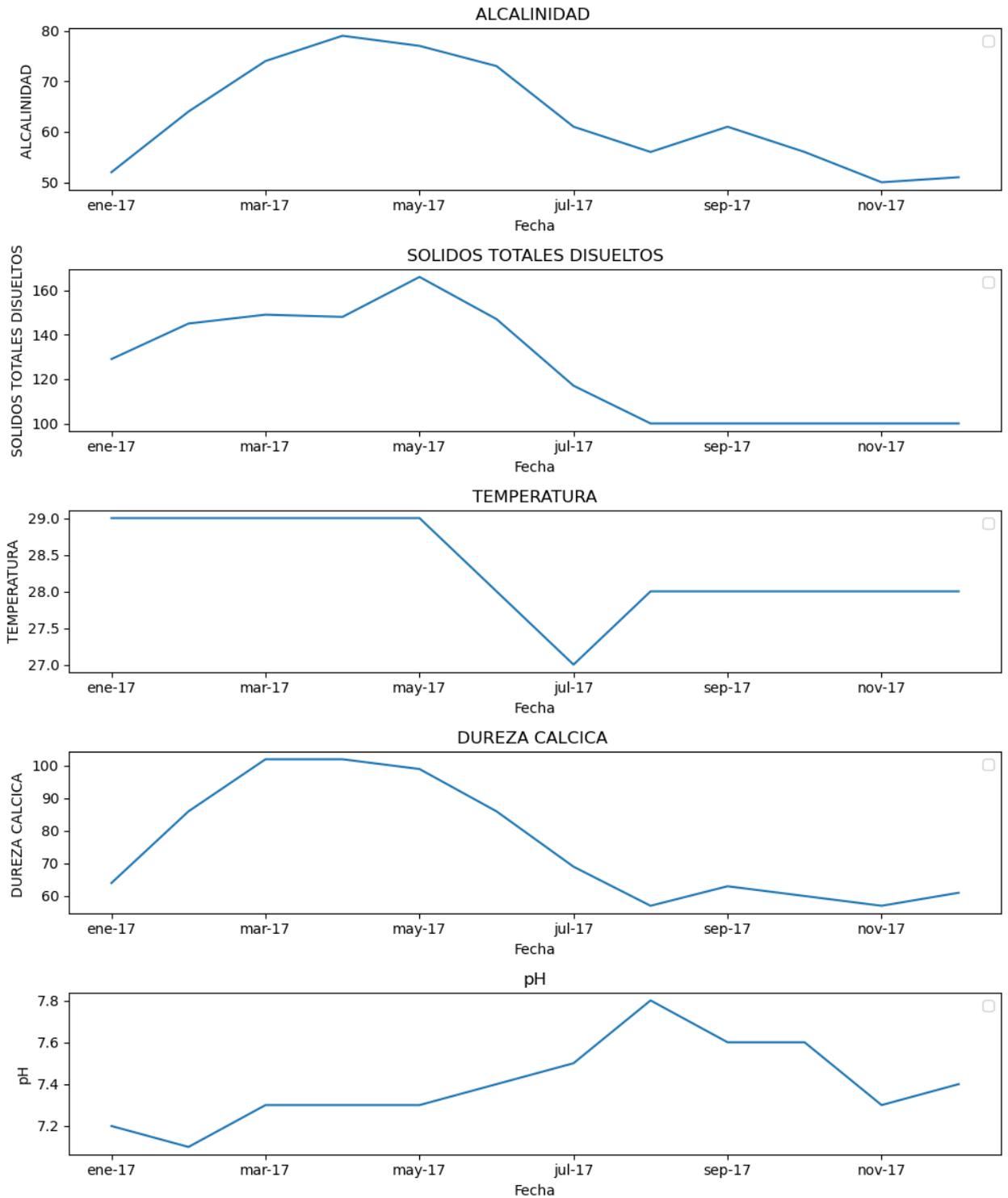


Figura 3.4 Parámetros fisicoquímicos año 2018

Los parámetros fisicoquímicos revisados durante el año 2021 son expuestos en la figura

3.5.

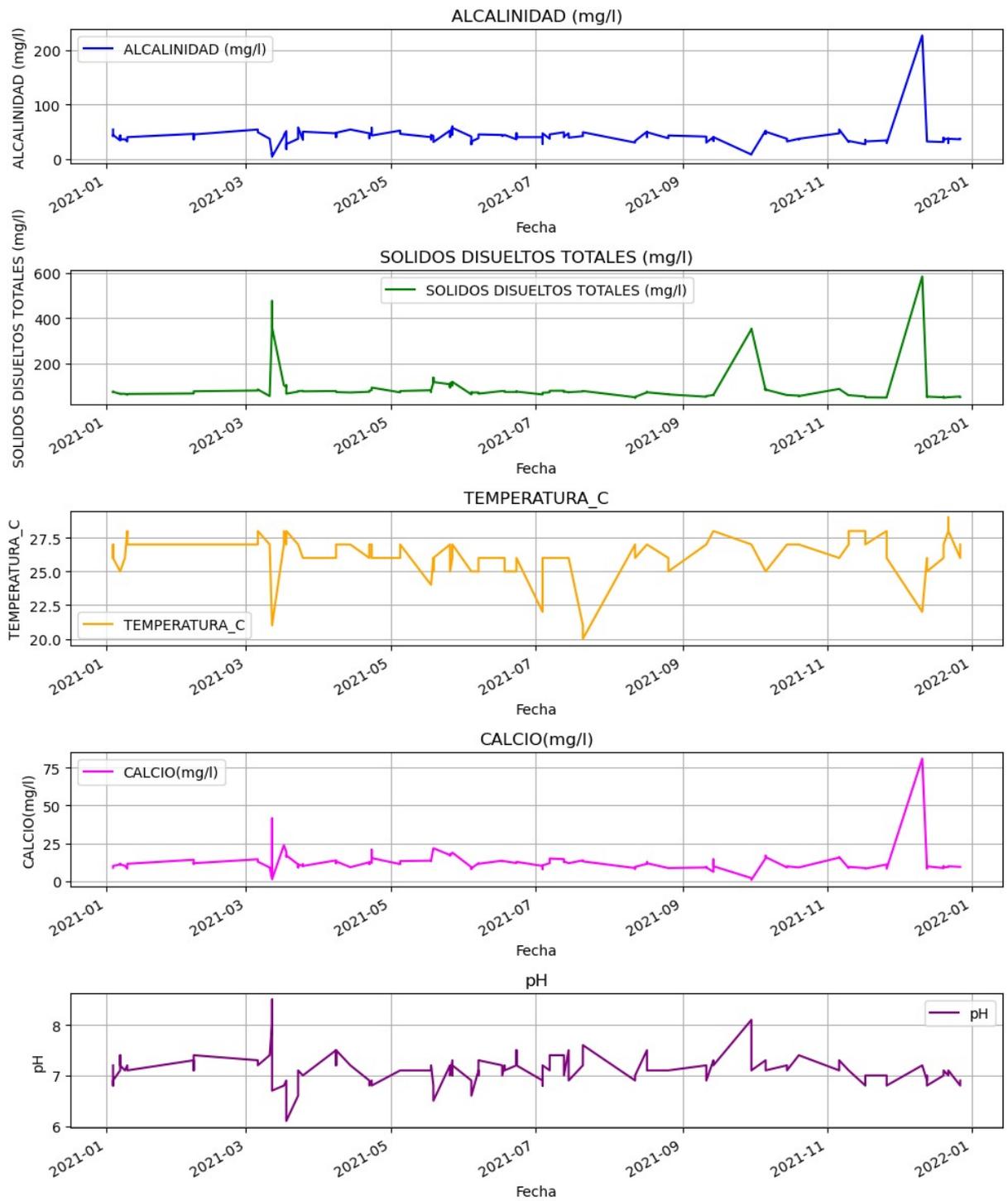


Figura 3.5 Parámetros fisicoquímicos año 2021

Los parámetros fisicoquímicos revisados durante el año 2021 son expuestos en la figura

3.6.

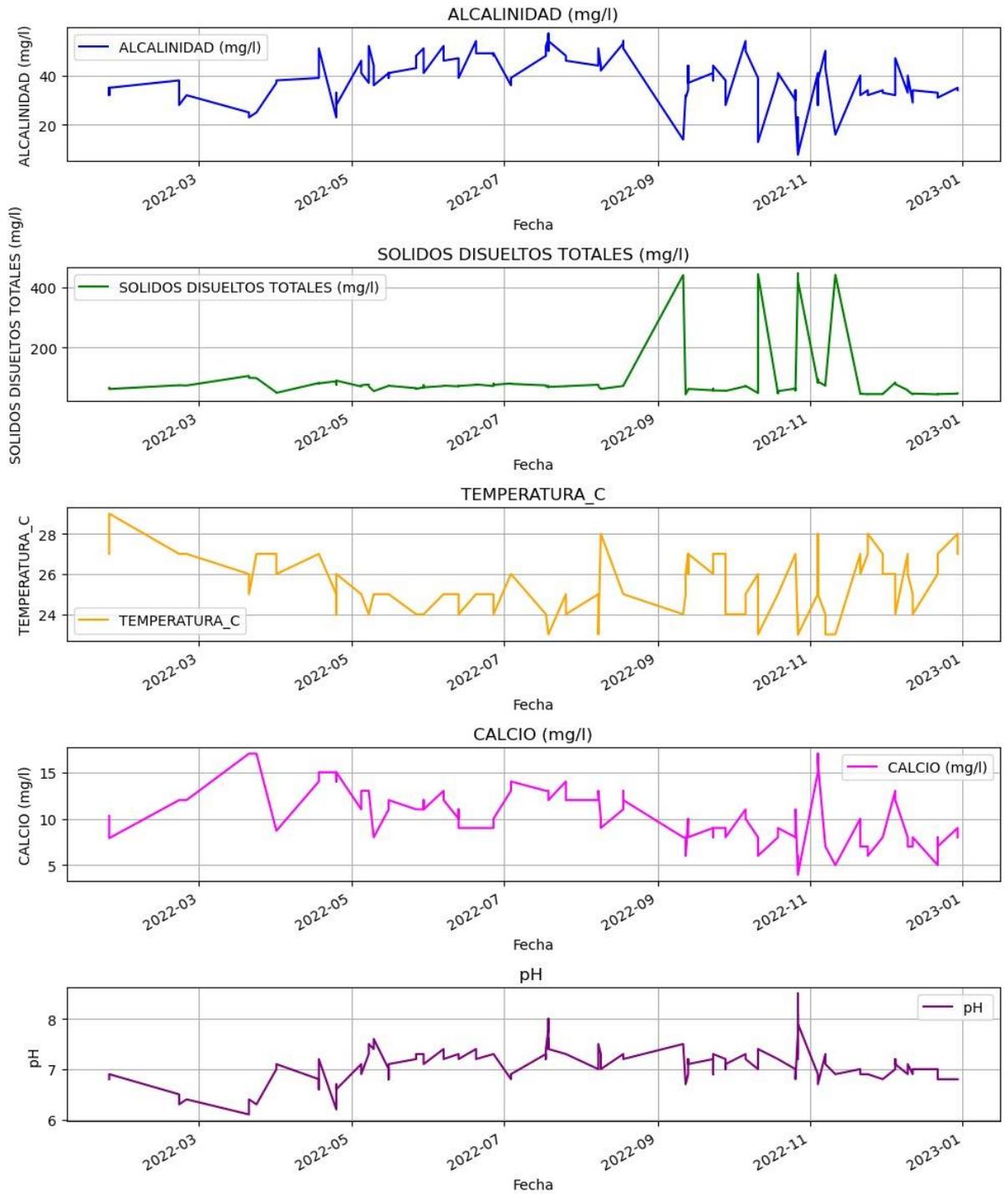


Figura 3.6 Parámetros fisicoquímicos año 2022

Tal como lo indica la figura 3.3 y 3.4, durante el año 2017 y 2018 se pudo observar valores de alcalinidad desde 50 a 75 mg/L y 40 a 70 mg/L, respectivamente, mostrando rangos adecuados a la calidad del agua debido a que su pH es mayor a 7, confirmando que este parámetro no implica efectos corrosivos. Los sólidos disueltos se encuentran desde los 100 ppm

hasta un valor mayor a los 150 ppm y desde los 100 ppm hasta los 150 ppm, exponiendo un valor de corrosividad moderada. La temperatura para los dos años se encuentra dentro de un rango inferior a 40°C, por lo cual no implica efectos corrosivos. La dureza cálcica se encuentra desde los 50 ppm a los 100 ppm y desde los 50 ppm a los 80 ppm, respectivamente, valores que indican que se tiene un agua dura moderadamente. El pH se encuentra en un rango de baja corrosividad.

En la figura 3.5 durante el año 2021 se pudo observar valores de alcalinidad desde 0 hasta valores que superan los 200 mg/L, estos valores durante los meses de enero a noviembre son adecuados en la mayor parte de su rango, no obstante, en los rangos donde el pH es menor a 7 se tiene agua corrosiva, que se muestra durante los meses de abril y junio; y a finales de año con una tendencia menor. Así mismo, la alcalinidad durante su último término presentó valores entre los 100 ppm a 200 ppm, que implica que no existe efectos corrosivos del agua, pero a valores mayores a los 200 ppm se obtiene una formación de depósitos o incrustaciones en las tuberías. Los sólidos disueltos en su mayoría se encontraron en un rango inferior a los 100 ppm, lo que implicó una corrosión moderada, sin embargo, existen picos que sobrepasan los 200 ppm hasta llegar a 600 ppm, al sobrepasar los 100 ppm se obtiene una corrosión severa. La temperatura se encontró en condiciones normales de operación, que implican baja corrosión. El contenido de calcio se mantuvo dentro de un rango moderado de dureza. El pH fluctuó entre 6 a 8, para los valores en un rango de 6 a 7 se tiene una corrosión moderada, mientras que aquellos rangos que sobrepasan a 7 se presenta una corrosión baja.

En la figura 3.6 durante el año 2022 la alcalinidad se encontró hasta los 50 mg/L, valores que en general son adecuados, sin embargo, al observar el comportamiento del pH desde los meses de enero a mayo, y en ciertos lapsos de los otros meses con un valor inferior a 7, implicó la presencia de agua corrosiva. Los sólidos disueltos en su mayoría se encontraron en un rango inferior a los 100 ppm, lo que implica una corrosión moderada, sin embargo, existen picos que

sobrepasan los 200 ppm hasta llegar a 400 ppm, estos valores son indicativos de una corrosión severa. La temperatura se encontró en condiciones normales de operación, que implican baja corrosión. El contenido de calcio estuvo dentro de un rango suave de dureza. El pH fluctuó entre 6 a 8, para los valores en un rango de 6 a 7 se tiene una corrosión moderada, mientras que aquellos rangos que sobrepasan a 7 se presenta una corrosión baja.

3.2 Resultados de la inspección visual

En la tabla 3.1 se presentan las características técnicas de las piezas estudiadas.

Tabla 3.1 Características técnicas de las tuberías en estudio

Descripción	Pieza	
	Carrete	Codo
Sector	JM001	CE002
Nº de piezas (tuberías)	2	1
Material	Acero al carbono	Acero al carbono
Espesor	4 mm	8 mm
Sistema de flujo	<i>Por gravedad</i>	<i>Por gravedad</i>
Revestimiento interno	Desconocido	Desconocido
Año de instalación	1998	1990
Tiempo de uso	1998-2023	1990-2023
Motivo de desahucio	Reporte de fugas, perforaciones agravantes.	Repotenciación del sistema de tuberías.

Las tres piezas corresponden a aceros de bajo carbono, del cual se desconoce la calidad, debido a que esta información no se encontraba en los datos históricos que mantiene la empresa. Dos piezas metálicas corresponden a carretes o tramos de tuberías de acero con costura que se encontraban en paralelo, mientras que la otra pieza corresponde a un codo sin costura de 45°.

En la figura 3.7 se observan las piezas que fueron evaluadas con el método. Los carretes se dividieron en 4 tramos, el tramo T1-T4 corresponde a un carrete, mientras que el tramo T2-T3 corresponde al otro carrete. Todas las tuberías presentaban signos de corrosión interna, sin

embargo, los carretes fueron los que mostraron signos más evidentes de corrosión, al encontrarse perforaciones de diversos tamaños a lo largo de su longitud; el codo como tal no presentó perforaciones externas.



Figura 3.7 Superficie externa de las piezas en estudio

Las incrustaciones encontradas en las piezas mostraron diversas características en color, forma y tamaño, así como en la adherencia que tomaban sobre ciertas superficies internas de las tuberías.

En la figura 3.8 se observa la superficie interna del codo, en el cual podemos observar una capa negra, con incrustaciones naranjas sobre algunas zonas de la superficie y, de forma más desproporcionada, y en menor cantidad la presencia de incrustaciones blancas. Estas características propician que existen diversos tipos de componentes químicos en la incrustación, asociando los colores naranjas a la presencia de óxidos de hierro, las zonas blancas a la presencia de calcio o calcita y las zonas negras a la posible presencia de sulfatos o sulfuros [6].



Figura 3.8 Superficie interna del codo

Así mismo, durante la inspección del codo se observó que existían zonas donde el recubrimiento, que correspondía a una pintura blanca de naturaleza desconocida, no estaba completamente adherido, tal como lo muestra la figura 3.9. Al momento de realizar el raspado para la obtención de muestras de incrustaciones este salía fácilmente, dejando a simple vista la superficie metálica. Motivo por el cual, se deduce que existía un error en la aplicación del recubrimiento, tanto en el tipo que debe cubrir internamente estas superficies como en el procedimiento que debe cumplir.



Figura 3.9 Superficie interna del codo

En la figura 3.10 se observan el estado de las superficies internas de todos los tramos del carrete, se puede observar la presencia de incrustaciones con diversos colores, formas, tamaños y la presencia de picaduras.

Los colores representativos fueron los mismos que los encontrados en el codo, zonas naranjas, negras y blancas. El tamaño de las incrustaciones cambió en comparación al codo, dado que en los carretes se observaron incrustaciones de mayor volumen y tamaño. En el carrete T1 y T3 se observó un menor volumen de incrustaciones, y en menor cantidad zonas negras, especialmente en el T3 mayores zonas naranjas con poco volumen de incrustaciones negras. En T2 y T4 se observó una alta presencia de zonas negras con incrustaciones voluminosas.

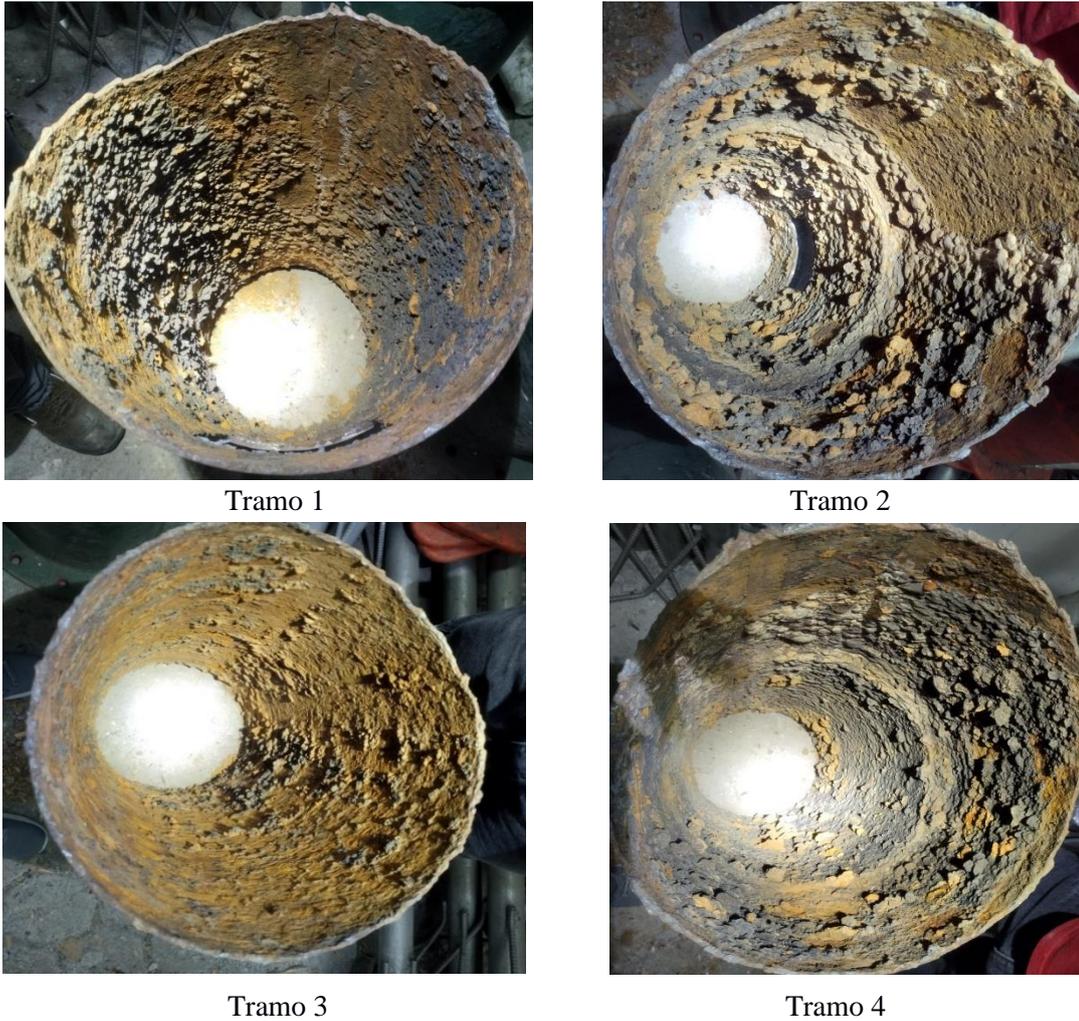


Figura 3.10 Superficie interna de los carretes

La diferencia de volumen de incrustaciones en las superficies internas que probablemente se asocian al flujo de agua, y sedimentación y arrastre de las partículas en su superficie [6]. Además, se observó que en aquellas zonas más voluminosas existía una mayor cantidad de perforaciones, la picadura que comenzaba internamente sobre la incrustación llegaba hasta la superficie externa, tal como se observa en la figura 3.11.



Figura 3.11 Superficie donde se observa perforación de la incrustación

En la figura 3.12 se presentan las diversas morfologías de las capas de incrustación presentes en el acero, como tal no existe una única forma, dado que el mecanismo de formación de estas capas dada su interacción con el agua es complejo [27].

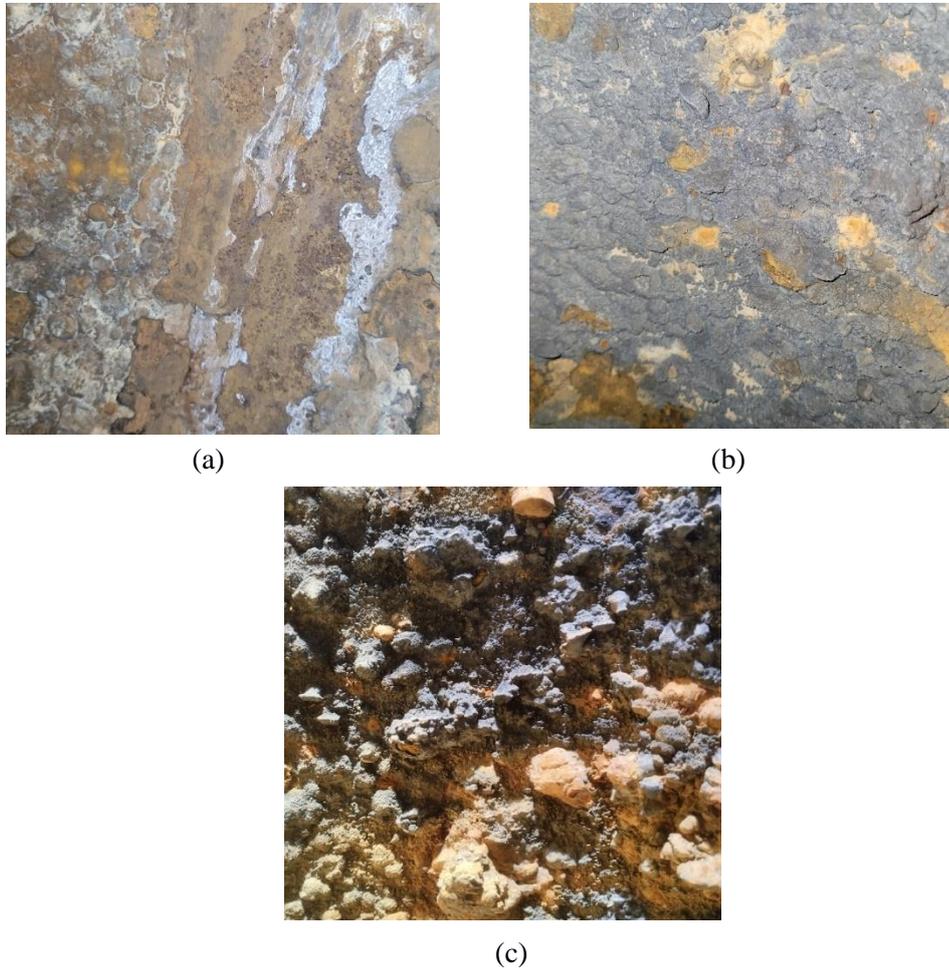


Figura 3.12 Incrustaciones encontradas en la superficie interna

3.3 Resultados de la evaluación de las incrustaciones

Los resultados de la evaluación de las incrustaciones internas realizadas por medio de difracción de rayos X en muestras obtenidas de las tuberías son presentadas a continuación.

En la figura 3.13 se presentan en forma general los resultados cuantitativos de todas las muestras, con los respectivos porcentajes de las fases encontradas en la difracción de rayos X.

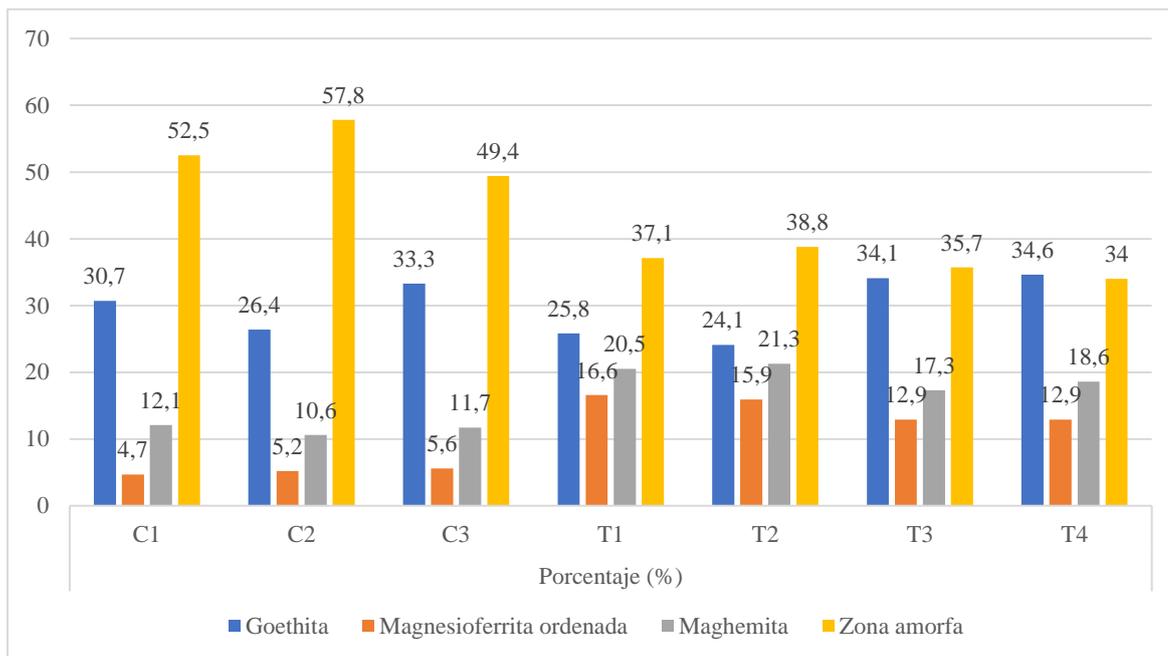


Figura 3.13 Resultados generales de DRX

Tal como se observa, las incrustaciones caracterizadas contenían fases cristalinas de goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), magnesioferrita (MgFe_2O_4) y maghemita (Fe_2O_3). Se puede observar que las incrustaciones internas principalmente existen en estado amorfo.

La proporción de los componentes de hierro en las muestras del codo y carrete son relativamente uniformes, la goethita es la fase cristalina prominente para todas las muestras, seguida de la maghemita y finalmente de la magnesioferrita. Para el caso de las muestras T3 y T4, la goethita está en mayor proporción porcentual que en las muestras T1 y T2.

La mayoría de las incrustaciones que contienen hierro son productos de corrosión, presentes en dos estados de oxidación, ferroso (Fe^{2+}) y ferrico (Fe^{3+}). La presencia de maghemita u óxido férrico (Fe_2O_3) indica la reacción del oxígeno con el hierro, en el cual también se puede formar hidróxido ferroso $\text{Fe}(\text{OH})_2$ e hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$ [28]. En un ambiente de tuberías de agua potable, la maghemita podría formarse a medida que las condiciones cambian, como la temperatura o la composición química del agua, además de la deshidratación de la goethita [3].

La goethita $\text{FeO}(\text{OH})$ tiende a formarse por la exposición constante del acero al agua, siendo un óxido de hierro bastante común que se produce a lo largo del tiempo.

La presencia de magnesioferrita evidencia que existan iones de Mg^{+} presentes en el agua, los cuales luego reaccionan y forman incrustaciones. Las concentraciones de magnesio en el agua potable podrían reaccionar con el hierro de las tuberías, dando lugar a la formación de magnesioferrita [29].

Las zonas amorfas son áreas en los patrones de difracción donde no se observan picos nítidos. Estas áreas pueden indicar la presencia de fases no cristalinas o desordenadas. En el contexto de las tuberías, estas zonas amorfas podrían ser el resultado de precipitación rápida o condiciones variables en el entorno de las tuberías, que no permitieron la formación de cristales ordenados.

Con estos resultados, se confirma la presencia de Fe, O, H y Mg, que resultan de diversas reacciones químicas donde se involucran componentes del agua y las condiciones mismas de las tuberías.

La caracterización de las incrustaciones por medio del análisis químico se realizó a diversas morfologías encontradas en los tramos de tuberías, siendo muestras representativas de las incrustaciones tal como se muestra en la 3.14. Con el fin de corroborar el componente químico presente. En este caso como se mencionó anteriormente, a cada color de incrustación se le relaciona un elemento característico.

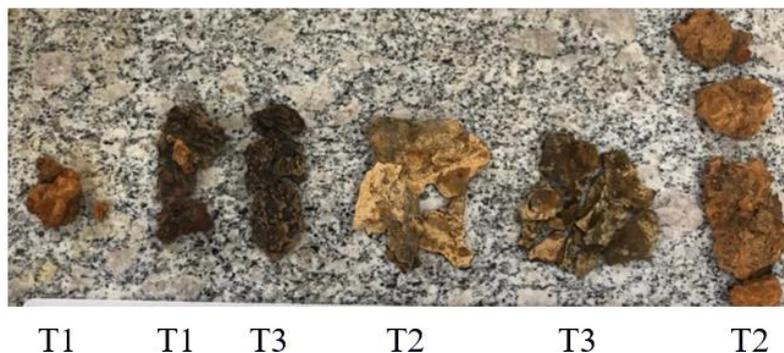


Figura 3.14 Incrustaciones para el análisis químico

Del análisis químico realizado al conjunto de todas las incrustaciones se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Resultados de análisis químico

Parámetro	Unidad	Resultado
Calcio (Ca)	%	0.080
Magnesio (Mg)		<0.007
Carbonatos		0.207
Azufre		4.589

El porcentaje de Ca fue de 0.080%, dicho valor se infiere que es representativo de la muestra T2, donde se observan partes blancas; el de Mg inferior a 0.007%, los carbonatos en un 0.207% y azufre en un 4.589%, valor probablemente representativo de las zonas negras. Los porcentajes encontrados fueron menores a los esperados, dado que el Ca, Mg y Carbonatos se encuentran en menos del 1% de la muestra. Se confirma la presencia de azufre en las incrustaciones, elemento corrosivo para las superficies metálicas de las tuberías.

3.4 Resultados de la evaluación de las superficies metálicas

En la figura 3.15 se muestra la sección del codo seleccionada para la evaluación macrográfica del mismo.



Figura 3.15 Probetas del codo

En las macrografías del codo presentes en la figura 3.16 se pudo observar las zonas naranjas y negras, además de ciertas zonas donde se encuentra el metal al desnudo; no se

evidencia rastro de recubrimiento interno. Por tanto, se infiere que el proceso de corrosión ha desgastado por completo el material. Así mismo, comienza la aparición de hoyuelos, relacionándose directamente a la formación de las picaduras.



P1

P2

Figura 3.16 Macrografías de las probetas del codo

Las probetas de T2 de la figura 3.17 muestran inicio de picaduras, especialmente P2, encima de las incrustaciones negras se observan incrustaciones blancas.



Figura 3.17 Probetas de T2

Las macrografías de la imagen 3.18, muestran claramente las zonas donde comienza la formación de la picadura. En P1, algunos hoyuelos están rodeados por las incrustaciones negras, mientras que en P2 se observa un inicio de picadura bastante amplio donde se comienza a apreciar el metal al desnudo. Todos los tramos de carrete presentaban estas zonas características, con mayor o menor proporción de zonas negras o naranjas.

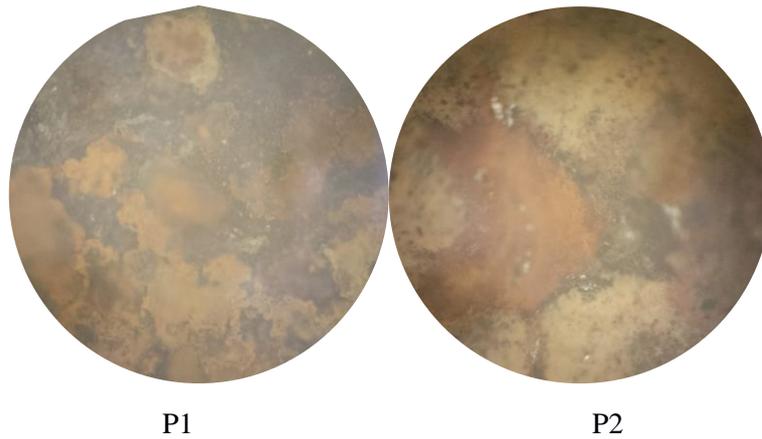


Figura 3.18 Macrografías de las probetas de T2

3.5 Resultados de la estimación de la tasa de corrosión

En la tabla 3.4 se presentan los resultados encontrados en la estimación de la tasa de corrosión, mediante el uso de la fórmula 2.1.

Tabla 3.4 Tasas de corrosión estimadas

Muestra	Espesor original (mm)	Espesor final (mm)	Diferencia de espesores (mm)	Tiempo inicial (año)	Tiempo final (año)	Diferencia de tiempos (año)	Velocidad de corrosión (mm/año)
Codo	8 mm	7.443	0.557	1990	2023	33	0.016
T1	4 mm	3.243	0.757	1998	2023	25	0.030
T2	4 mm	3.543	0.457	1998	2023	25	0.018
T3	4 mm	3.500	0.5	1998	2023	25	0.020
T4	4 mm	3.457	0.543	1998	2023	25	0.021

Las velocidades de corrosión estimadas fueron calculadas considerando las zonas uniformes de las placas en estudio, por ende, el valor calculado infiere sobre este tipo de zonas en las tuberías y no sobre las zonas picadas que presentan las muestras. En la tabla 3.4 se muestran los valores estimados de la velocidad de corrosión, donde estos valores se encuentran

dentro de un rango de corrosión óptima según la tabla 3.5 para las tasas de corrosión calculadas en aleaciones de hierro.

Tabla 3.5 Detalle de la resistencia a la corrosión [30]

Resistencia a la corrosión	Tasa de corrosión (mm/año)
Sobresaliente	<0.02
Excelente	0.02-0.1
Bueno	0.1-0.5
Normal	0.5-1
Pobre	1-5
Inaceptable	5+

Por ende, estas velocidades de corrosión no indican agresividad sobre la corrosión uniforme del material y, tal como se observan en las muestras, se estima que las zonas picadas poseen una tasa de corrosión agravante dada la presencia de perforaciones sobre ciertas zonas de la superficie metálica que actúan galvánicamente. De modo que, esta corrosión por picaduras se puede asociar al oxígeno disuelto o la naturaleza de ciertos depósitos incrustados en la superficie [29].

Según el tiempo de uso de las tuberías, se encuentran dentro del rango de vida útil, sin embargo, al presenciar las superficies internas, se pudo evidenciar que no cumplieron su tiempo de vida útil estimado. El codo cumplió con un tiempo de vida de 33 años, mientras que los carretes cumplieron con un tiempo de vida de 25 años, tiempo de que esta dentro de su vida útil, lo cual corresponde entre 20 y 40 años [31]. No obstante, dada la calidad de superficie interna y externa con la que fueron encontradas las piezas se aprecia que este tiempo de vida útil disminuyó al que se encontraba previsto al momento de su instalación.

3.6 Análisis de costos

Con la finalidad de estimar si la solución planteada ante los daños de corrosión interna en tuberías de agua potable se puede proponer como un modelo de evaluación factible a seguir dentro de la empresa en estudio, se realizó un análisis de costos. Por lo cual los costos relacionados al tipo de evaluación son los siguientes.

Como costos fijos para el modelo de evaluación se consideraron los siguientes aspectos, costos de ensayos de laboratorio, donde se consideran los diagnósticos realizados en los ensayos de caracterización; costos de personal, salarios y beneficios económicos del equipo de investigación, ingenieros, técnicos y expertos en corrosión que pueda solicitar la empresa; costos de investigación, donde se consideran los valores generados por la revisión de bibliografías y fuentes oficiales, recopilación de información técnica y las normas que considere el método de evaluación; costos de capacitación, relacionados a los costos de formación para el personal en el uso de equipos y el método específico de evaluación; costos de mantenimiento, relacionados al funcionamiento y calibración regular de los equipos necesarios.

Como costos variables, se consideraron materiales e insumos, usados para la recolección y procesamiento de muestras e insumos necesarios para la evaluación; costo de operación de inactividad de las tuberías, costo relacionado al tiempo que las tuberías permanecen fuera de servicio; costos de logística y transporte, relacionados a los costos necesarios para la movilización en recolección de muestras y diagnóstico de tuberías.

Los costos mencionados anteriormente sirven como una prospección de la realidad de la implementación del método evaluativo dentro de la empresa. Los costos fijos y variables generados durante el proyecto se presentan en las tablas 3.6 y 3.7 respectivamente.

Tabla 3.6 Costos fijos

Descripción	Cantidad	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)
Ensayos de laboratorio			1,344
Difracción de rayos X IVA 12%	7 muestras	150 126	1,176
Análisis químico	1 muestra		168
Ca		35	
Mg		35	
Carbonato		30	
Sulfato IVA 12%		50 18	
Salario Trabajadores	2	800	1600
Total costos fijos			2,944

Tabla 3.7 Costos variables

Descripción	Cantidad	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)
Materiales e insumos			283.85
Empaques zip zap	1	4.5	4.5
Espátula	1	1.5	1.5
Guantes	3	5	15
Mascarillas	3	2.5	7.5
Gafas	1	8.6	8.6
Amoladora	1	125	125
Disco de corte	1	2.5	2.5
Papel Lijas	5	1.95	9.75
Solución de Nital	1	29.5	29.5
Alúmina	1	25	25
Costos de inactividad	2 horas	2,500	5,000
Costos de remplazo	1 codo	3,000	9,000
	1 tramo	6,000	
Total costos variables			14,283.85

3.7 Viabilidad económica

La viabilidad económica de un proyecto enfocado en la evaluación de daños por corrosión interna en tuberías de agua potable implica analizar si los beneficios que se pueden generar en el proyecto como ahorro en reparaciones y mantenimiento, reducción de la pérdida del agua, la disminución de tiempo en las inactividades de las tuberías y el remplazo de las

tuberías dañadas, superarán los costos asociados en la implementación de la evaluación. Se estima que el beneficio anual ronda los \$21,000, que son expuestos en la tabla 3.8. Dicho valor implica el costo de las tuberías de distribución de agua potable, siendo el activo más costoso que maneja la empresa, y los demás gastos operativos que se muestran en la tabla 3.8.

Tabla 3.8 Detalle de los beneficios anuales

Beneficios anuales	Valor (\$)
Tiempo de inactividad	5,000
Reemplazo de tuberías dañadas 2 Carretes y 1 Codo	15,000
Ahorro en reparación y mantenimiento	1,000
Total beneficios	21,000

El estudio será proyectado para 5 años. Los costos fijos y variables calculados corresponderán a la inversión inicial o “flujo 0” del proyecto para que este se pueda poner en marcha, el cual corresponde a \$17,227.85.

Dentro de los 5 años proyectados se consideraron los flujos de efectivo correspondiente a la diferencia entre los beneficios potenciales anuales y los costos anuales. En la tabla 3.9 se presentan las estimaciones correspondientes a cada año; se considera un aumento del 10% en los costos por cada año y un aumento del 15% anual en beneficios de ahorro [32].

Tabla 3.9 Flujo de caja anual

Flujo de caja	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos (Beneficios anuales)		21,000.00	24,150.00	27,772.50	31,938.38	36,729.13
Egresos (Total costos)		17,227.85	18,950.64	20,845.70	22,930.27	25,223.30
Inversión Inicial	17,227.85					
Flujo neto	-17,227.85	3,772.15	5,199.37	6,926.80	9,008.11	11,505.84

En la tabla 3.10 se presentan los valores del flujo neto. La tasa de descuento utilizada para esta evaluación fue del 10%, que se encuentra dentro del rango entre el 8% y 12% de las tasas de interés de préstamos bancarios en el Ecuador.

Tabla 3.10 Parámetros de viabilidad económica

Flujo	Valor
Inversión Inicial	-17,227.85
Flujo 1	3,772.15
Flujo 2	5,199.37
Flujo 3	6,926.80
Flujo 4	9,008.11
Flujo 5	11,505.84
Tasa de descuento (K)	10%
Valor Actual Neto (VAN)	\$8,999.46
Tasa Interna de Retorno (TIR)	25.29%

Se observa una TIR positiva con un 25.29% de retorno, valor factible para la implementación del proyecto. Con una inversión inicial de \$17,227.85 desde el año 1 se comienzan a generar beneficios o ahorros, que van en aumento tal como se observa hasta el quinto año. Se debe tener en cuenta que los costos consideraron el remplazo de las tuberías, siendo un factor económico bastante alto debido a que corresponden a activos costosos y el tiempo de vida útil al que está diseñado.

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

El método de evaluación para las tuberías de agua potable ha permitido deducir las posibles causas relacionados a los daños encontrados en las tuberías. Este diseño de evaluación consistió en la selección de variables o parámetros que delimitan el estudio de los efectos dañinos, toma de muestras y ensayos de laboratorio, realizando un análisis posterior que permitió relacionar los resultados encontrados para llegar a las siguientes conclusiones:

- Las variables de estudio seleccionadas para el diseño metodológico de evaluación por daños de corrosión interna fueron revisadas bibliográficamente en diversos estudios de corrosión en sistemas de distribución de agua potable, en el cual se incurrió a información sobre los parámetros de calidad del agua, dado que existe una correlación con los efectos corrosivos sobre las tuberías metálicas. Basándose en los resultados de este estudio, se encontró que el agua potable indica un índice de Langelier negativo, valor corrosivo que tiende a la disolución de carbonatos de calcio en todos los años presentados. Por tanto, se asume que, durante el tiempo de análisis de este modelo corrosivo, no existía una alta probabilidad de precipitación de estos carbonatos, de modo que no se puede atribuir totalmente que el mecanismo de formación de las incrustaciones ocurra por la presencia de Carbonatos. Además, se observaron rangos de tiempo en el comportamiento de los sólidos disueltos que presentan corrosión severa, sobrepasando las 200 ppm, estos rangos implican que la presencia de ciertos iones como Na^+ , Mg^{2+} , Ca^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- está causando una corrosión sobre el material, debido a que las altas concentraciones de sólidos disueltos aumentan la capacidad del agua para completar el circuito electroquímico y conducir una corriente corrosiva.
- Los recubrimientos internos de la superficie metálica se encontraron en mal estado en la superficie del codo y sin rastro de este material en los carretes. Al presenciar este tipo de

situación, es evidente que el agua entra en contacto directamente con la superficie metálica de la tubería, y el oxígeno actúa como oxidante. Por tanto, es muy probable que se hayan presentado productos de corrosión que se liberaron en el agua y formaron incrustaciones sobre la pared de la tubería debido a los daños del recubrimiento.

- La caracterización de incrustaciones indicó la presencia de un alto contenido de compuestos de hierro cristalinos, esto se relaciona con una severa corrosión que implican estos elementos sobre la superficie metálica. La goethita es la fase cristalina que en mayor proporción se presentó en los resultados, se considera el compuesto menos protector del hierro, volviendo a las incrustaciones más densas y estables, en comparación a los otros compuestos del hierro encontrados. Por tanto, el mayor efecto corrosivo sobre la superficie es atribuida este compuesto. Además, se encontraron zonas amorfas que implicó una precipitación rápida de estos compuestos o que las condiciones del entorno fueron tan variables que no permitió la formación de cristales ordenados.
- La tasa de corrosión estimada en las muestras de las placas metálicas presento valores entre 0.016 y 0.030 (mm/año), que se encuentran dentro de un rango eficiente de resistencia a la corrosión sobre zonas uniformes del material, es decir, esta tasa de corrosión encontrada no debería implicar efectos corrosivos agravante sobre el material. No obstante, con las observaciones realizadas sobre la superficie, evidentemente se encontraron daños severos de corrosión no uniforme ya que provocaban fugas o perforaciones sobre las tuberías. La corrosión por picadura según observaciones es severa sobre la superficie implicando reacciones electroquímicas localizadas en un solo punto de la zona donde comienza la pérdida del material, dada la presencia de ciertos componentes altamente corrosivos, entre ellos se infiere a la presencia de la goethita. Además, la corrosión por picaduras debido a los resultados encontrados de altas concentraciones de sólidos disueltos del agua se puede ver influenciada por la corrosión microbiológica, los

cuales se aprovechan de los nutrientes disponibles en el agua, y aceleran el proceso de corrosión por picaduras.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda para la evaluación de los daños por corrosión interna la implementación de un proyecto multidisciplinario donde se estudie la calidad del agua potable a lo largo del sistema de distribución y se implemente el método de cupones con la finalidad de estudiar el comportamiento corrosivo e incrustante del agua y de los materiales seleccionados en las tuberías metálicas de las redes distribución de agua potable. Además, de obtener una visión más amplia de las condiciones o parámetros a considerar para el tratamiento de agua potable a futuro.
- Realizar una investigación más exhaustiva sobre los efectos corrosivos en los recubrimientos internos aprobados y utilizados por la empresa, debido a la variabilidad que tiene la química del agua sobre estos materiales. La naturaleza compleja del agua que es captada por la empresa en estudio, sobre todo en ciertas épocas del año, debe ser puesta a prueba con diversos sistemas de recubrimiento, de tal modo que se pueda observar el mejor comportamiento anticorrosivo y poco incrustante, ya que según los resultados obtenidos las superficies metálicas con capas de incrustaciones presentaban daños sobre todo el recubrimiento.
- La empresa en estudio debe monitorear regularmente las tasas de corrosión para establecer los cambios en la corrosividad y poder implementar y ajustar un inhibidor de corrosión. El uso de una sonda de resistencia a la polarización lineal ubicada en el punto de entrada del agua, a la salida de un acueducto y en un sitio del sistema de distribución sería útil para lograr medir los cambios que se presentan en el proceso de corrosión con el tiempo. Principalmente, por que el fenómeno de corrosión en las tuberías se presenta de

forma no localizada y existe una variabilidad de los parámetros de calidad del agua potable.

Referencias

- [1] J. F. Rios, J. A. Calderón, F. Echeverría, and G. Peñuela, “Diseño de un sistema piloto para el estudio de la corrosión del material de tubería y su contribución en el deterioro de la calidad del agua potable,” *Rev. Fac. Ing.*, no. 43, pp. 102–113, 2008.
- [2] E. Ress and A. Roberson, “The Financial and Policy Implications of Water Loss (In Press),” *J. Am. Water Works Assoc.*, vol. 108, Feb. 2016, doi: 10.5942/jawwa.2016.108.0026.
- [3] G. Bombara and U. Bernabai, “Internal corrosion of steel piping in water mains,” *Anti-Corrosion Methods Mater.*, vol. 28, no. 5, pp. 10–13, 1981, doi: 10.1108/eb010192.
- [4] J. A. Salazar, “Introduction to Corrosion Phenomena: Types, Influencing Factors and Control for Material’s Protection,” *Tecnol. en Marcha*, vol. 28, no. 3, p. 10, 2015, [Online]. Available: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v28n3/0379-3982-tem-28-03-00127.pdf>.
- [5] G. Koch, J. Varney, N. Thompson, O. Moghissi, M. Gould, and J. Payer, “International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study,” 2016.
- [6] C. P. Hill and A. F. Cantor, *Internal Corrosion Control in Water Distribution Systems*, First., no. 11. American Water Works Association, 2011.
- [7] M. R. Nogueira Vilanova, P. M. Filho, and J. A. Perrella Balestieri, “Performance measurement and indicators for water supply management: Review and international cases,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, pp. 1–12, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.11.043.
- [8] Diario Primicias, “Ecuador pierde USD 320 millones al año por fugas y robo de agua potable.” pp. 1–3, 2021, [Online]. Available: <https://bityl.co/EdDf>.
- [9] R. Valle, “Estudio sobre el impacto de la corrosión en los sistemas de distribución de agua potable,” no. December, 2019.
- [10] TOMO I, “AJUSTE Y REVISIÓN DEL PLAN MAESTRO AGUA POTABLE; ALCANTARILLADO SANITARIO,” 2010.
- [11] S. Brossia, *Corrosion of pipes in drinking water systems*, Third Edit. Elsevier Inc., 2018.
- [12] S. Tan and F. Bernardi, “Corrosion of water and sewer pipes.” pp. 1–13, 2016.
- [13] N. H. Omer, “Water Quality Parameters,” in *Water Quality*, K. Summers, Ed. Rijeka: IntechOpen, 2019.

- [14] A. Pauta and D. Quezada, “Determinación de la tendencia corrosiva e incrustante del agua potable distribuida en la ciudad de Azogues,” p. 48, 2017, [Online]. Available: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/26993/1/Tesis.pdf>.
- [15] R. Vera, “Evaluación de tres tipos de tuberías usadas en tratamientos magnéticos para reducción de concentraciones de calcio y magnesio en aguas duras.,” *Esc. Super. Politécnica Agropecu. Manabí*, p. 100, 2018.
- [16] E. Gómez and J. Serna, “Gestión y Control de Corrosión en Sistemas de agua de inyección,” *Univ. Pedagógica y Tecnológica Colomb.*, vol. 21, no. 1, p. 79, 2020, [Online]. Available: <http://repository.radenintan.ac.id/11375/1/PERPUSPUSAT.pdf%0Ahttp://business-law.binus.ac.id/2015/10/08/pariwisata-syariah/%0Ahttps://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results%0Ahttps://journal.uir.ac.id/index.php/kiat/article/view/8839>.
- [17] N. Tavanpour, M. Noshadi, and N. Tavanpour, “Scale Formation and Corrosion of Drinking Water Pipes: A Case Study of Drinking Water Distribution System of Shiraz City,” *Mod. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 3, p. 166, 2016, doi: 10.5539/mas.v10n3p166.
- [18] P. Sarin *et al.*, “Iron release from corroded iron pipes in drinking water distribution systems: Effect of dissolved oxygen,” *Water Res.*, vol. 38, pp. 1259–1269, Apr. 2004, doi: 10.1016/j.watres.2003.11.022.
- [19] E. Septe, N. Jalinus, and Refdinal, “A Novel of Internal Corrosion Assessment Methods on Drinking Water Distribution Pipelines,” *MATEC Web Conf.*, vol. 248, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201824805008.
- [20] W. Olarte and M. Botero, “La detección de ultrasonido: una técnica empleada en el mantenimiento predictivo,” *Sci. Tech.*, vol. 47, pp. 230–233, 2011, [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84921327035>.
- [21] “What is Ultrasonic Corrosion Monitoring?,” *Corrosionpedia*, 2018. <https://www.corrosionpedia.com/definition/6413/ultrasonic-corrosion-monitoring>.
- [22] INEN, “Agua Potable. Requisitos. Nte Inen 1108,” *Inst. Ecuatoriano Norm.*, no. 5, pp. 1–10, 2014, [Online]. Available: <http://normaspdf.inen.gob.ec/pdf/nte/1108-5.pdf>.
- [23] M. Yousefi, H. N. Saleh, A. H. Mahvi, M. Alimohammadi, R. Nabizadeh, and A. A. Mohammadi, “Data on corrosion and scaling potential of drinking water resources using stability indices in Jolfa, East Azerbaijan, Iran,” *Data Br.*, vol. 16, pp. 724–731, 2018, doi: 10.1016/j.dib.2017.11.099.
- [24] E. Pérez-lópez and E. C. De, “Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica,” vol. 29, pp. 3–14, 2016.

- [25] V. Gallardo, “Inspección y Diagnostico.” 2019.
- [26] C. Y. Peng, G. V Korshin, R. L. Valentine, A. S. Hill, M. J. Friedman, and S. H. Reiber, “Characterization of elemental and structural composition of corrosion scales and deposits formed in drinking water distribution systems.,” *Water Res.*, vol. 44 15, pp. 4570–4580, 2010.
- [27] H. Tong, X. Hu, P. Zhao, H. Zhang, and Y. Tian, “Iron corrosion in occluded water in drinking water distribution systems,” *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 14, no. 11, pp. 10213–10226, 2019, doi: 10.20964/2019.11.18.
- [28] I. Abubaker, I. Ali, F. Ali, and F. Ali, “Corrosion Strategy in Oil Field System,” *J. Chem. Rev.*, vol. 2, no. 1, pp. 28–39, 2020, doi: 10.33945/sami/jcr.2020.1.2.
- [29] Z. Tang, S. Hong, W. Xiao, and J. Taylor, “Characteristics of iron corrosion scales established under blending of ground, surface, and saline waters and their impacts on iron release in the pipe distribution system,” *Corros. Sci.*, vol. 48, pp. 322–342, Feb. 2006, doi: 10.1016/j.corsci.2005.02.005.
- [30] J. Denny, *Principles and prevention of corrosion*. 1996.
- [31] C. Xalapa, “Manual para el diseño de sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario.”
- [32] C. C. Y. Auditoría, *Propuesta de un sistema de costeo para la Empresa Municipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Gualaceo EMAPAS-G EP.* .

Apéndice A

A. Ponderación de los criterios de evaluación según las alternativas de solución

Tabla A1. Ponderación del criterio Información encontrada

Información encontrada: Método de muestreo>método de cupones>método de prueba

Información encontrada	Método de muestreo	Método de cupones	Método de prueba ultrasónica	Suma+1	Ponderado
Método de muestreo		1	1	3	0,500
Método de cupones	0		1	2	0,333
Método de prueba ultrasónica	0	0		1	0,167
			suma	6	1,000

Tabla A2. Ponderación del criterio Cobertura de inspección

Cobertura de inspección: Método de prueba ultrasónica>método de cupones>método de muestreo

Cobertura de inspección	Método de muestreo	Método de cupones	Método de prueba ultrasónica	Suma+1	Ponderado
Método de muestreo		0	0	1	0,167
Método de cupones	1		0	2	0,333
Método de prueba ultrasónica	1	1		3	0,500
			suma	6	1,000

Tabla A3. Ponderación del criterio Tiempo de ensayo

Tiempo de ensayo: Método de muestreo=método de prueba ultrasónica>método de cupones

Tiempo de ensayo	Método de muestreo	Método de cupones	Método de prueba ultrasónica	Suma+1	Ponderado
Método de muestreo		0,5	1	2,5	0,417
Método de cupones	0		0	1	0,167
Método de prueba ultrasónica	0,5	1		2,5	0,417
			suma	6	1,000

Tabla A4. Ponderación del criterio Disponibilidad del equipo

Disponibilidad de equipo: Método de muestreo=método de prueba ultrasónica>método de cupones

Disponibilidad de equipo	Método de muestreo	Método de cupones	Método de prueba ultrasónica	Suma+1	Ponderado
Método de muestreo		1	0,5	2,5	0,417
Método de cupones	0		0	1	0,167
Método de prueba ultrasónica	0,5	1		2,5	0,417
			suma	6	1,000

Tabla A5. Ponderación del criterio Costo

Costo: Método de muestreo>método de cupones>método de prueba

Costo	Método de muestreo	Método de cupones	Método de prueba ultrasónica	Suma+1	Ponderado
Método de muestreo		1	1	3	0,500
Método de cupones	0		1	2	0,333
Método de prueba ultrasónica	0	0		1	0,167
			Suma	6	1,000

Apéndice B

B. Resultados obtenidos de la Difracción de rayos X

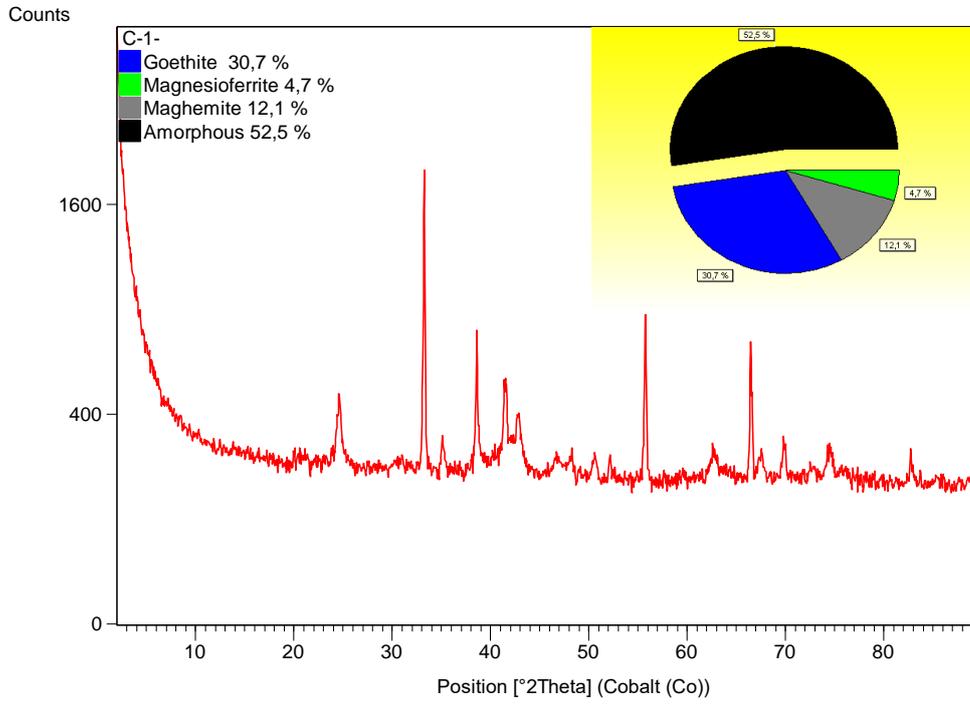


Figura B1. Difractograma de muestra C1

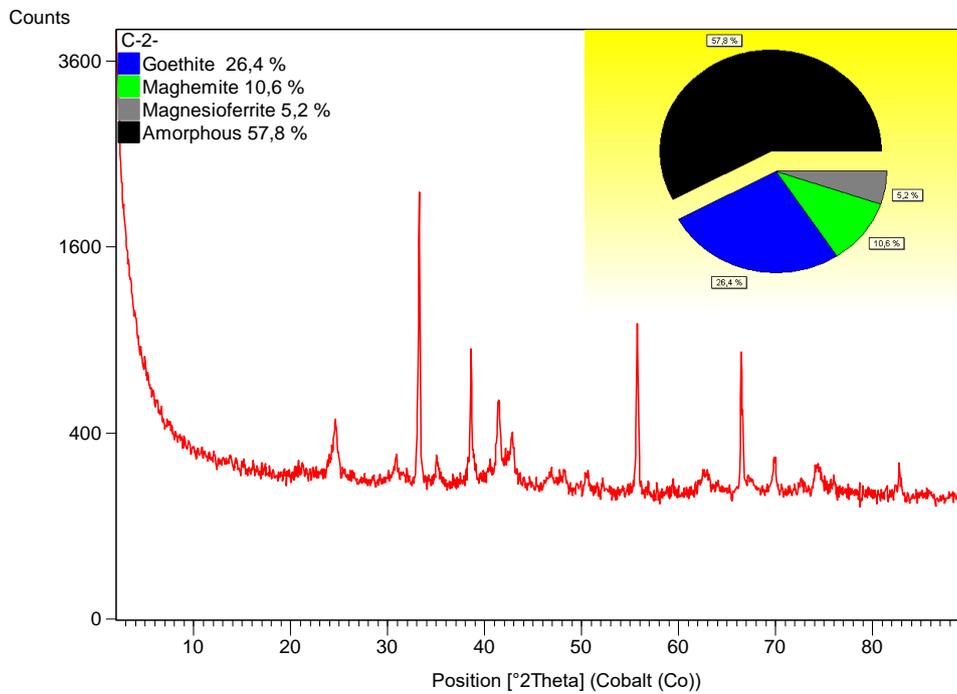


Figura B2. Difractograma de muestra C2

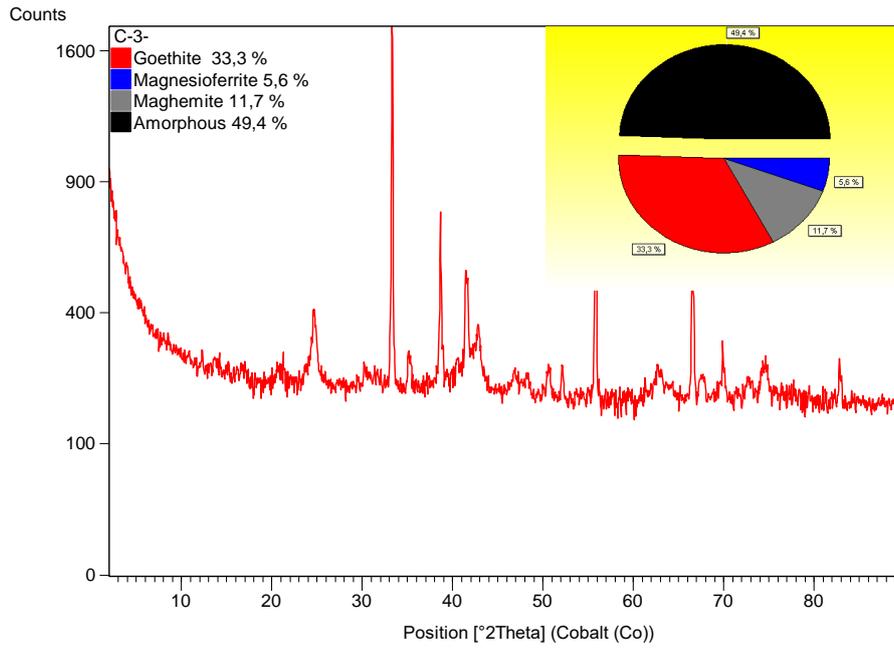


Figura B3. Difractograma de muestra C3

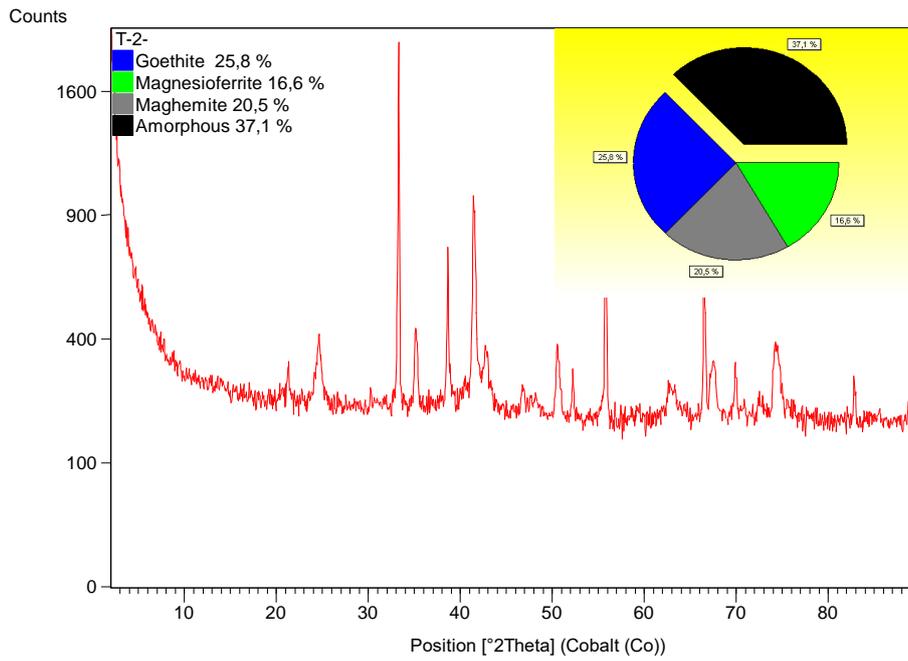


Figura B4. Difractograma de muestra T1

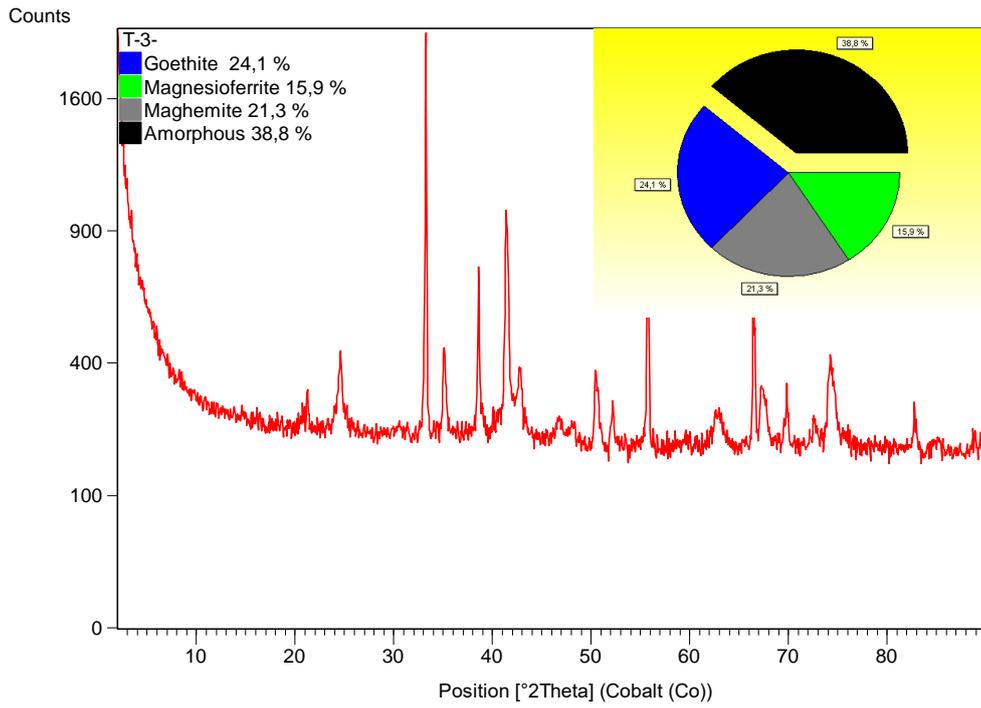


Figura B5. Difractograma de muestra T2

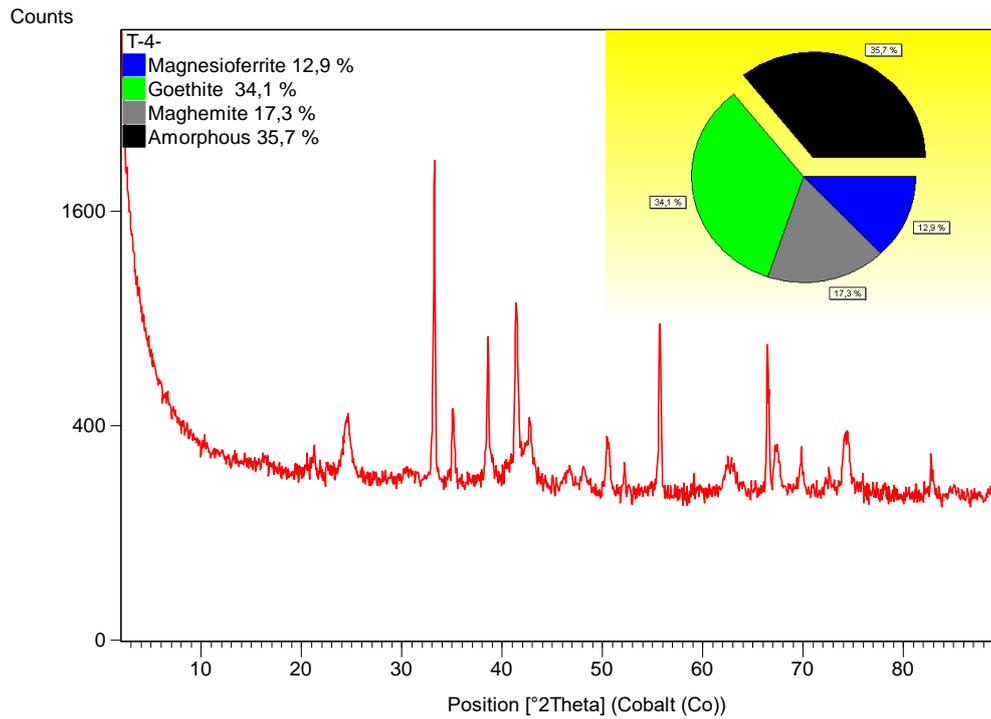


Figura B6. Difractograma de muestra T3

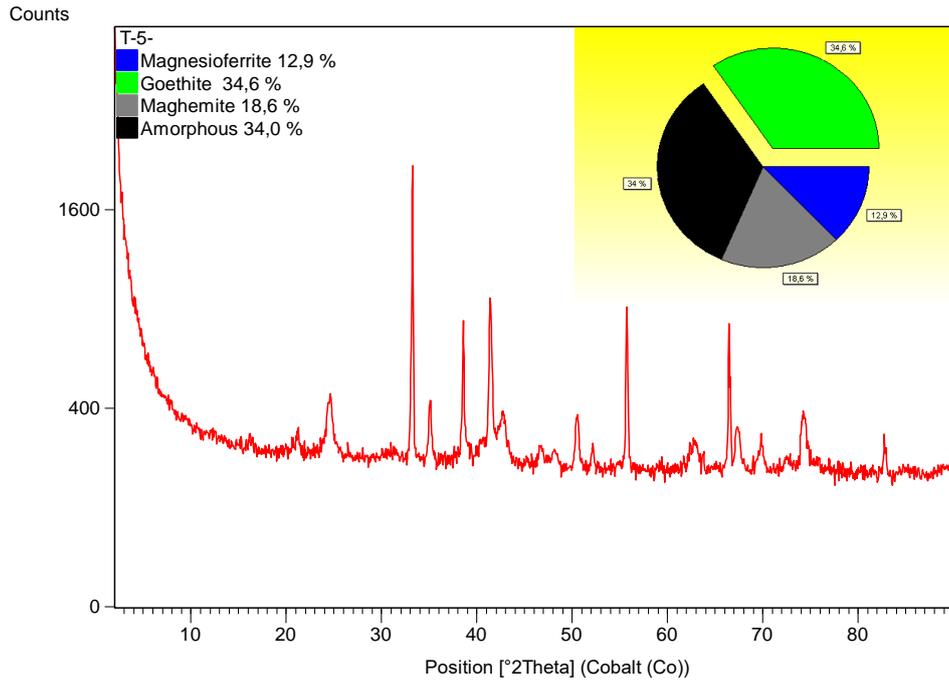


Figura B7. Difractograma de muestra T4

Apéndice C

C. Resultados de la evaluación macroscópica



Figura C1. Probetas de T1

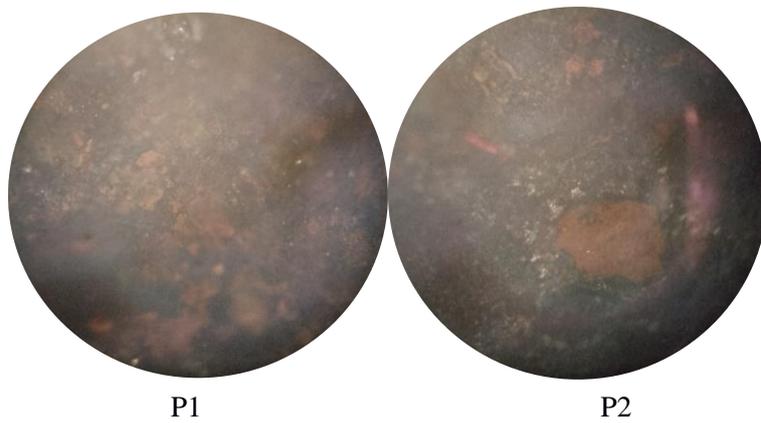


Figura C2. Macrográficas de las probetas de T1



Figura C3. Probetas de T3

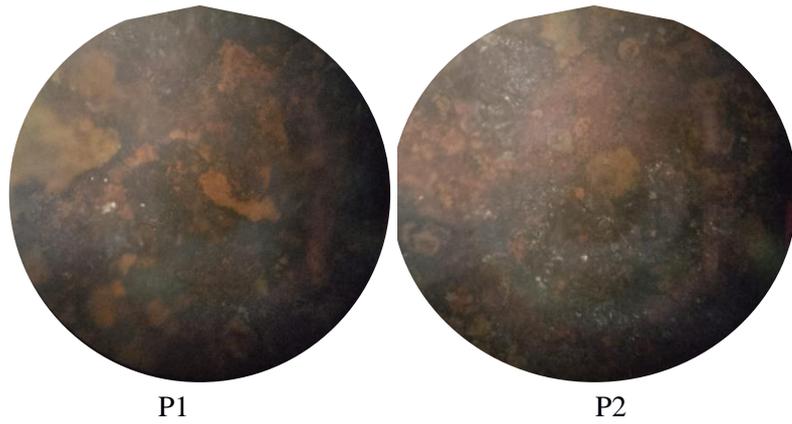


Figura C4. Macrografías de las probetas de T3



Figura C5. Probetas de T4

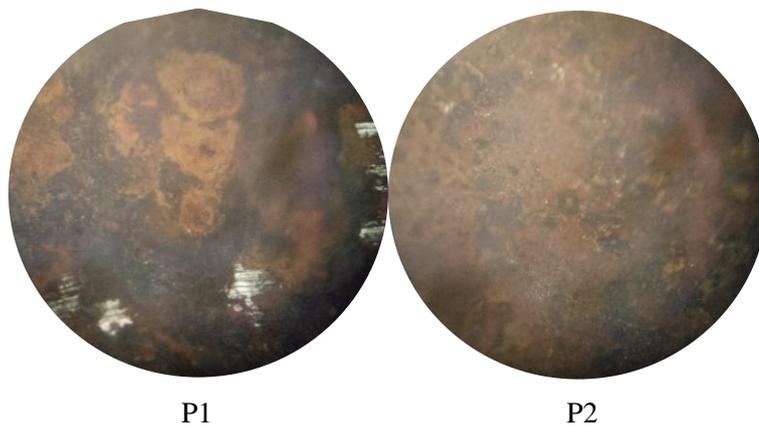


Figura C6. Macrografías de las probetas de T4