



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO  
AMBIENTE**



**TESIS**

**ESTUDIO DE LA OXIDACIÓN DE OBJETOS DE HIERRO EN EL MEDIO  
AMBIENTE DE LA CIUDAD DE PUNO**

**PRESENTADA POR:**

**GERMAN COILLO COTRADO**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**DOCTORIS SCIENTIAE EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

**PUNO, PERÚ**

**2024**



## GERMAN COILLO COTRADO

### ESTUDIO DE LA OXIDACIÓN DE OBJETOS DE HIERRO EN EL MEDIO AMBIENTE DE LA CIUDAD DE PUNO.docx

- 4.- CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE
- DOCTORADOS
- Universidad Nacional del Altiplano

#### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::8254:411751076

95 Páginas

Fecha de entrega

2 dic 2024, 11:23 a.m. GMT-5

21,085 Palabras

Fecha de descarga

2 dic 2024, 11:30 a.m. GMT-5

111,798 Caracteres

Nombre de archivo

ESTUDIO DE LA OXIDACIÓN DE OBJETOS DE HIERRO EN EL MEDIO AMBIENTE DE LA CIUDAD DE ....docx

Tamaño de archivo

11.0 MB





## 17% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 12 palabras)

### Fuentes principales

- 16% Fuentes de Internet
- 1% Publicaciones
- 6% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

#### N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un Indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Dr. Estepan Ray Chávez Gutierrez  
INGENIERO METALURGICO  
CIP. 02286





# UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

## ESCUELA DE POSGRADO

### DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

#### TESIS

#### ESTUDIO DE LA OXIDACIÓN DE OBJETOS DE HIERRO EN EL MEDIO AMBIENTE DE LA CIUDAD DE PUNO



PRESENTADA POR:

GERMAN COILLO COTRADO

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTORIS SCIENTIAE EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:

PRESIDENTE

.....  
D.Sc. AUDBERTO MILLONES CHAFLOQUE

PRIMER MIEMBRO

.....  
Dr. JUAN REYNALDO PAREDES QUISPE

SEGUNDO MIEMBRO

.....  
Dra. ERIKA BEATRIZ GARCIA CASTRO

ASESOR DE TESIS

.....  
D.Sc. ESTEBAN REY CHAVEZ GUTIERREZ

16 de mayo del 2024.

**ÁREA:** Ciencias de la ingeniería.

**TEMA:** Estudio de oxidación de objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno.

**LÍNEA:** Recursos naturales y medio ambiente.



## DEDICATORIA

**A Dios,** Por concederme la vida y la salud, quien estuvo y está conmigo en cada paso que doy, pues es quien me llena de fortaleza y fe para alcanzar todo lo que me propongo.

**A mis padres,** Isidro y Juana que se encuentran junto a Dios Todopoderoso. Por su gran ejemplo y que me inculcaron valores.

**A mi esposa María Rosa,** el amor de mi vida por ser mi principal motivación, por darme fuerzas para seguir en la realización del presente trabajo de investigación.

**A mis hijos,** por su constante apoyo incondicional, su cariño y que siempre han estado junto a mi motivándome día a día.

*German Coillo Cotrado*



## AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme conseguir este logro y avance en mi vida académica y profesional.

A la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la UNA-Puno, al Dr. Hipólito Córdova Gutiérrez que me cedió un espacio en su laboratorio de Electrometalurgia y corrosión para trabajar y por brindarme los equipos necesarios para llevar a cabo la parte experimental del presente proyecto.

Mi agradecimiento a mi asesor de Tesis Doctoral al Dr. Esteban Rey Chávez Gutiérrez por sus aportes y sus sugerencias necesarias para la conclusión de este trabajo.

A los miembros del jurado Dr. Audberto Millones Chafloque, Dr. Reynaldo Paredes Quispe, Dra. Erika B. García Castro por ilustrarme con sus conocimientos, por su paciencia, comprensión, tolerancia en la revisión del presente trabajo.

A los Doctores Sabino Atencio Limachi, Walter Zamalloa Cuba por el apoyo y sabios consejos que siempre me brindaron y que, sin duda, todo esto no hubiera sido posible.

A mi esposa María Rosa y a mis hijos Gerald, James, Gianmarco y Guadalupe por su exigencia constante y por su paciencia, que han contribuido en la culminación del trabajo de investigación para optar el grado de Doctor.

Mi tesis doctoral no hubiera sido posible sin el apoyo de muchos colegas y amigos de las diferentes Escuelas Profesionales de la Universidad Nacional del Altiplano – Puno, que han contribuido al desarrollo de este trabajo, aportando conocimientos y experiencia.

*German Coillo Cotrado*



## ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE ANEXOS	vii
ACRÓNIMOS	viii
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3

### CAPÍTULO I

#### REVISIÓN DE LITERATURA

1.1	Marco Teórico	5
	1.1.1 Propiedades químicas del hierro	6
	1.1.2 Oxidación y Reducción del hierro	7
	1.1.3 Fundamentos de la Oxidación y Corrosión	9
1.2	Antecedentes	24
	1.2.1 Internacionales	24
	1.2.2 Nacionales	32

### CAPÍTULO II

#### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1	Identificación del problema	34
2.2	Enunciados del problema	35
	2.2.1 Problema general	35
	2.2.2 Problemas específicos	35
2.3	Justificación	35
2.4	Objetivos	36
	2.4.1 Objetivo general	36
	2.4.2 Objetivos específicos	37
2.5	Hipótesis	37
	2.5.1 Hipótesis general	37



2.5.2	Hipótesis específicas	37
<b>CAPÍTULO III</b>		
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>		
3.1	Lugar de estudio	38
3.2	Población	38
3.3	Muestra	39
3.4	Método de investigación	40
3.5	Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	40
3.5.1	Determinar las reacciones de oxidación y reducción en el estudio de la oxidación de objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno	40
3.5.2	Determinar el periodo de tiempo en el estudio de la oxidación de objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno	43
<b>CAPÍTULO IV</b>		
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>		
4.1	Resultados	49
4.1.1	Determinar las reacciones de oxidación y reducción en el estudio de la oxidación de objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno	49
4.1.2	Determinar el periodo de tiempo en el estudio de la oxidación de objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno	54
4.2	Discusión	62
	CONCLUSIONES	65
	RECOMENDACIONES	67
	BIBLIOGRAFÍA	68
	ANEXOS	76



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
1. Relación entre parámetros características del suelo y la corrosión	5
2. Clasificación de la oxidación en función del pH	40
3. Composición del acero AISI 1018	42
4. Experimentos realizados a diferentes pH	43
5. Análisis de muestras de agua	46
6. Matriz de diseño	48
7. Factores y valores por nivel	48
8. Diseño para desarrollo estadístico	48
9. Resultados de la prueba de oxidación del hierro en agua de diferentes pH, en un tiempo de 10 días.	51
10. Velocidad de oxidación de aceros de bajo carbono	57
11. Resultados de la concentración del hierro	58
12. Efectos estimados como resultado de la oxidación.	58
13. Análisis de varianza para concentración de hierro por oxidación	59
14. Coeficiente de regresión y modelo matemático, oxidación del hierro	60
15. Matriz de correlación para los efectos estimados	60



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
1. Relación entre las características corrosivas del suelo	6
2. Representación esquemática del proceso de oxidación de un objeto de hierro	8
3. Ciclo de humidificación-secado	12
4. Objeto de hierro oxidado	13
5. Objeto de hierro corroído	15
6. Representación de una celda electroquímica	16
7. Representación esquemática de la curva de Tafel.	18
8. Diagrama de pourbaix para el hierro	20
9. Representación del pH	24
10. Zona de muestreo de aguas en la ciudad universitaria	38
11. Zona de muestreo de aguas en C.P.M. Salcedo	39
12. Zona de muestreo de aguas en la costanera sur	39
13. Envases de polietileno de alta densidad	45
14. Representación de las etapas de la oxidación del hierro en medio ácido	51
15. Representación de las etapas de oxidación del hierro en medio neutro o básico	52
16. Curva de polarización del hierro – Agua pH 7,4	54
17. Diagrama de Pourbaix para el sistema Fe-Agua pH 7,4	55
18. Curva de polarización del hierro – Agua pH 6,5	56
19. Diagrama de pourbaix para el sistema Fe-Agua pH 6,5	57
20. Diagrama de Pareto	61
21. Efectos principales	61
22. Superficie de respuesta.	62



## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
1. Matriz de consistencia	76
2. Resultados de análisis de agua con pH diferentes	77
3. Muestreo en las zonas de Salcedo (Av. Estudiante)	78
4. Muestreo en la Zona de la costanera (Mercado Progreso)	78
5. Muestreo en la Zona de la Universidad FMVZ y FIA	79
6. Espectro fotómetro de absorción atómica de la FIM	79
7. Equipo de Potentiostat Gavanostat	80
8. Preparación de muestras - Inicio	80
9. Realizando el ensayo químico de las muestras	81
10. Resultados finales del estudio de las muestras	81
11. Declaración jurada de autenticidad	82
12. Autorización de depósito de tesis en el Repositorio Institucional	83



## ACRÓNIMOS

ASTM:	Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales.
AISI:	Instituto americano del hierro y el acero
CERTIMIN:	Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental de Ingeniería de Minas
CDP:	Capa densa de productos
Ecorr:	Potencial de corrosión
EIE:	Espectroscopia de Impedancia Electroquímica
FGA:	Filtración en gravas de flujo ascendente
Fe <sup>3+</sup> :	Ion férrico
Fe <sup>2+</sup> :	Ion ferroso
Icoor:	Densidad de corriente de corrosión
MTPE:	Ministerio de trabajo y Promoción del empleo
mV:	megavoltios
MT:	Medio transparente
ppm:	Partes por millón
REDOX:	Reducción- Oxidación
Rp:	Resistencia a la polarización

## RESUMEN

El hierro, materia prima para la producción de diferentes tipos de acero, sus productos son industrialmente utilizados en la Región de Puno principalmente en construcción civil, en manufactura de metalmecánica. Este metal es muy sensible a la oxidación por tener un potencial estándar de reducción de  $-0,44V$  y al entrar en contacto con medios corrosivos agua, oxígeno de la atmósfera producen reacciones químicas formando óxidos que producen la contaminación del medio ambiente. Su estudio es de suma importancia. Los objetivos de la investigación fueron determinar el proceso de oxidación y reducción de objetos de hierro producidos por la acción del medio circundante (agua a diferentes niveles de pH) mediante técnicas electroquímicas. Mediante el potencióstato/galvanostato PGSTAT 302N se realizaron pruebas experimentales de extrapolación de Tafel, que permitieron determinar la velocidad de oxidación en función del tiempo. La metodología utilizada fue cuantitativa experimental. A partir de los resultados obtenidos, se logró identificar que las reacciones químicas de oxidación ocurren cuando el hierro entra en contacto con agua en medio ácido, dando lugar a la formación de iones  $Fe^{3+}$ , que crean una capa de oxidación u óxido. La tasa de oxidación, influenciada por la concentración de hierro a un pH de 6,5, provoca una acción oxidante sobre el hierro. Se concluye que las tasas de oxidación en el tiempo encontradas muestran potencialmente que a una concentración de hierro de 0,055 ppm y un pH ácido de 6,5, es de 0,073 mm/año.

**Palabras clave:** Hierro, humedad, medio ambiente, oxidación, reducción.

## ABSTRACT

Iron, raw material to produce different types of steel, its products are industrially widely used in the Puno Region, mainly in civil construction, and in the manufacture of metalworking. This metal is very sensitive to oxidation because it has a standard reduction potential of  $-0,44V$  and when it comes into contact with corrosive media, water, oxygen in the atmosphere, they produce chemical reactions forming oxides that produce environmental pollution. Studying is of utmost importance. The objectives of the research were to determine the process of oxidation and reduction of iron objects produced by the action of the surrounding environment (water at different pH levels) by means of electrochemical techniques. By means of the PGSTAT 302N potentiostat/galvanostat experimental tests of Tapel extrapolation were carried out, which allowed the determination of the oxidation rate as a function of time. The methodology used was experimental quantitative. From the results obtained, it was possible to identify that oxidation chemical reactions occur when iron comes into contact with water in an acidic medium, giving rise to the formation of  $Fe^{3+}$  ions, which create an oxidation or oxide layer. The oxidation rate, influenced by the concentration of iron at a pH of 6,5, causes an oxidizing action on iron. It is concluded that the oxidation rates over time found potentially show that at an iron concentration of 0,055 ppm and an acidic pH of 6,5, it is 0,073 mm/year.

**Keywords:** Iron, humidity, environment, oxidation, reduction.



Juan Marcos Aro Aro, Ph. D.  
Ing. AGROINDUSTRIAL  
C.I.P. N 52422

## INTRODUCCIÓN

Ante el agravamiento de los problemas de oxidación y corrosión, las naciones del mundo dirigen sus esfuerzos buscando una alternativa de solución tecnológica para enfrentar el problema, que se ha convertido la causa de pérdidas económicas. El uso de los materiales metálicos de hierro componente principal del acero, ha generado un crecimiento de las industrias de construcción, petrolera, naval, automotriz, metal mecánica y otros que hacen uso del acero, provocando un aumento de residuos sólidos metálicos y por consiguiente cuando son sometidos a diferentes factores ambientales como el agua, humedad del ambiente, entre otros; son muy sensibles a la oxidación y corrosión, provoca la destrucción gradual de los productos de hierro y sus propiedades mecánicas; consecuentemente graves daños medioambientales con el paso del tiempo. Los objetos de hierro son fácilmente oxidados porque el hierro es un elemento químico cuyo potencial estándar de reducción a 25°C es -0,44 V, la energía es bajo, por lo que al interactuar los objetos de hierro con un potencial estándar superior a este valor se oxida y reacciona fácilmente con la humedad del ambiente, el hierro ferroso se oxida a óxido férrico. (Javaherdashti, 2008).

Según los reportes de MTPE, 2022; nos indica que la actividad manufactura (30,1 %) y construcción (37,3 %) están en crecimiento constante en la Ciudad de Puno, estas actividades económicas utilizan diferentes productos de acero, por lo que generan desechos metálicos y son vertidos en la intemperie en zonas que existen sustancias corrosivas que hacen posible la oxidación del metal. En la ciudad de Puno existen temporadas de lluvias abundantes, creando riachuelos, empozamientos de agua, suelo húmedo; estos reaccionan con los objetos de hierro produciéndose el fenómeno de la oxidación, es decir se producen reacciones químicas de oxidación y reducción (REDOX). La corrosión húmeda, es el tipo de oxidación más común, se produce cuando el objeto de hierro entra en contacto con un electrolito (agua), ya sea sumergido, enterrado o expuesto a la humedad, comenzando a desarrollarse una serie de reacciones anódicas y catódicas simultáneas en la superficie del metal. (Alonzo, J.M. 2016).

En este contexto es importante la realización del presente estudio de oxidación de los objetos de hierro de los desechos vertidos por la industria metal mecánica y la industria de las construcciones y otros productos siderúrgicos que están en contacto con medios corrosivos (agua con pH ácido y alcalino) y que son capaces de cambiar las propiedades

electroquímicas de este metal, con la finalidad de prevenir la contaminación ambiental que es preocupante porque conforme se incrementa el tiempo de exposición, se incrementa la velocidad de oxidación y como consecuencia el riesgo para la biota, contaminación hídrica y para el propio ser humano por dicho fenómeno, el hierro tiene un alto grado de toxicidad y una lenta degradación natural. La investigación pertenece a ciencias de la Ingeniería, al área de investigación de recursos naturales y medio ambiente; y el tema de investigación estudio de la oxidación del hierro. El objetivo del presente trabajo ha sido evaluar y determinar el proceso de oxidación de los objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno, mediante el uso de métodos electroquímicos y celdas electroquímicas que determinaron las reacciones químicas de oxidación y reducción que se producen y la cantidad de metal que pasa a óxido por unidad de tiempo. El estudio es muy complejo debido a que intervienen varios factores corrosivos en la oxidación de los objetos de hierro, finalmente de los resultados obtenidos nos demuestran que el hierro se oxida fundamentalmente por la presencia de agua con pH ácidos y en pH alcalinos en forma lenta variando la intensidad y la velocidad del proceso de oxidación. La velocidad de oxidación (tiempo) de los objetos de hierro en aguas de pH ácidas son mayores que en los otros tipos de agua.

Este trabajo de investigación se organiza en una estructura detallada que abarca diversos aspectos fundamentales del estudio: El capítulo primero ofrece una visión concisa de la revisión del marco teórico y los antecedentes; los mismos que proporcionan el contexto y fundamento teórico necesario para la comprensión del estudio. El segundo capítulo hace referencia al planteamiento del problema de investigación, delineando claramente los objetivos planteados y como estos orientan la hipótesis. En el capítulo tercero, se proporciona el lugar del trabajo, especificando la población y la muestra seleccionada para el estudio, así también se detalla el proceso metodológico empleado para determinar los objetivos específicos, haciendo una explicación de las variables dependientes e independientes, además el uso de los distintos equipos y materiales utilizados en la recolección y análisis de datos. El capítulo cuatro está dedicado a la presentación de los resultados y discusiones obtenidos mediante pruebas electroquímicas y cuadros estadísticos utilizando el software statgraphics. Finalmente, el trabajo concluye con conclusiones y recomendaciones necesarias, una lista de bibliografías consultadas y los anexos que proporcionan material suplementario adicional.

## CAPÍTULO I

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 1.1 Marco Teórico

Desde el inicio de la utilización de metales en diversas industrias, la corrosión ha sido su mayor adversario y se caracteriza formalmente como una degradación progresiva de los materiales y de sus propiedades, como consecuencia de la agresividad que experimenta sobre ellos es por el medio en que se encuentran inmersos (Alter y Mestres, 2003).

La corrosión de objetos metálicos enterrados es causada por reacciones químicas y electroquímicas, principalmente implica reacciones de oxidación y reducción (Roberge, 1999). En estos procesos, el suelo desempeña el papel de electrolito y la estructura representa el contacto metálico requerido para que se genere una celda de corrosión (Payne, 2000). Así pues, la pérdida de espesor que sufre un metal enterrado a causa de esta fuerza destructiva depende de las propiedades del suelo y del metal mismo.

Las principales propiedades del terreno involucradas en la degradación son el tamaño de las partículas que lo constituyen, la presencia del agua, la concentración de oxígeno, el potencial redox, el pH, la resistividad y el contenido de iones y bacterias (G. Li et al., 2007; Mercier-Bion et al., 2018). En la tabla 1 se observa la relación entre parámetros características del suelo y la corrosión.

**Tabla 1**

*Relación entre parámetros características del suelo y la corrosión*

VARIABLE	SEVERIDAD CORROSIVA
Textura del suelo	Partículas finas → Mas corrosión
Presencia de agua	Humedad → Mas corrosión
Concentración de oxígeno	Mas oxígeno → Mas corrosión
Resistividad	Mas resistividad → Menos corrosión
Potencial Redox	Más potencial redox → Mas corrosión
Contenido de iones	Más contenido de iones → Mas corrosión
Contenido de bacterias	Mas bacterias → Mas corrosión
pH	Suelos ácidos → Mas corrosión
	Suelos básicos → Menos corrosión

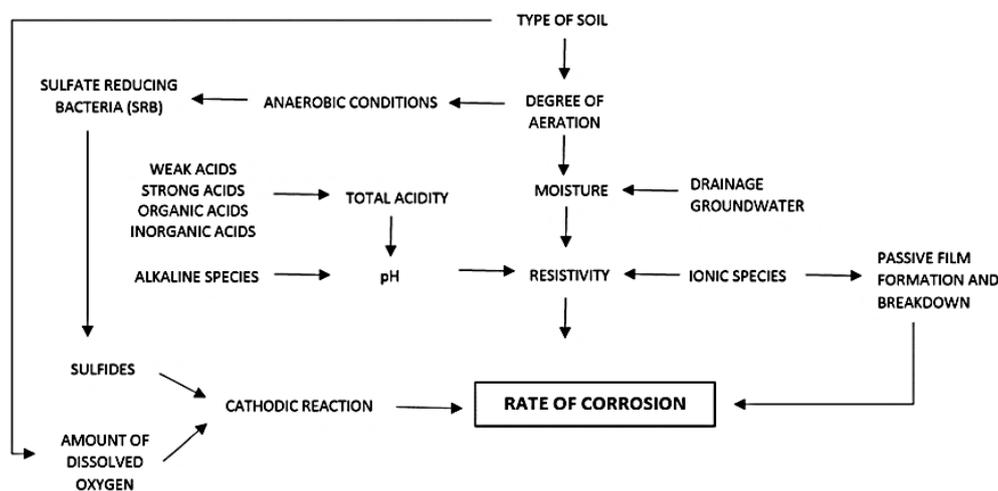
*Nota.* Elaborado por Roberge (1999).

En la tabla 1, cada variable se asoció con la corrosión de forma independiente, pero en realidad el metal no experimenta el estado de corrosión de cada una por separado, sino que en el suelo existe una interacción de todas ellas, lo que afecta fuerte y simultáneamente a los metales.

La figura 1, Se demuestra que la degradación de materiales, es el resultado de la interacción de una variedad de factores propios de las condiciones locales de cada tipo de suelo, donde cada variable tiene un impacto en las demás y las variables restantes tienen un impacto en ella. (Roberge, 1999)

**Figura 1**

*Relación entre las características corrosivas del suelo*



*Nota.* Elaborado por Roberge (1999).

En resumen, la corrosión es un fenómeno multivariado y se utilizan dos métodos principales para medirla: pruebas electroquímicas y pruebas no electroquímicas. Los primeros consisten en medir la tensión, la corriente y, en menor medida, la impedancia y el ruido electroquímico y los segundos, evalúan directamente la corrosión sobre muestras de metal enterradas en ubicaciones específicas o en ambientes simulados en el laboratorio.

### 1.1.1 Propiedades químicas del hierro

Solo detrás del oxígeno, el silicio y el aluminio, el hierro representa el cuarto de todos los metales presentes en la corteza terrestre. Los minerales de hierro más comunes son la magnetita con alto contenido de hierro o mineral de hierro magnético ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ); la limonita o mineral de hierro pardo

( $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), que contiene un 42 % de hierro; la hematita o mineral de hierro rojo ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), que contiene un 70 % de hierro; la siderita o mineral de hierro espático ( $\text{FeCO}_3$ ); la pirita ( $\text{FeS}_2$ ).

El hierro es obtenido mediante el procesamiento de minerales y menas, que constituyen su estado natural, induciéndolos a un estado de mayor energía. El fenómeno de oxidación 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 (Javaherdashti, 2000).

El hierro se utiliza para la fabricación de piezas de hierro fundidos y acero como también en aleaciones con otros metales (Nordberg et al., 2001). El hierro no solo se encuentra en diversos productos utilizados por el hombre, sino también dentro el cuerpo humano con funciones fundamentales en cantidades muy pequeñas, unos 4-5 gramos (0,005 % del peso medio), pero es vital para que podamos respirar, para que nuestros músculos puedan funcionar, para favorecer nuestro sistema inmunológico (Medina, J. et al., 2009), (Gonzales, A. et al., 2023); además el mineral de hierro como óxidos en el suelo son importantes, ya que no existe prácticamente un suelo donde no se encuentren, aunque sea en pequeñas cantidades (Acevedo-Sandoval et al., 2004).

### 1.1.2 Oxidación y Reducción del hierro

La oxidación es un proceso químico en el que un elemento o compuesto pierde electrones, mientras que la reducción implica la ganancia de electrones (Bueso et al., 2006).

En el contexto de la oxidación del hierro, el proceso implica que el hierro metálico (Fe) se convierte como óxidos de hierro, óxido ferroso ( $\text{FeO}$ ), óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) incluso en hidróxido de hierro ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ), dependiendo de las condiciones; por lo que también se presenta con frecuencia en el agua de consumo (Mcfarland y Dozier, 2018), y en relaves mineros o pasivos ambientales por su termodinámica y cinética favorables, además la oxidación del hierro no solo se presenta en aguas superficiales sino también en aguas subterráneas en presencia de oxígeno (Cisterna y Hierro., 2013); sin embargo, los metales pesados y en

particular el hierro puede ser removido de las aguas utilizando como oxidante el cloro, seguido de un sistema de filtración en gravas de flujo ascendente FGA (Soliz et al., 2011).

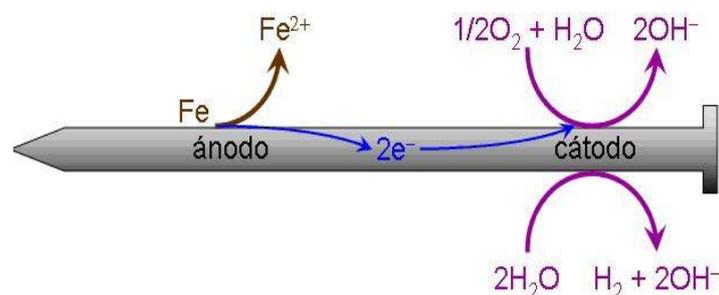
Los proyectos mineros poseen plantas de tratamiento para la remoción de metales pesados en el agua de drenaje ácido mediante reactores y bombas para llevar el agua para su tratamiento, con el problema de que el agua al tener pH bajo corroe los reactores y daña las bombas (Loayza Jaramillo, 2018).

La Figura 2 muestra una representación esquemática del proceso. Aunque no es necesario que las semirreacciones de oxidación y reducción ocurran en lugares diferentes, las zonas catódicas suelen encontrarse donde hay una mayor concentración de oxígeno mientras que las zonas anódicas suelen encontrarse donde hay una menor concentración de oxígeno. La localización de las zonas catódicas y anódicas es habitual durante la corrosión, ya que la concentración de dióxido de carbono en la superficie del metal puede variar significativamente entre estas zonas.

En la zona catódica se encuentra el metal expuesto al aire y no se observa corrosión, mientras que la zona anódica se encuentra en el agua, donde la concentración de oxígeno es menor, lo que provoca la oxidación del hierro en esa zona. Por lo tanto, observaremos con el tiempo abultamientos relacionados con la oxidación del hierro y la formación de herrumbre.

## Figura 2

*Representación esquemática del proceso de oxidación de un objeto de hierro*

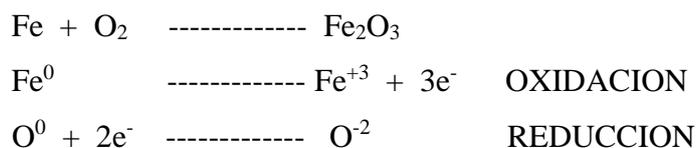


*Nota.* Revista Eureka.

El hierro puede presentar dos formas oxidadas:

- Óxido de hierro (II):  $FeO$

- Óxido de hierro (III):  $\text{Fe}_2\text{O}_3$



### 1.1.3 Fundamentos de la Oxidación y Corrosión

#### A. Oxidación

El término oxidación hace referencia a las reacciones químicas donde el oxígeno se combina con otras sustancias para crear moléculas conocidas como óxidos.

El proceso de pérdida aparente de electrones de un átomo o ion se conoce como oxidación. Se produce una reacción de oxidación cuando un material se combina con oxígeno con el fin de generar óxidos mayor o menor complejidad. Esquemáticamente, el proceso de oxidación se puede representar de la siguiente manera:



En general, la oxidación se refiere a cualquier reacción química en la que el estado de oxidación de un metal aumenta debido a la formación de un compuesto como óxido, sulfuro, carburo, etc. Se pueden considerar tres etapas en las reacciones de oxidación de las aleaciones. En una atmósfera a alta temperatura, todos los componentes de una aleación empiezan a reaccionar de forma simultánea. Como resultado, los compuestos más estables termodinámicamente sustituyen a los menos estables hasta alcanzar un estado de casi equilibrio. Posteriormente, ese "estado estable" desaparece y todos los componentes reactivos de la aleación se consumen en el proceso de descomposición (Young, 2008).

La adsorción de moléculas de oxígeno de la atmósfera es el punto de partida de una reacción de oxidación, que continúa con la nucleación de óxidos y la formación de una fina capa de óxido sobre la superficie, que luego crece hasta formar una capa más gruesa. Durante este tiempo también pueden ocurrir otros procesos, como la formación de nudos y la

ruptura de la capa de óxido. Además, la trayectoria de los elementos portadores durante el crecimiento de la capa es un factor clave en la naturaleza de los óxidos formados. (Khanna, 2002)

### **A.1 Oxidación de objetos metálicos**

La oxidación de los metales, y en particular del hierro es un proceso electroquímico debido a que sobre la pieza del metal que se corroe existen zonas anódicas y catódicas en el cual el hierro se oxida con el oxígeno del aire en presencia de humedad o agua, para dar un producto que carece de las propiedades estructurales del hierro metálico como lo es el óxido de hierro (III) hidratado ( $F_2O_3 \cdot xH_2O$ ) de color café rojizo que se le llama en lo cotidiano herrumbre. (Bartet, 2000)

La oxidación es un proceso natural de degradación que sufren los metales al interactuar con el medioambiente, transformándose en óxidos, lo que conduce a un deterioro progresivo de estos. La oxidación de los metales es un proceso permanente debido a que ellos están siempre en contacto con los agentes que la provocan, como son el agua, el oxígeno del aire y en estos últimos años la lluvia ácida, al mismo tiempo en las zonas costera, también el problema se intensifica debido al ambiente salino (Gardiazabal y Oneto, 2001).

Tras siglos de exposición a ambientes agresivos (suelos, atmósfera, condiciones de inmersión en agua), los objetos metálicos generan estratos de productos oxidativos de múltiples  $\mu m$  y de composición compleja. Los productos de oxidación sobre un objeto de hierro forman parte de un concepto conocido como limitos que se define como el límite entre el material original del objeto de hierro y el ambiente en el que se encuentra durante su tiempo de abandono (Bertholon, 2007). Este limitos se puede reconocer mediante varios criterios, siendo uno de los más relevantes la existencia de capas de productos de oxidación y sus características.

La composición de los productos de la oxidación y corrosión incluye diversas fases y componentes, como óxidos, hidróxidos,

oxihidróxidos, carbonatos entre otros; la composición de la capa de productos de oxidación del hierro está fuertemente determinada por el entorno en el que se hallen estos objetos metálicos. Se ha creado una terminología para caracterizar estas capas de productos corrosivos y su distribución en los objetos ferrosos. El patrón de productos de corrosión se divide en cuatro partes: primero está el sustrato metálico, después, se tiene la capa densa de productos (CDP) que contiene las fases de los productos de corrosión, el medio transformante (MT) que contiene trazas de compuestos del medio en que se encuentran (en suelos por ejemplo, cuarzo y calcita) y también cantidades considerables de hierro debido a la migración de los iones de hierro a través de los productos de corrosión, y por último, el medio circundante, que no ha sido afectado o influenciado por la corrosión del hierro (Remazeilles et al., 2010).

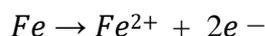
## A.2 Oxidación atmosférica del hierro

El modelo más aceptado para la corrosión del hierro en condiciones de exposición atmosférica es el mecanismo cíclico electroquímico de humidificación-secado para la formación de la capa de óxidos del hierro expuesto a la atmósfera presentado por Evan y Tylor (Rocca et al., 2019) (Figura 3). Este procedimiento implica las siguientes etapas:

- I. En la etapa inicial de humidificación de la superficie, los oxihidróxidos compuestos por iones  $\text{Fe}^{3+}$  se desintegran para liberar cationes  $\text{Fe}^{3+}$ , que transformaran la superficie metálica en compuestos del ion  $\text{Fe}^{2+}$  mediante los poros de la capa de óxidos.
- II. Cuando finalmente el hierro está revestido de una capa fina de agua, empieza a ser oxidado por el oxígeno disuelto en el agua en sustancias de  $\text{Fe}^{2+}$  a causa de la reacción de reducción del oxígeno.
- III. Cuando la superficie empieza a secarse, el grosor de la capa de agua se reduce y el oxígeno comienza a difundirse con rapidez en la fina capa de agua, esto causa la oxidación de los compuestos de

$Fe^{2+}$  a oxihidróxidos formados por el catión  $Fe^{3+}$ , así como la oxidación del hierro metálico en  $Fe^{2+}$ .

Este procedimiento se explica mediante la reacción anódica del hierro provocada por la existencia de oxígeno en delgadas capas de agua:



Y la reacción de reducción del oxígeno:

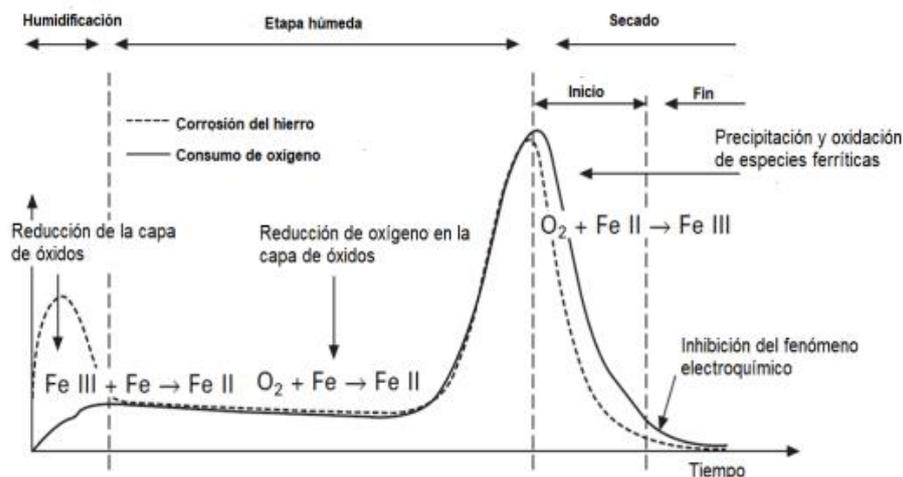


Estos iones hidroxilo se desplazan a las zonas anódicas y se combinan con los iones ferrosos para generar hidróxido ferroso:



### Figura 3

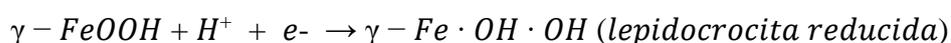
#### Ciclo de humidificación-secado



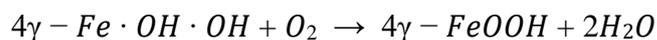
Nota. Marechal et al. (2007).

El hidróxido ferroso, al oxidarse genera el hidróxido férrico, que también es inestable, hasta finalmente se convierte en oxihidróxidos estables, como la goethita ( $\alpha$ - $FeOOH$ ) o lepidocrocita ( $\gamma$ - $FeOOH$ ). La lepidocrocita juega un papel importante en la corrosión atmosférica del hierro. La oxidación del hierro en la etapa húmeda da como resultado el hidróxido ferroso, y una vez que la superficie se encuentra en la etapa de secado, cristaliza y precipita la fase  $\gamma$ - $FeOOH$  a partir del hidróxido

ferroso (Alcántara et al., 2015). En este tipo de ambientes, la reacción de reducción sobre la superficie es la reducción de  $\gamma$ -FeOOH durante la fase de humectación:



En la fase húmeda, se produce la reacción de reducción de oxígeno es la que toma lugar y el oxígeno se propaga a través de los poros de los productos de corrosión presentes. Durante la etapa de secado, como se mencionó anteriormente, ocurre una rápida difusión del oxígeno a través de la delgada capa de agua que va evaporándose, donde rápidamente ocurre la reacción de reducción del oxígeno y la reoxidación de la  $\gamma$ -FeOOH:



#### Figura 4

*Objeto de hierro oxidado*



*Nota.* Quimitube.

### A.3 Prevención y control de la oxidación del hierro

Para minimizar el problema de la oxidación es necesario proteger los metales con pinturas anticorrosivas o estructuras de hierro galvanizados, estañadas o bien se le une a la estructura de hierro un ánodo de sacrificio de magnesio (Chang, 2003). Este problema significa un derroche de energía y de dinero, debido a que en el mundo se gastan millones de dólares, tanto en proteger como en reponer los materiales y estructuras de hierro corroídas.

## B. Corrosión

La corrosión del hierro puede definirse como la degradación de un material metálico por acción del medio que lo rodea mediante acciones electroquímicas o químicas, produciendo pérdidas en sus propiedades mecánicas, lo que da lugar a cambios en su estructura y culminando en su falla (Pancorbo, 2010).

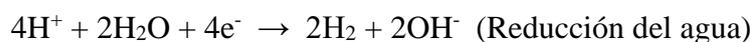
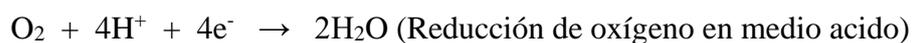
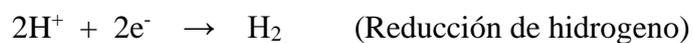
### B.1 Naturaleza electroquímica de la corrosión

Una reacción de oxidación es aquella en la que un compuesto o elemento pierde electrones, mientras que la reacción de reducción gana electrones (Cifuentes y García, 2005).

En proceso de corrosión, el metal es la especie que experimenta la reacción de oxidación a través de la siguiente ecuación:



La reacción de reducción absorbe los electrones liberados por la reacción de oxidación del metal. Las reacciones de corrosión son:



De lo presentado, la corrosión del hierro constituye uno de los problemas que más ha preocupado a la química por ser muchas las dificultades especialmente en el campo industrial que han tenido que vencerse para evitar aquél fenómeno en las construcciones metálicas conductores de agua, gas, por lo que actualmente se vienen intensificando las investigaciones para reducir los efectos negativos mediante modelamiento atómico discreto considerando simulaciones computacionales que permite determinar la cinética del proceso de corrosión (Misad, 2012), a causa de la continua preocupación por entender

y resolver los problemas operativos provocados por el fenómeno de la corrosión, varias organizaciones e instituciones han desarrollado investigaciones que permitan diagnosticar las causas fundamentales de los problemas; Además, el aumento de los costos de inversión y mantenimiento ha llevado a la industria a centrarse en la energía, la recuperación de recursos y la reducción de costos de procesos. Especialmente para casos relacionados a las labores de mantenimiento preventivo o correctivo donde en gran medida y de forma errada se introducen los costos asociados a la corrosión (Romero Bonilla et al., 2017).

### Figura 5

*Objeto de hierro corroído*



*Nota. Etsy.*

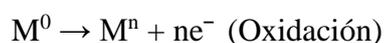
### B.1 Fenómeno de la corrosión

La corrosión es un término que se utiliza para describir el proceso de deterioro de materiales metálicos (incluyendo tanto metales puros, como aleaciones de estos) mediante reacciones químicas y electroquímicas (Revie y Uhlig, 2008).

Estos metales de hierro, también denominados acero, se obtienen mediante el procesamiento de minerales, la ganga y mena forman su estado natural, lo que los convierte en más energéticos. La corrosión ocurre cuando los materiales intentan alcanzar su estado natural, que es un estado energético de menor potencial, lo que les permite estabilizarse termodinámicamente (Javaherdashti, 2000).

La mayoría de los procesos de corrosión involucran reacciones de reducción-oxidación (reacciones electroquímicas), donde para que se desarrollen estos procesos, es necesaria la existencia de tres constituyentes: (1) unos electrodos (un ánodo y un cátodo), (2) un electrolito, como medio conductor, que en la mayoría de casos corresponde de una solución acuosa, y (3) una conexión eléctrica entre los electrodos (Salazar-Jimenez, 2015). La figura 6 ilustra de manera simbólica un diagrama de estos elementos, conformando lo que se denomina una celda electroquímica. Las siguientes son las ecuaciones de las reacciones que suceden en los electrodos:

En el ánodo:

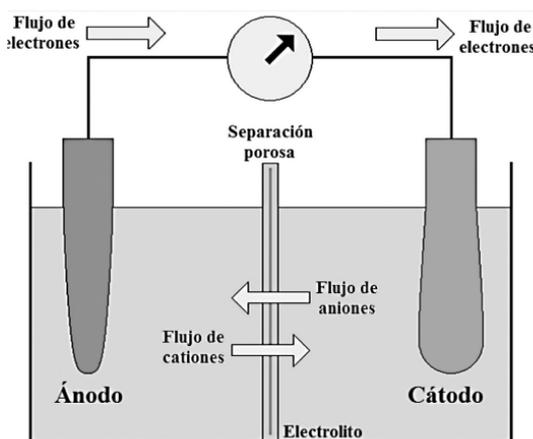


En el cátodo:



**Figura 6**

*Representación de una celda electroquímica*



*Nota.* Salazar.

Las dos reacciones suceden al mismo tiempo. Como se muestra en las ecuaciones, el ánodo reacciona proporcionando electrones al sistema, incrementando así la cantidad de oxígeno. Después, pasa del metal base a cationes que se disuelven en el electrolito, es un material que experimenta el fenómeno de la corrosión. Los aniones metálicos absorben

electrones mientras están en el cátodo, lo que reduce su número de oxidación y los lleva a su estado base. (Salazar-Jimenez, 2015)

### **C. Técnicas electroquímicas**

Con las técnicas electroquímicas se introduce una señal eléctrica en el sistema que se estudia y se obtiene información del mismo analizando la respuesta eléctrica que genera a dicha señal (Lopez, 2008). Entre estas técnicas se incluyen la extrapolación de Tafel, curvas de resistencia a la polarización ( $R_p$ ), espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE) y ruido electroquímico que presentan como principal característica el poder ser empleadas en el monitoreo en línea del proceso corrosivo y proveer información sobre: (Tristancho, 2011)

- Velocidad de corrosión
- Mecanismos de corrosión
- Tipo de corrosión

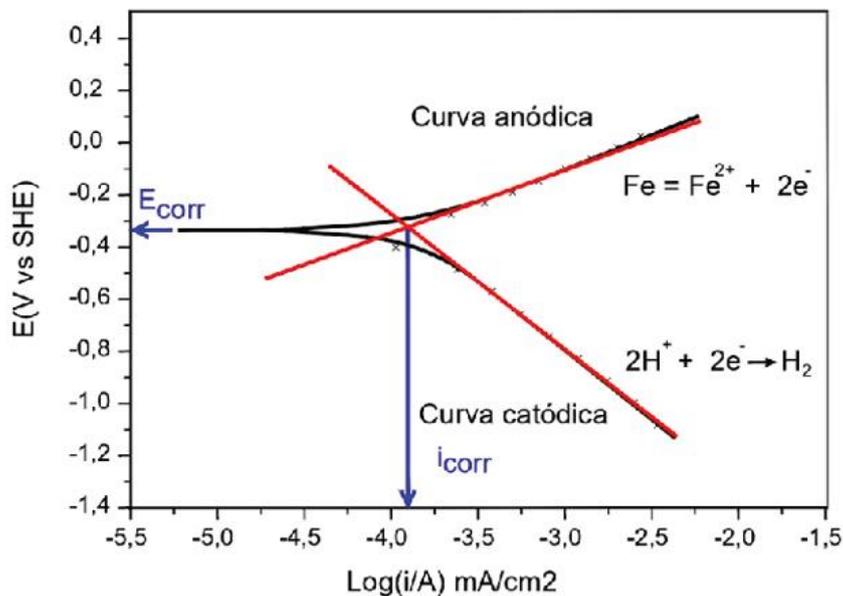
#### **C.1 Curvas de extrapolación de Tafel**

El potencial de un metal, que se hace actuar como un electrodo en una celda electroquímica, además de poderse modificar en función del tiempo cambia de la misma forma, en función de la densidad de corriente que se le aplique (procedimiento potencioestático). En el proceso galvánico la densidad de corriente aplicada, se conserva constante.

Para la obtención de las curvas de polarización se utiliza un barrido de potencial de  $\pm 20$  mV en relación al potencial de corrosión, y se observan los datos obtenidos de las polarizaciones tanto anódica como catódica. El barrido del potencial se grafica en función del logaritmo de la densidad de corriente, lo anterior se muestra en la figura 7 (Tristancho, 2011).

**Figura 7**

*Representación esquemática de la curva de Tafel.*



### C.2 Potencial de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ )

El potencial de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ) representa el potencial en el cual la velocidad de la reacción anódica y catódica están en equilibrio en ciertas condiciones (Bentur, 1997).

### C.3 Densidad de corriente de corrosión ( $i_{\text{corr}}$ )

Es conocida como la velocidad de la reacción de oxidación y reducción en un electrodo en equilibrio, expresada en términos de corriente. La densidad de corriente neta es igual a cero, ya que la densidad de corriente anódica es igual a la densidad de corriente catódica, pero de signo contrario (Roberge, 1999).

### C.4 Diagrama de Pourbaix

Para que ocurra una corrosión, se requiere una energía impulsora que permita la circulación de electrones entre el cátodo y el ánodo. Esta energía impulsora es la variación de potencial entre los sitios anódicos y catódicos. Esto ocurre porque una reacción de óxido o reducción está vinculada con su potencial, debido a la propensión de la reacción a ocurrir de manera espontánea.

La diferencia de potencial es un indicador útil para analizar las relaciones de corrosión, mediante el diagrama de equilibrio creado por Pourbaix, se puede llevar a cabo un análisis donde, al contrastar la variable previamente citada con el pH de un elemento, además determina la región donde se ubica nuestro material. Este esquema es muy importante para los procesos de corrosión.

Los diagramas de pourbaix o también denominados como los diagramas de potencial contra pH, suelen ser empleados para determinar la predicción de los estados más estables un metal, sus productos de corrosión y sus iones vinculados a una solución acuosa. Mediante este diagrama se muestra de manera gráfica el potencial de equilibrio ante la actividad de los iones (Hernández, 2012).

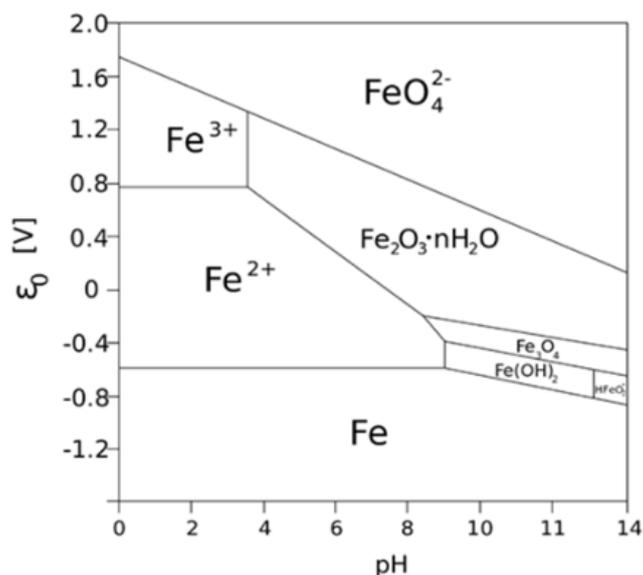
En este gráfico la particularidad radica en que incluyen tres clases de líneas: horizontales, verticales y las oblicuas. Las líneas horizontales señalan las reacciones que solo dependen del potencial, mientras que las verticales señalan reacciones que solo dependen del pH y las líneas oblicuas señalan reacciones que dependen tanto del potencial como del pH. Además, el diagrama presenta dos tipos de trazados: uno continuo y el otro discontinuo fino; si la línea muestra un trazado continuo, señalara un equilibrio entre dos especies sólidas o entre una especie sólida y una soluble con diferentes niveles de actividad. En cambio, si se muestra con un trazado discontinuo señalara un equilibrio entre dos especies solubles (Muñoz Portero, 2011).

Los diagramas de pourbaix resultan sumamente beneficiosos en el ámbito de la corrosión, también se emplean en los campos de electrólisis industrial y en los procesos de recubrimientos electrolíticos, entre otros. Este tipo de diagramas son muy empleados porque predicen el comportamiento de los materiales ante la corrosión, esto posibilita predecir las zonas inmunidad, corrosión y pasivación de un metal en un entorno agresivo esto también se determinará a partir de la etapa termodinámica del metal (Muñoz Portero). En el primer caso el hierro no se ve afectado, en el segundo caso si es afectado por corrosión y en el

tercero, implica que el metal forma una capa estable. Figura 8. (Carrizo et al., 2007)

**Figura 8**

*Diagrama de pourbaix para el hierro*



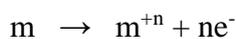
*Nota.* Carrizo, J.

#### D. Termodinámica de la corrosión

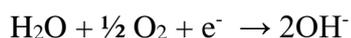
Determinar si un componente de un metal o aleación puede reaccionar con otro componente es necesario para comprender correctamente las reacciones de oxidación y corrosión. Para ese fin, se estudian los diagramas de Ellingham/Richardson.

Sistema de reacciones

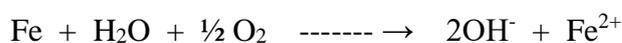
a. En el ánodo



b. En el cátodo



Para el hierro, la completa reacción electroquímica entre el ánodo y el cátodo sería la siguiente:



Esta reacción electroquímica demanda una determinada energía libre, la cual se cuantifica en voltios, lo que señala que la reacción se produce naturalmente a la temperatura del entorno. (Bilurbina Alter et al., 2003)

## **E. Cinética de la Corrosión**

### **E.1 Velocidad de la corrosión**

Durante la corrosión, la velocidad de oxidación anódica debe ser la misma que la velocidad de reducción catódica, ya que la corrosión es un fenómeno que implica reacciones anódicas y catódicas simultáneamente.

Por tanto, la intersección de las curvas de polarización anódica y catódica nos dará el potencial de corrosión y la densidad de corriente de corrosión, que será proporcional a la velocidad de corrosión (Héctor Vargas. 2005):

$$R_{mpy}=0.13 \frac{i_{corr} * e}{\rho}$$

Donde:

$R_{mpy}$  : Velocidad de corrosión

$i_{corr}$  : Densidad de la corriente (microAmp/cm<sup>2</sup>)

$e$  : Peso equivalente en gramos

$\rho$  : Densidad del metal (g/cm<sup>3</sup>)

## **F. Acero**

El acero que se obtiene del hierro, a través de un proceso de reducción, es una aleación de hierro y carbono que contiene una cantidad relativamente reducida de carbono (menos del 2 % de su masa). El carbono desempeña un rol crucial en los aceros, dado que a medida que el acero contiene más carbono, su resistencia se incrementa, aunque simultáneamente su ductilidad se reduce.

Dando lugar a una amplia variedad de materiales metálicos con diferentes propiedades que les hacen útiles para una amplia gama de aplicaciones industriales. (Enriquez y Tremps, 2009)

### **F.1 Aceros al carbono**

Los aceros al carbono son aleaciones que contienen básicamente hierro (Fe), al que se le añade un pequeño porcentaje de carbono (C) superior al 0,05 % e inferior al 2 % en peso y otros elementos como manganeso (Mn), fósforo (P), silicio (Si), que proporcionan mayor resistencia mecánica. “Entre los metales, el acero es uno de los más utilizados, el 90 % de todos los metales producidos en el mundo es acero”. (Ashby y Jones, 2008).

“Los aceros se clasifican según su contenido de carbono:”  
(Domínguez y Ferrer, 2014)

- Aceros con bajo contenido de carbono. Se conoce como suaves o dulces, con un porcentaje de carbono que oscila entre 0,03 y 0,25 %.
- Aceros con medio contenido de carbono. Se conoce como semidulces o semiduros, con un porcentaje de carbono que oscila entre el 0,25 y 0,50 %.
- Aceros con alto contenido de carbono. Se conoce como duros y extra duros, con un porcentaje de carbono que oscila entre 0,5 y 1,67 %.

El acero de bajo carbono (1018) es el más utilizado en las diferentes industrias y manufactureras, por ser dúctiles, maleables, altamente maquinables, soldables y no responden al tratamiento térmico del temple.

El hierro es actualmente la aleación mecánica más importante, utilizada intensivamente en multitud de aplicaciones como bienes de equipo (máquinas, herramientas, construcción, etc.). Debido a su ductilidad, es ideal para procesos de conformado en frío como plegado, estampado y torneado. Sus usos comunes incluyen tornillos, pernos,

sujetadores, etc. La desventaja de este tipo de material es que se corroe fácilmente cuando se expone al aire y al agua.

El hierro del acero es susceptible tanto a la oxidación y corrosión en los metales en general. El tipo de oxidación y corrosión que provoca depende de dos factores cruciales: la estructura de la capa exterior del acero y, simultáneamente, el medio al que se encuentra expuesto (electrolito).

El acero de bajo carbono puede oxidarse por las siguientes reacciones electroquímicas cuando se expone a un ambiente acuoso:

Reacción anódica o de oxidación:



Las reacciones catódicas presentes pueden ser:

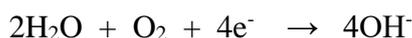
- Reacción de reducción del hidrogeno



- Reducción del oxígeno en medio acido



- Reducción del oxígeno en medio básico



En situaciones en las que hay un exceso de oxígeno, se produce un producto de corrosión con hierro trivalente. En situaciones en las que no hay oxígeno, ocurre una combinación de hierro divalente y trivalente del tipo  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$

La velocidad de corrosión está relacionada con la cantidad de oxígeno disuelto y, a medida que se agota, es nula.

## G. pH

El logaritmo inverso de la concentración de iones hidrogeno es el pH. El potencial hidrogeno, también conocido como pH, es un parámetro importante tanto para aguas residuales como naturales. Las especies que

componen un ecosistema pueden interactuar y sobrevivir en un rango extremadamente limitado de pH., por lo que, si este valor se altera, los procesos biológicos habituales pueden ser perturbados y/o inhibidos, con consecuencias negativas.

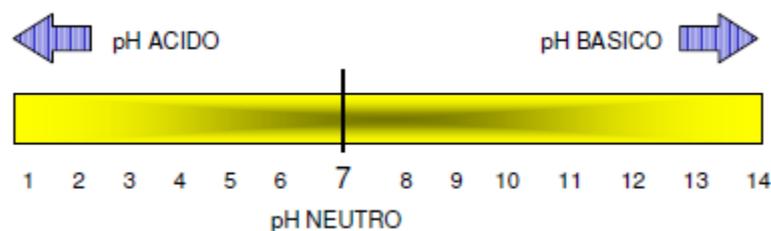
El valor del pH en aguas naturales y residuales indica si las condiciones son ácidas o básicas.

El pH menor de 7,0 demuestra la acidez del agua. Por la concentración de iones hidrogeno. Se observan condiciones básicas en el agua cuando el pH supera 7,0. Se dice que el agua es alcalina debido a la baja concentración de iones hidrogeno.

Cuando el pH es 7,0, indica que la muestra tiene un pH neutro, en consecuencia no son ácidas o alcalinas. Las aguas naturales y residuales tienen valores de pH de 6,0 a 8,0 unidades de pH, que son los más apropiados para la actividad biológica en los ecosistemas. (Mamani V., 2012)

### Figura 9

*Representación del pH*



*Nota.* Mamani V. (2012).

## 1.2 Antecedentes

### 1.2.1 Internacionales

La corrosión de los productos de hierro resulta ser un problema recurrente en las ciencias de la arqueología, la conservación y la restauración. Debido a su estructura externa porosa de los productos de corrosión, la corrosión superficial de los productos de hierro puede progresar continuamente hasta que el núcleo de metal esté completamente mineralizado (Doménech-Carbó et al., 2021); también

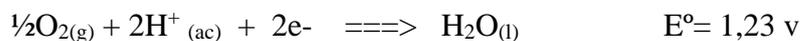
se puede manifestar que el desgaste y la corrosión son fenómenos de degradación dependientes de la superficie y directamente relacionado al entorno agresivo existente en presencia de especies químicas como sales de cloruro/bromuro, compuestos orgánicos ácidos, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno, etc. (Datta et al., 2021); en ese contexto, la aplicación de aceros de alta resistencia en ingeniería naval resulta ser de importancia debido a su alto rendimiento y capacidad para ayudar a ahorrar recursos por su durabilidad, aun así la información detallada y sistemática sobre el comportamiento frente a la corrosión de los aceros de alta resistencia en diferentes zonas de corrosión marina es aún limitada (Huang et al., 2022); sin embargo, investigan el comportamiento de las capas de óxido producidas a partir de acero de baja aleación en ambientes de salpicaduras marinas, revelando que las capas anteriores (dobles) eran fáciles de desprender y demostrando la ocurrencia de un enriquecimiento interno de aniones y un enriquecimiento externo de cationes (Zhang, 2022); no siempre la corrosión se relaciona con sistemas agresivos, también el óxido tiende a aparecer en las superficies de acero en aguas relativamente limpias, como agua de río y agua potable debido al oxígeno y al gas carbónico disueltos en el agua, por lo tanto, es importante evitar que el agua o que el oxígeno entre en contacto con la superficie del acero para evitar la formación de óxido (Ijiri et al., 2022). Ante el problema de oxidación de hierro y sus aleaciones, para evitar el deterioro de los metales, se presentan como alternativas la utilización de una capa duradera de epoxi de óxidos metálicos que proporciona la máxima resistencia y protección contra la corrosión. Estos óxidos metálicos pueden ser un monómero o una mezcla polimerizada híbrida de diferentes componentes (Kumari et al., 2021).

Chandia y Hernández (2009) en su artículo de investigación de la corrosión del hierro en distintos tipos de agua; indica que la oxidación es un proceso espontáneo de destrucción que experimentan el hierro al entrar en contacto en el medioambiente y que esto produce un gradual deterioro de ellos. Que el proceso de corrosión se lleva a cabo principalmente en 2 etapas:

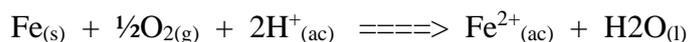
La primera etapa puede ser descrita como una pila galvánica, en donde un área de la superficie del hierro actúa como ánodo y ocurre la oxidación del hierro metálico a ion hierro (II), de acuerdo con:



En otra zona próxima a la superficie del metal que actúa como cátodo, tiene lugar la reducción del oxígeno atmosférico a agua mediante la semirreacción;



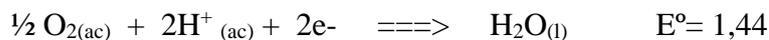
La reacción global se representa en la siguiente ecuación:



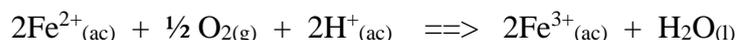
La segunda etapa, se refiere a la formación de la herrumbre, en la que el ion hierro (II) se desprende de la superficie del metal y se desplaza hacia la gota de agua, donde se oxida a ion hierro (III), de acuerdo con:



Simultáneamente el oxígeno disuelto en el agua se reduce según:



La ecuación de la reacción global corresponde a :



Finalmente determina qué; la lana de acero puede corroerse en cualquier tipo de agua, aunque la intensidad y velocidad pueden variar. En aguas ácidas, tanto la velocidad como la intensidad de la corrosión del hierro, son mayores a las otras clases de agua.

Antonio y Carmen (2021) en su artículo de investigación concluye que; las aguas naturales suelen contener compuestos de óxido de hierro en forma de  $\text{Fe}(\text{CO}_3\text{H})_2$  es cuando el medio ambiente se deteriora y el pH es inferior a 6. La migración del hierro, especialmente a través de las aguas subterráneas, es facilitada por este compuesto soluble.

Terán et al. (2022) en su trabajo de investigación “Desarrollo de un sistema galvanostático para la corrosión acelerada en varillas de refuerzo”. Realiza un estudio de la corrosión de las varillas de refuerzo que son utilizados en

la elaboración de columnas de concreto y en las que se encuentran elementos corrosivos como el agua con iones de cloruros, oxígeno, dióxido de carbono y otros gases, se infiltran a través del concreto y con el tiempo adecuado llega a la varilla de refuerzo, causando su deterioro debido a la corrosión frente al cambio del pH del hormigón, por lo que causa la fractura de la capa de óxido en el acero que actúa como protección. Esta corrosión produce herrumbre, lo cual son óxidos que son de 2 a 10 veces más voluminosos que el acero original y teniendo como consecuencia el agrietamiento del concreto. (Red Durar, 2000). Para identificar cómo afecta el comportamiento de tensión de las varillas debido a la disminución del área de la sección transversal, desarrolla un sistema galvanostático para acelerar la corrosión en varillas de refuerzo. Se evidencia que el sistema creado tiene la capacidad de acelerar la corrosión hasta alcanzar a un valor aproximado de pérdida de masa en las celdas que contienen la solución poro + 3,5 % de NaCl. Y en un futuro, con estos resultados se podría, evaluar las propiedades mecánicas vinculando el porcentaje de pérdida de peso y reducción de área, límite de fluencia, porcentaje de elongación y la razón de resistencia última con respecto al límite de fluencia, así como determinar las variaciones en el diámetro debido a las pérdidas de masa.

Heredia (2011) en su artículo científico afirma: Desde un punto de vista tecnológico, la corrosión de los metales en ambientes húmedos reduce significativamente sus propiedades mecánicas. Los autores proponen varios experimentos sencillos para revelar este fenómeno utilizando reactivos y materiales accesibles de uso cotidiano (hierro, cobre, aluminio, cinc y plomo).

Culcasi et al. (2010) en su artículo de investigación “Hojalata: evaluación de su comportamiento frente a la corrosión en medios acuosos”. Ejecuta la investigación del comportamiento a través de métodos electroquímicos y de estudio de superficie, además de la microscopía óptica y electrónica de barrido en diversas soluciones salinas; para lograrlo, examina e interpreta los resultados a través de modelos que puedan detallar correctamente la degradación metálica de interfaces tanto complejas como reactivas. En conclusión: La degradación de la superficie metálica se produce principalmente durante las primeras 24 horas de inmersión, logrando posteriormente un comportamiento relativamente estable y repetible con independencia del medio empleado; y que estos resultados coinciden

con las velocidades de corrosión establecidas electroquímicamente y, por consiguiente, con el periodo de vida útil del revestimiento.

Fuentes (2013) en su trabajo de investigación “Análisis experimental de la oxidación del hierro en aguas subterráneas de abastecimiento a través de aireación” concluye que la oxidación del hierro en suministros de agua subterránea aireada se ha analizado experimentalmente. Esto se consigue utilizando un sistema de lotes a escala de laboratorio que estudia dos variables: los movimientos del aire y los periodos (tiempo) de interacción del agua con el oxígeno. Para medir los cambios en las concentraciones de hierro en las muestras, se manipulan y combinan estas condiciones. Los hallazgos llevan a la conclusión de que la oxidación del hierro funciona bien durante las dos primeras horas. La cantidad de oxígeno en el agua que ha sido aireada es directamente relacionada con la fuerza del aire suministrado. La cantidad de caudal de gas proporcionado al medio determina la cantidad de tiempo que lleva un líquido para alcanzar su nivel máximo de oxígeno disuelto. Cuanto mayor sea el flujo de aire, más rápido se saturará de oxígeno la cantidad de agua utilizada (más rápida será la transferencia de oxígeno al agua).

Ortiz y Solarte (2012) realización de investigaciones sobre oxidación y corrosión de metales: una construcción fenomenológica de los cambios materiales. Se trata de un recorrido histórico basado en la transformación de la materia, en la oxidación y corrosión del metal en diferentes medios y ambientes cuando interacciona con diversas sustancias, los cambios de estado y la formación de precipitados, y otras combinaciones y transformaciones entre sustancias. Para desarrollar una propuesta de tesis, se presentarán varias áreas de la propuesta y las Restricciones. Consideraciones finales sobre cambios de materiales y oxidación y corrosión.

Simoës (2013) realizaron pruebas de laboratorio en vigas continuas de hormigón armado sometidas a corrosión forzada a diferentes niveles de carga para investigar los efectos estructurales de la corrosión. Los resultados han demostrado que las barras corroídas experimentan una pérdida significativa de capacidad, deformación y plasticidad en comparación con el acero corroído, así como cambios significativos en las curvas de tensión-deformación. La prueba de

adherencia por extracción examina principalmente la disminución del valor máximo de la tensión de adherencia entre muestras de cada diámetro corroídas y no corroídas.

Bastidas (2018) en su proyecto de grado “Evaluación de la corrosión en concreto reforzado por método electroquímica”. Analiza el rendimiento del concreto reforzado sumergido en los medios de agua y en agua con salmuera al 3,5 %, donde se observó la velocidad de corrosión a través de los procedimientos electroquímicos de resistencia a la polarización lineal y curvas de extrapolación Tafel. Finalmente determina que, a través de las pruebas de extrapolación de curvas de Tafel, se determinaron las pendientes anódicas y catódicas utilizadas para determinar los valores de la velocidad de corrosión en las distintas muestras. Las muestras inmersas en el medio salino demostraron tener valores superiores de velocidad de corrosión en comparación con las muestras inmersas únicamente en agua.

Gomez (2007) de su investigación concluye que; La corrosión es el resultado de la reacción de un metal con su entorno, que es no deseable porque afecta las propiedades del metal y lo deteriora. El deterioro de un material metálico se debe a la reacción electroquímica con el entorno, donde el metal normalmente adopta estados más estables en la naturaleza y como resultado, el hierro se oxida con el oxígeno del aire, lo que da un material que ha perdido sus propiedades metálicas originales del hierro. El término degradación se utiliza cuando se trata de materiales no metálicos como polímeros o cerámicos. El proceso de corrosión del acero es un fenómeno electroquímico donde el metal entregara su valencia a la atmósfera, generando áreas anódicas y catódicas. Como resultado, el oxígeno del aire oxidará el hierro, creando un material que carece de las características del metal original.

Culebro (2004) en su tesis: “Problemas patológicos derivados de la Corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto” con motivo de optar por el título de Ingeniero Civil; plantea como objetivo principal: Realizar el diagnóstico a un edificio de concreto armado e implementa el procedimiento de inspección preliminar y detallada para determinar los daños de las estructuras corroídas en una Escuela Primaria. La metodología aplicada es el diseño

experimental y la población será el colegio primario en estudio. Esta investigación utiliza una variedad de métodos para combinar la corrosión del acero de refuerzo en el concreto: localización, clasificación y reparación.

Gonzales (2008) con una tesis titulada “La influencia de las fisuras en el concreto en la corrosión del acero de refuerzo”. Para la realización de este trabajo se planteó como objetivo principal: Analiza las consecuencias de la rotura del concreto en la corrosión del acero de refuerzo en muestras que fueron sometidas a dos entornos distintos: el mar natural y el mar simulado. Utiliza un diseño experimental y una metodología de tipo aplicada para lograrlo. Se estructura en dos etapas. Primero, se analiza el efecto de los distintos espesores de concreto en la corrosión del acero de refuerzo. Durante la segunda etapa, se realizan evaluaciones en menos de un año. El análisis del impacto del agrietamiento del concreto en la corrosión tanto a corto como a largo plazo del acero de refuerzo se realiza durante estas dos etapas. Se descubrió que cuando las relaciones son de 0,3 y 0,4, la presencia de concreto tiene un efecto sobre la corrosión del acero, pero cuando las relaciones son de 0,5 y 0,6, no existe ningún efecto.

Hurtado (2010) tesis titulada “Determinación del grado de corrosión y perfil de carbonización de vigas de concreto armado después de 3 años de exposición ambiental” orientada a la obtención del título de Ingeniero Civil de la Universidad Veracruzana. Los objetivos incluían relacionar la durabilidad del hormigón con las características ambientales, evaluar su comportamiento electroquímico mediante el seguimiento del potencial de corrosión y calcular el perfil de carbonatación utilizando cortes de hormigón armado. Además, durante el período de análisis (en este caso 3 años), se realiza un análisis del potencial de corrosión de la velocidad de corrosión para determinar el tiempo necesario para la progresión de la carburación y el contacto con el acero refuerzo, hizo uso de un método aplicado y de diseño experimental para regular el proceso de corrosión conforme a las condiciones expuestas, los materiales empleados y los resultados de las mediciones.

Además, predice la vida útil de las barras de refuerzo. La conclusión es que la rehabilitación de estructuras de hormigón no requiere mayor inversión en materiales que los materiales más comunes en la construcción.

Salazar-Jimenez (2015) en su artículo científico concluyó que la corrosión sucede cuando los metales se degradan en reacciones químicas y electroquímicas, en busca de un estado con menor potencial de energía. La corrosión tiene efectos de gran alcance en la economía, la seguridad y los niveles de integridad del material, por lo que la investigación y contención de la corrosión es de suma importancia. Este documento describe (1) tipos de corrosión comúnmente observados, (2) factores que influyen en el proceso de corrosión y su velocidad, y (3) el control y la protección de los materiales contra los fenómenos de corrosión. Proporciona información sobre varios tipos de métodos.

Vallejo (2004) en su trabajo de graduación, “Conocimiento y prevención de la corrosión”. Concluye que son muchos los métodos para la protección de los materiales metálicos varían en diferentes grados de diseño para evitar el ataque de corrosión, el uso de recubrimientos protectores metálicos y no metálicos, se realiza mediante la selección de materiales resistentes a la corrosión (galvanizado y pinturas protectoras), radica en la preparación de la superficie según las normas de limpieza.

Gueorgui (2021) en su trabajo de investigación científica, Tiene como objetivo proporcionar una visión general de los recubrimientos anticorrosivos utilizados para proteger las estructuras ferroviarias de acero expuestas a condiciones atmosféricas. Su artículo explica las características específicas del funcionamiento de estructuras ferroviarias utilizando elementos metálicos como alcantarillas, estructuras de puentes (puentes, viaductos), vías y catenarias, y analiza sus mecanismos. Corrosión atmosférica electroquímica del acero, productos y capas de corrosión. Finalmente, este artículo destaca los principales obstáculos y las futuras áreas de investigación en este campo relacionadas con el fortalecimiento de las regulaciones ambientales, la reducción de los costos operativos y la mejora del desempeño de los recubrimientos anticorrosivo en estructuras ferroviarias de acero.

López (2008) durante su investigación, llegó a las siguientes conclusiones: La evaluación del comportamiento de materiales metálicos expuestos a procesos de corrosión se suele realizar mediante métodos técnicos desarrollados por NACE (National Association of Corrosión Engineers). El método técnico NACE TM

0177, son técnicas utilizadas para estudiar la resistencia de los materiales metálicos, pero hasta hace poco, los mecanismos de interacción entre el metal y los distintos componentes corrosivos de la solución de evaluación no estaban descritos. En este sentido, se están realizando estudios para evaluar el efecto de los medios corrosivos propuestos en el método NACE TM 0177 sobre materiales metálicos modificando o añadiendo compuestos. El principal objetivo es acercarse a los instrumentos reales de la industria petrolera.

### 1.2.2 Nacionales

Vásquez (2010) con el título “Vida útil en estructuras de concreto armado desde el punto de vista de comportamiento del material”; El objetivo principal fue determinar la situación actual de las construcciones en Chimbote. La investigación se llevó a cabo de manera descriptiva comparativa y el diseño utilizado para este estudio fue el descriptivo comparativo en las tres áreas de estudio: P.J. Primero de Mayo, P.J. Villa María y Urb. El Trapecio en la provincia de Chimbote, que constituyeron la población del estudio.

La selección de la muestra se realizó de manera aleatoria, incluyendo 15 obras de concreto armado de cada área de estudio, lo que resultó en un total de 45 obras examinadas. Sus instrumentos comprendían un formulario de revisión visual general de la estructura, cuadros estadísticos para cada zona inspeccionada y cuadros comparativos para cada zona. Concluye que la durabilidad de las estructuras de concreto armado será limitada si no están bien diseñadas y fabricadas de acuerdo con los códigos de buenas prácticas constructivas. La investigación ejerce un efecto económico en la durabilidad de una estructura desde su periodo de vida hasta su vida útil restante.

Carvallo (2014) en su tesis titulada “Estudio de la corrosión atmosférica sobre dos tipos de acero de bajo carbono en instalaciones industriales petroleras cercanas al mar en el noroeste del Perú”. Para la realización de la investigación se propuso el siguiente objetivo: Evaluar la corrosión atmosférica en dos clases de acero (AISI/SAE 1020 y ASTM A36) empleados en la edificación de instalaciones de producción, recolección y traslado de petróleo en diversos entornos del Lote X con el objetivo de detectar elementos que inciden. Calcula la velocidad de la corrosión mediante el uso de muestras de acero AISI/SAE 1020

tras un año de exposición atmosférica y muestras de acero ASTM A 36 durante dos años. El proceso se llevó a cabo de acuerdo con la norma ISO 9223-1992. El instrumento El Cometer 123 Profile Gauge Analog se utilizó para realizar esta medición. Llega a la conclusión de que los cloruros tienen un impacto polinómico en la corrosión para los dos tipos de metal examinados.

Cano (2015) con el título “Diseño de un plan de recubrimiento con pintura industrial y mantenimiento para disminuir la corrosión en tanques de combustible diésel para centrales termoeléctricas” con motivo de optar por el título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Nacional del Callao en el año 2015 en la Provincia del Callao Perú: su objetivo principal fue: Diseñar un plan de recubrimiento con pintura industrial y un plan de mantenimiento para disminuir la corrosión en tanques de combustible diésel para centrales termoeléctricas. El diseño de la investigación es transaccional de tipo descriptivo. Para esta investigación, todos los tanques de combustibles de las centrales térmicas del Perú forman la población.

Las herramientas que se utilizaron fueron guías para el análisis de contenido y fichas para registrar aspectos particulares de las actividades de preparación de superficie, pintados. Considerando que los gastos asociados a la corrosión son considerables y altos en comparación con los Estados Unidos, el estudio determina que es esencial la protección anticorrosiva de los depósitos de diésel que operan en las plantas termoeléctricas. El mantenimiento anticorrosivo representa el 8 % de nuestra PBN en Perú, mientras que solo representa el 4 % de su PBN en los Estados Unidos.

## CAPÍTULO II

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 2.1 Identificación del problema

Desde el uso del hierro y sus aleaciones en los diversos ámbitos de las industrias de construcción, estructuras y edificios, fabricación de vehículos, en la manufactura de la metalmecánica y otros artículos; han generado residuos que se encuentran semi enterrados, enterrados o en las superficies del suelo. Cada uno de estos materiales en mayor o menor medida interactúa con el entorno provocando la oxidación y corrosión alternado a los ecosistemas, la pérdida de biodiversidad y la contaminación del agua y el suelo. (Parker y Peattie, 1984).

El fenómeno de la oxidación y corrosión es ignorado en la mayoría de los casos y las consecuencias suelen ser desfavorables, se presenta por la presencia del agua, la concentración del oxígeno, el potencial redox, el pH (S. Li et al., 2022). Se trata de un mecanismo causada por reacciones químicas y electroquímicas que afecta a los objetos de hierro (Roberge, 1999) y que en el futuro puede causar daño a los ecosistemas acuáticos y a las comunidades que usan el agua subterránea.

En la ciudad de Puno, según los reportes de MTPE, 2022, indica que la actividad de manufactura en el sector de construcción y metalmecánica están en crecimiento y teniendo en consideración que en la zonas periféricas y urbanas existen talleres de metal mecánica, construcciones y otras industrias; que diariamente abandonan residuos metálicos de objetos de hierro (clavos, pedazos de calaminas, alambres y trozos de varillas de construcción y en forma de chatarra en general) por lo que se acumulan grandes cantidades de desechos de material metálico; estos objetos metálicos al estar en la superficie entran en contacto con el medio y produce una reacción química y electroquímica y en consecuencia contaminan el suelo y las aguas subterráneas a través del tiempo.

La Ciudad de Puno llueve con mayor intensidad en los meses desde diciembre hasta marzo y en menor intensidad el resto de los meses acompañado de heladas (Senamhi.gob.pe) se hacen muy sensibles a los efectos de la contaminación ambiental por el fenómeno de la oxidación. Los objetos de hierro (acero 1018) que utilizan las industrias forman sustancias insolubles conocidas como óxidos de hierro, provocando la

decoloración del agua, la acumulación de sedimentos y afectando adversamente la calidad del agua en ríos y el lago, con consecuencias perjudiciales para los ecosistemas acuáticos y la vida que depende de ellos. Además, es particularmente preocupante cuando las sustancias contaminantes presentan un lento proceso de degradación natural y un alto grado de toxicidad.

## **2.2 Enunciados del problema**

### **2.2.1 Problema general**

- ¿Será posible evaluar el grado de oxidación de objetos de hierro al ambiente de la ciudad de Puno?

### **2.2.2 Problemas específicos**

- ¿Será posible evaluar las reacciones de oxidación y reducción en el estudio de la oxidación de objetos de hierro en el ambiente de la ciudad de Puno?
- ¿Será posible evaluar el periodo de tiempo en el estudio de la oxidación de objetos de hierro en el ambiente de la ciudad de Puno?

## **2.3 Justificación**

El hierro es el principal elemento aleante para la obtención del acero, ha sido utilizado por la humanidad desde la antigüedad para diversas aplicaciones, entre ellas, construcción, armas, ornamentación, industria, fabricación de herramientas etc. Con el pasar del tiempo estos objetos de hierro están ocasionando en la actualidad daños costosos en ocasiones irreparables por el fenómeno de la oxidación y corrosión, debido a que estos materiales metálicos están expuestos a la acción del oxígeno de la humedad, del agua a pH ácidos y a otros factores; es decir ha tenido muchas repercusiones a nivel económico, de seguridad, de conservación, desembocando en fallos precoces y la reducción de la vida útil de los objetos de hierro. Frente a este hecho, numerosos países a nivel mundial están en búsqueda de soluciones y para ello, han llevado a cabo varias investigaciones con el objetivo de profundizar en las causas y efectos del fenómeno de la oxidación y corrosión.

La oxidación del hierro constituye un problema de suma complejidad, debido a la intervención de numerosos factores que producen pérdidas de masa que se producen en un metal por el fenómeno de la oxidación y corrosión que pueden intervenir según las condiciones del medio. Vemos que en la ciudad de Puno por la presencia de las Industrias

metal mecánica, de la construcción y otras manufactureras, desechan los objetos de hierro tal como clavos, pedazos de planchas, alambres, trozos de varillas de construcción y en forma de chatarra en general en la intemperie, que al entrar en contacto con la humedad, el oxígeno del agua se unen y producen una reacción química generando una masa de metal distinto, que conocemos como óxido. Teniendo en cuenta este hecho, se puede ratificar la importancia que tiene esta investigación, que a partir de los resultados de este estudio trae consigo la posibilidad de conocer que sustancias provocan la oxidación y en cuantos días, que reacciones químicas y por qué contaminan el ambiente.

Esta condición representa un desafío significativo de este fenómeno para determinar el periodo de tiempo de la oxidación y corrosión de los objetos desechados. Así como también la existencia de compuestos de óxido de hierro en el agua puede conllevar riesgos para la salud, ya que tienen la capacidad de transportar metales pesados y otros elementos contaminantes perjudiciales para la salud y el bienestar humano. La acumulación de sedimentos originada por la oxidación del hierro puede colmatar el lecho de ríos y arroyos, generando un impacto perjudicial en los seres acuáticos y en su entorno natural.

Conocemos que los productos finales del hierro son muy importantes en la industria, pero debido a la inestabilidad termodinámica de este metal fácilmente se oxidan, lo que resulta en un impacto negativo en el medio ambiente; es tan grave como una enfermedad silenciosa, de modo que cuando nos damos cuenta ya es muy tarde y no hay más nada por hacer para salvar a una sociedad contaminada. El hierro puede ser peligroso para el medioambiente; se debe prestar especial atención a las plantas, el aire y el agua, se asocia al oxígeno con facilidad lo que puede resultar en que en medio acuoso produzca asfixia de peces, plantas y organismos marinos. (Lenntech, 2016).

## **2.4 Objetivos**

### **2.4.1 Objetivo general**

- Determinar el grado de la oxidación de objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno.



### 2.4.2 Objetivos específicos

- Determinar las reacciones de oxidación y reducción en el estudio de la oxidación de objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno
- Determinar el periodo de tiempo en el estudio de la oxidación de objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno

## 2.5 Hipótesis

### 2.5.1 Hipótesis general

- Con el estudio termodinámico y cinético se determina la oxidación de objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno.

### 2.5.2 Hipótesis específicas

- La determinación de las reacciones de oxidación y reducción permiten cuantificar la oxidación de objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno.
- La determinación del periodo de tiempo en el estudio permite cuantificar la oxidación de objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno.

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Lugar de estudio

Para la realización del trabajo de investigación se utilizó los Laboratorios de Electrometalurgia y Corrosión de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalurgia, así como también en los laboratorios de Análisis de Muestras de medio ambiente en la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

#### 3.2 Población

Una población que es llamada también universo, viene hacer el conjunto de casos que tienen una serie de especificaciones o características similares (Galindo-Domínguez, 2020). La población muestral está representada por las zonas de Centro Poblado Menor de Salcedo (Av. El Estudiante); agua que ingresa al Lago Titicaca (Mercado progreso y estacionamientos de vehículos para la zona sur de Puno) por la zona de la costanera y el agua de pozo subterráneo y agua empozada cerca de las construcciones civiles de la Ciudad Universitaria (FCA y FMVZ) de la Universidad Nacional del Altiplano. El muestreo se realizó con criterios técnicos, siguiendo protocolos establecidos por (Ministerio de salud, 2013), (MINAM, 2017) y (ANA, 2018) para aguas superficiales. Las figuras 10, 11 y 12 muestran los lugares de la población de muestreo.

#### Figura 10

*Zona de muestreo de aguas en la ciudad universitaria*



*Nota.* Google Earth.

### Figura 11

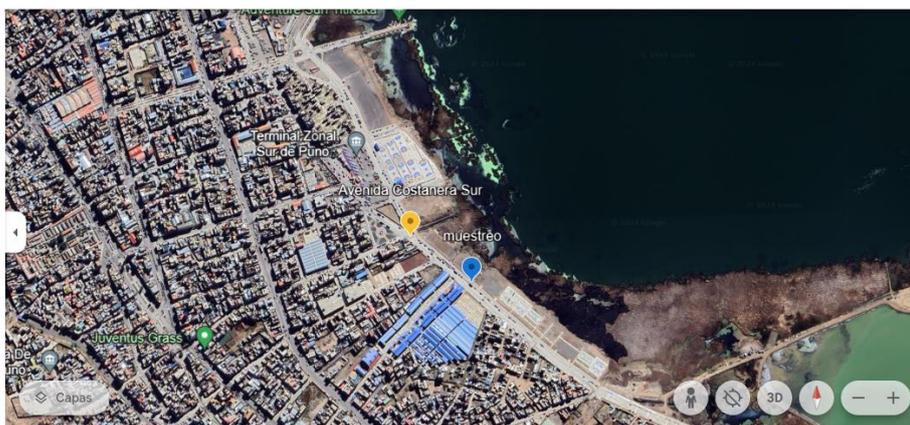
*Zona de muestreo de aguas en C.P.M. Salcedo*



Nota. Google Earth.

### Figura 12

*Zona de muestreo de aguas en la costanera sur*



Nota. Google Earth.

## 3.3 Muestra

La muestra se considera a un subgrupo representativo de la población o el universo (Arias, 2020); uno de los principales objetivos de las investigaciones científicas es poder realizar generalizaciones a partir de una muestra, para lograr este objetivo debe ser representativa (Cruz del Castillo et al., 2014)

En este contexto el muestreo se llevó a cabo en los tres puntos de la población muestral, y aplicando el muestreo aleatorio simple del procedimiento tipo probalístico; se seleccionó un grupo de 8 muestras de agua de 1000 ml, y cada una de ellas de diferentes pH entre los rangos de 6,5 a 7. Las variables obtenidas son cuantitativas, donde se determinaron los promedios en función del tamaño muestra. Luego se llevó a cabo el análisis de las concentraciones del hierro en cada uno de los componentes.

### 3.4 Método de investigación

La investigación se basa en el método cuantitativo, de nivel explicativo, de tipo experimental y a escala de laboratorio. La investigación de un enfoque cuantitativo permite generalizar los resultados de manera más amplia, brinda control sobre los fenómenos y ofrece una perspectiva basada en la posibilidad de replicación y el enfoque en aspectos específicos de los fenómenos estudiados y en cuanto a su naturaleza de tipo explicativo; se centra en buscar las causas de los eventos y fenómenos físicos estudiados. (Hernandez Sampieri et al., 2010)

Para nuestro trabajo de investigación se considera como parámetro en la oxidación; una sola variable dependiente (objetos de hierro) y como variable independiente al agua y pH. Los primeros estudios cualitativos sobre la oxidación de los objetos de hierro consideraron que la degradación de estos dependía fundamentalmente de un solo parámetro y que vinculaban la oxidación con la variable de cada proyecto científico, además consideraba más importante el fenómeno de la oxidación. Este enfoque dio lugar a las tablas muy sencillas, con una aplicabilidad muy limitada debido a la consideración de un solo factor en el mecanismo de degradación. Así tenemos que la tabla 2 muestra la relación entre oxidación y el pH desarrollada por ASTM Internacional (Hack y Veleva, 2005)

**Tabla 2**

*Clasificación de la oxidación en función del pH*

pH	Grado de corrosión
>12	Bajo
7,5 -12	Moderado
4 – 7,5	Alto
>4	Muy alto

*Nota.* ASTM Internacional.

### 3.5 Descripción detallada de métodos por objetivos específicos

#### 3.5.1 Determinar las reacciones de oxidación y reducción en el estudio de la oxidación de objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno

Para determinar el proceso de oxidación y reducción en los objetos de hierro, se realizó la búsqueda bibliográfica a través de diversas fuentes, con el fin

de recopilar información sobre la oxidación del hierro en aguas con diferentes pH. Posteriormente se realizó pruebas experimentales con el fin de observar y evaluar el comportamiento del hierro (acero AISI 1018) frente a las aguas de diferentes pH mediante técnicas electroquímicas debido a que sobre la pieza de hierro que se oxida existen zonas anódicas y catódicas. La adsorción de moléculas de oxígeno de la atmósfera y en el agua es el punto de partida de una reacción de oxidación, que continúa con la nucleación de óxidos y la formación de una fina capa de óxido sobre la superficie, que luego crece hasta formar una capa más gruesa (Khanna, 2002)

## **A. Procedimiento metodológico**

Para llevar a cabo la determinación de las reacciones de oxidación y reducción se diseñó el proceso de la oxidación electroquímica en vista que el objeto de hierro entra en contacto con un líquido o electrolito, agua con diferentes pH obtenidos de las zonas de muestreo; produciendo una serie de reacciones anódicas y catódicas simultáneamente. Para ello es importante conocer las variables consideradas en el presente estudio, y son:

### **A.1 Aire atmosférico**

La oxidación en la atmosfera está determinada por la presencia en ella de oxígeno, agua y anhídrido carbónico y de estos tres constituyentes el agua tiene capacidad oxidante, que aumenta con la acidez de la disolución. El oxígeno puede considerarse constante y las variaciones del anhídrido carbónico si bien son relativamente grandes. Su cantidad en la atmosfera es pequeña, por lo que estas pierden importancia.

### **A.2 Agua**

La oxidación se produce por mojado, ello cuando se expone los objetos de hierro en agua de lluvia u otras fuentes de agua (Lara,S). El agua es un disolvente oxidante. Sus protones tienen la capacidad de oxidar, que aumenta con la acidez de la disolución. El aire contiene humedad.

El objeto de hierro que se utilizó en las pruebas experimentales se fue el acero AISI 1018, debido a que este metal es el más utilizado en las diferentes industrias (metal mecánico, construcciones civiles y otras). Su composición química se adecua para dichos usos. (Tabla 3).

**Tabla 3**  
*Composición del acero AISI 1018*

Acero	Fe %	C %	P %	S %	Mn %
AISI 1018	98,00	0,18	0,04 máx.	0,05	0,8-0,9

*Nota.* Catálogo de AASA.

## **B. Fase experimental**

Entre los principales equipos y materiales, fueron:

### **B.1 Equipos**

- pH metro manual Pen Type Meter
- Espectrofotómetro de Emisión Atómica Marca: AGILENT TECHNOLOGIES/Modelo: 4210/Serie: MY20339003.
- Potenciostato/Galvanostato PGSTAT 302N
- Celdas electrolíticas ASTM

### **B.2 Materiales**

- EPP
- Fiola de 200 ml
- Balde de 5 litros
- Botellas para la recolección del agua
- Objetos de hierro (Perno de 2 pulg., clavos de 4 y 8 pulg.)
- Vasos precipitados de vidrio de 300 ml

### **B.3 Metodología de ensayos**

Para llevar a cabo la investigación, consideramos la oxidación electroquímica y es importante tener en cuenta que las reacciones de oxidación y reducción implican la transferencia de electrones de un átomo oxidado a otro reducido; es decir reacción anódica (ánodo) producción de

electrones y reacción catódica (cátodo) consumo de electrones. Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, previamente se rotulo los vasos según el pH de acuerdo con los valores de 6,0 a 7,4. Se utilizo 6 muestras de agua seleccionadas de las zonas de muestreo y se vierte 200 ml en los vasos precipitados, luego colocamos el objeto de hierro (acero AISI 1018); al cabo del tiempo (entre unas horas y 10 días) analizamos que reacciones químicas que se producen a diferentes pH en cada una de las muestras objeto de estudio.

**Tabla 4***Experimentos realizados a diferentes pH*

Experimento	Muestra de agua	pH	Objeto de hierro
1	Zona 1*	Agua común	Acero 1018
2		7,4	Acero 1018
3	Zona 2**	6,8	Acero 1018
4		7,0	Acero 1018
5	Zona 3***	6,0	Acero 1018
6		6,5	Acero 1018

*Nota.* Zona 1\*: Muestreo de aguas Ciudad Universitaria. Zona 2\*\*: Muestreo de aguas Costanera Sur. Zona 3\*\*\*: Muestreo de aguas C.P.M. Salcedo Av. Estudiante.

### 3.5.2 Determinar el periodo de tiempo en el estudio de la oxidación de objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno

Para evaluar el tiempo de la oxidación de los objetos de hierro, comercialmente conocido acero AISI 1018 expuestos en medios de agua con pH 6,5 y 7,4; se aplicó la técnica del método electroquímico consistente en la determinación de curvas de polarización de Tafel, lo que nos permitió determinar los mecanismos y la velocidad de la oxidación en función del tiempo. Así mismo mediante los diagramas de Pourbaix en función de los cambios en el pH y el potencial determinamos en el estado en que se encuentran el objeto de hierro y disoluciones.

Dentro los factores que influyen en la oxidación de los metales está el efecto del tiempo, existe una relación lineal, es decir conforme se incrementa el tiempo de exposición se incrementa la tasa de oxidación; en otros casos la tasa de

oxidación puede disminuir o permanecer en un valor constante (National Association Of Corrosion Engineers).

## **A. Procedimiento metodológico**

Para el cumplimiento del segundo objetivo específico del presente trabajo de investigación se realizó tomando como material de trabajo a un objeto de hierro (acero AISI 1018) y como electrolito muestras de agua de las zonas de Salcedo y de la Universidad cuyos pH se encuentra en 6,5 y 7,4 respectivamente. Se siguió mediante 3 etapas, así como:

- i. Toma de muestras
- ii. Ensayos de laboratorio
- iii. Análisis estadístico

### **A.1 Toma de muestras**

La recolección y posterior análisis de las muestras se realizaron de manera que no se produzcan alteraciones importantes en su composición antes de llevar a cabo los ensayos, dado que estos datos influyen en los resultados analíticos que facilitan la interpretación de las propiedades de la calidad del agua. Por lo tanto, fue necesario emplear envases que faciliten la recolección y el traslado de las muestras, siendo los más apropiados para este proyecto.

En este caso, en el que se busca establecer la concentración de hierro, el recipiente a emplear, conforme a lo establecido en el manual de procedimientos de ensayo para agua potable, debe tener un volumen mínimo de 1 litro y puede ser de polietileno de alta densidad o de vidrio. El recipiente debe ser limpiado con ácido nítrico, un preservante que se emplea para reducir al mínimo las reacciones químicas, físicas y biológicas que puedan surgir durante el traslado y almacenaje de las muestras.

Para llevar a cabo este estudio de investigación, se emplearon recipientes de polietileno de alta densidad (Fig. 13) para recolectar

muestras de agua depositadas, que luego fueron transportados al laboratorio para su análisis de concentración de hierro.

### **Figura 13**

*Envases de polietileno de alta densidad*



## **A.2 Ensayos de laboratorio**

### **• Ensayos de la concentración del hierro**

Se trabajo con las muestras de agua de los sectores de estudio y que fueron seleccionados mediante un proceso aleatorio probalístico simple, para nuestro trabajo de investigación se seleccionaron agua con pH 6,5 y 7,0. Antes de realizar el análisis espectroscópico por absorción atómica, las muestras con material particulado o materia orgánica suelen necesitar un pretratamiento. Para liberar todo el hierro presente en la materia suspendida o coloidal, se someten previamente a un pretratamiento de digestión. Para el análisis de lectura directa, se puede descartar el pretratamiento de digestión para muestras de agua potable, transparentes, incoloras e inodoras con una turbiedad inferior a 1 UNTs. (CERTIMIN)

Para la realización del análisis de las muestras se aplica energía en forma de radiación monocromática propia del elemento a examinar, la cual se extrae de una lámpara de cátodos vacíos. Una fracción de muestra es aspirada hacia una llama aire – acetileno posicionado en el paso óptico de un espectrofotómetro de absorción atómica (anexo 4). La muestra bajo estas circunstancias se atomiza. El estado elemental de la población de átomos absorbe radiación específica proveniente de una fuente de emisión de líneas atómicas de hierro, la relación entre potencia incidente y potencia

transmitida es un indicador de la concentración del elemento en la muestra. (CERTIMIN).

La cuantificación del hierro de las diferentes muestras se realizó en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería de Minas de la UNA-PUNO, Laboratorio de Medio ambiente con el Espectrofotómetro de Emisión Atómica Marca: AGILENT TECHNOLOGIES/Modelo: 4210/Serie: MY20339003. Así mismo se trabajaron diferentes muestras según el diseño experimental, resultados que fueron cuantificados para su posterior evaluación. En la tabla 5 se expone los resultados obtenidos:

**Tabla 5**

*Análisis de muestras de agua*

Muestra	pH	Tiempo	Elemento	ppm
M 08	7	10	Fe	< 0,49
M 08	7	0	Fe	< 0,52
M 01	6,5	0	Fe	< 0,52
M 01	6,5	10	Fe	< 0,51

*Nota.* Laboratorio de monitoreo y evaluación ambiental FIM-UNAP.

- **Ensayo electroquímico**

Para llevar a cabo estos ensayos electroquímicos se preparan las probetas de hierro (acero AISI 1018) según las normas ASTM G1(Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion test Specimens); esta norma hace referencia a la preparación y limpieza de las probetas que se van a exponer al electrolito, así como también la limpieza de las probetas para eliminar los productos de oxidación formados en la superficie de la probeta ocasionados por la exposición. Para llevar a cabo el ensayo se utilizó el potenciostato/galvanostato PGSTAT302N (anexo 5) del Laboratorio de Electro refinación y corrosión de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la UNA.

Los electrodos y electrolitos empleados en el desarrollo de las pruebas electroquímicas son:

- a. Electrodo de trabajo: Electrodo que está siendo investigado, objeto de hierro-acero AISI 1018
- b. Electrodo auxiliar: Facilita el flujo de corriente por la interface que se está investigando; material no contaminante, Acero inoxidable.
- c. Electrodo de referencia: Suministra una referencia estable de potencial en la que evaluamos el potencial del electrodo de trabajo. Se utilizó el Ag/Ag Cl.
- d. Electrolito: Muestras de agua de la zona de salcedo con pH 6,5 y de la zona de la Universidad FMVZ con pH 7,4, Promedio.

#### • Ensayo del método Tafel y Pourbaix

Las mediciones realizadas del ensayo electroquímico se registran para la elaboración de los datos, se efectúa un ajuste lineal de los datos conforme a la aproximación de Tafel. Se cuantifica la superficie del área que se encuentra afectada en el proceso (I densidad de corriente/Área del electrodo de trabajo) y el potencial, con el objetivo representar  $\log i$  y lograr  $i_{corr}$  y finalmente la velocidad de oxidación.

$$r = 0,13 \frac{i_{corr*eg}}{\rho}$$

Mediante la aplicación del diagrama de potencial-pH (Pourbaix) se obtuvieron datos respecto a la termodinámica entre el objeto de hierro (acero AISI 1018) y el medio, en nuestro caso el medio es el agua a diferentes pH. Y nos mostrara las zonas localizadas: Zona de pasividad (metal no atacado), zona de inmunidad (metal forma una capa estable) y la zona de corrosión (metal afectado por la corrosión). (M.Pourbaix;2012).

#### A.3 Ensayo estadístico

Se aplico el diseño experimental dos factores fue  $2^k$  siendo  $k=2$ . El diseño  $2^k$  resulta especialmente beneficioso en las etapas iniciales del trabajo experimental. Este diseño ofrece la menor cantidad de corridas que permite el análisis  $k$  factores en un diseño factorial integral. Por lo tanto, estos diseños son muy utilizados en los experimentos de tamizado o selección de factores de estudio. (Gutierrez y De la Vara, 2012) (Tabla 6

y 7). La matriz de diseño se realizó de acuerdo a los niveles de los efectos, de los factores en estudios Factor A: pH y el Factor B: tiempo:

**Tabla 6**

*Matriz de diseño*

Factor		Combinación de	
A	B	Tratamientos	
-	-	(1)	A bajo, B bajo
+	-	a	A alto, B bajo
-	+	b	A bajo, B alto
+	+	ab	A alto, B alto

Para este estudio se ha utilizado un modelo estadístico de  $2^2$ , con 2 réplicas por combinación.

**Tabla 7**

*Factores y valores por nivel*

Variables	Niveles		Concentración ppm
	Bajo	Alto	
pH	1	3	
t: tiempo, días	6,5	7	
	0	10	

**Tabla 8**

*Diseño para desarrollo estadístico*

BLOQUE	pH unidad	tiempo día	Concentración ppm
1	6,5	0,0	0,53
1	7,0	0,0	0,48
1	6,5	10,0	0,54
1	7,0	10,0	0,49
2	6,5	0,0	0,53
2	7,0	0,0	0,48
2	6,5	10,0	0,55
2	7,0	10,0	0,49

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Resultados

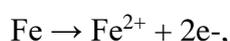
##### 4.1.1 Determinar las reacciones de oxidación y reducción en el estudio de la oxidación de objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno

Para investigar el primer objetivo, consiste en estimar la severidad de oxidación que va a experimentar el acero 1018 cuando reaccione con determinados pH del agua. Método basado en datos de laboratorio para estudiar el comportamiento de la oxidación del hierro a través del estudio de la evolución de oxidación en pequeñas muestras de metal; generándose una alteración en la apariencia de los objetos de hierro y diferentes reacciones químicas.

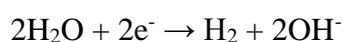
##### A. Resultados de pruebas de la oxidación de los objetos de hierro

Se realizó un montaje como se indica en el anexo 6, se introduce el acero 1018 (clavo, perno) en agua de diferentes pH y expuestos durante 10 días; registrándose los siguientes resultados:

En la prueba 1 donde el acero 1018 está sumergida en agua común, que contiene algunas sales y algo de oxígeno disuelto. Se produce una reacción de oxidación (zonas anódicas) en el acero 1018, mientras que en el resto se produce una reacción de reducción (zonas catódicas). En concreto, las semirreacciones que se producen son la oxidación del hierro en las zonas anódicas



y la reducción del oxígeno y/o del agua en las zonas catódicas



La importancia relativa de estas dos semirreacciones de reducción estará determinada por la concentración de oxígeno en disolución y por el pH. La oxidación del acero 1018 es relativamente lenta.

En la prueba 2, el acero 1018 está sumergido en agua con pH 7,0 en medio neutro, la reacción global es, fundamentalmente:



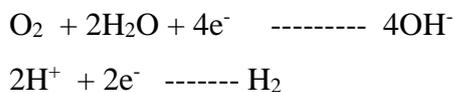
Seguidamente, el  $\text{Fe}^{2+}$  se oxida con el oxígeno disuelto en el agua, dando lugar a óxido férrico hidratado (herrumbre), de color pardo rojizo,

Resumiendo, la reacción global es:



Por tanto, el acero 1018 se oxida y se convierte en óxido de hierro (III) hidratado (herrumbre). El precipitado coloidal de color pardo rojizo que se observa en la disolución es óxido férrico hidratado. (Cockris y reddy)

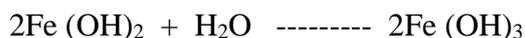
En las pruebas 3, donde el acero 1018 está sumergido en agua con pH 6,5, ocurre que el acero 1018 cuando está en medio ácido la reacción en la producción del óxido de hierro (III) hidratado es más intensa y rápida, debido a que libera iones hidrógeno en la forma de hidrógeno gas ( $\text{H}_2$ ) desplazados por el hierro. En ausencia de oxígeno, se forma  $\text{H}_2$  en el cátodo:



Los iones hidroxilo migran al ánodo a través del electrolito combinándose con los cationes  $\text{Fe}^{2+}$  liberados en la reacción anódica para formar hidróxido ferroso, de color verdoso:



El proceso de oxidación continúa en presencia de humedad, para formar hidróxido férrico, de color rojizo.



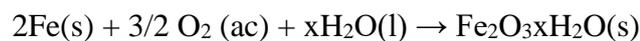
En las pruebas 4, el acero 1018 es sumergido en agua con pH 7,4, básicos, moderado, prácticamente puede decirse que ha desaparecido uno de los factores de oxidación. Esto debido a que óxidos o hidróxidos de los metales son insolubles y tienden a depositarse formando una capa protectora. La disminución de la capacidad oxidante de la disolución se debe al aumento de la concentración de los iones OH<sup>-</sup>, pues implica un decremento en los potenciales de reducción del oxígeno y/o agua. (Atkins)

**Tabla 9**

*Resultados de la prueba de oxidación del hierro en agua de diferentes pH, en un tiempo de 10 días*

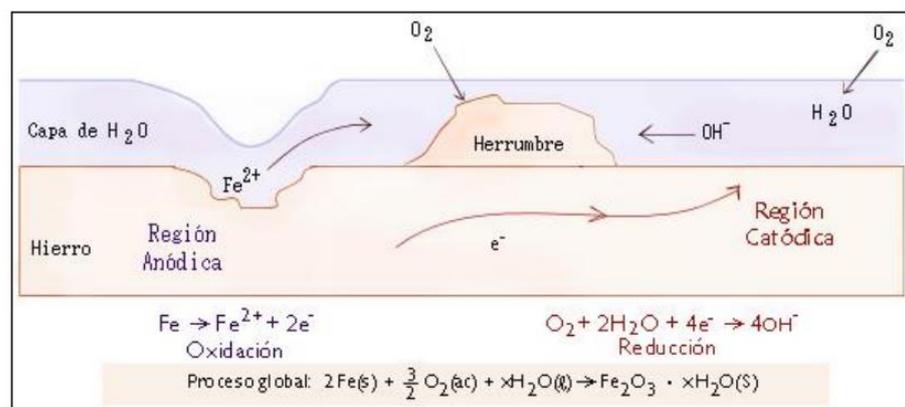
Prueba	Metal	Solución	pH	Grado de Corrosión	Reacciones de oxidación
1				Lenta	$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$ ,
2	Acero	Agua	7,0	Alto	$2Fe + 3/2 O_2 + x H_2O \rightarrow Fe_2O_3 \cdot xH_2O$
3	1018		6,5	Alto	
4			7,4	Moderado	$2Fe(OH)_2 + H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_3$ $Fe + 2H_2O \rightarrow Fe^{2+} + H_2 + 2OH^{-}$

En la figura 14, tenemos la representación gráfica del proceso de oxidación del hierro en un medio ácido, donde se forma el herrumbre. (Chandia C. y Hernández H., 2009). El proceso global de la oxidación del hierro se resume en la siguiente ecuación:



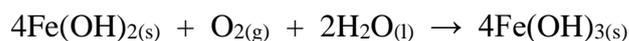
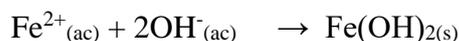
**Figura 14**

*Representación de las etapas de la oxidación del hierro en medio ácido*



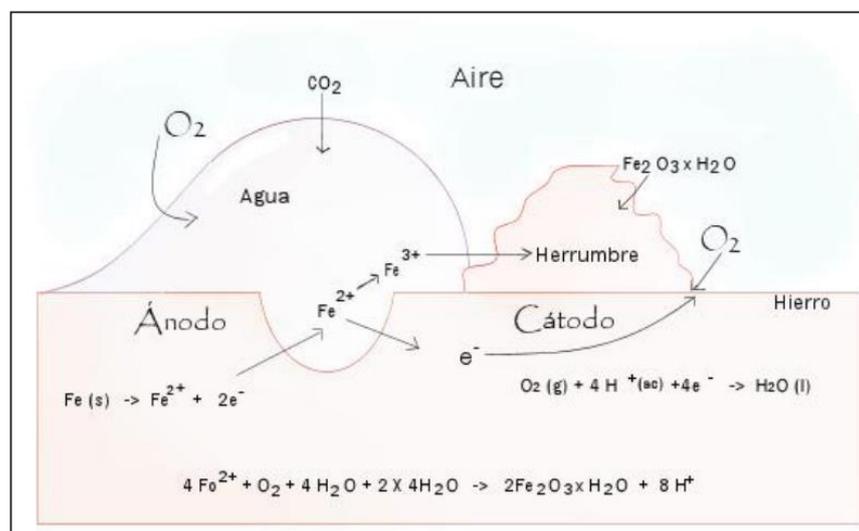
Nota. Chandia C. y Hernández H. (2009).

En medio neutro o débilmente básico, el proceso de oxidación del hierro se representa en la figura 14; en esta etapa se forma el hidróxido de hierro (II), el cual se oxida a hidróxido de hierro (III) y este se convierte en óxido de hierro (III) llamada herrumbre (Chandia C. y Hernández H., 2009). Se representa en las siguientes ecuaciones:



### Figura 15

*Representación de las etapas de oxidación del hierro en medio neutro o básico*



Nota. Chandia C. y Hernández H. (2009).

## B. Discusión

A partir de los resultados obtenidos se pudo identificar una experiencia comparativa de las reacciones químicas que se producen en el acero 1018 sumergido por la acción corrosiva del agua con diferentes pH, se deduce que existe una marcada diferencia entre agua de pH ácidos, agua de pH neutro y agua de pH básicos; observándose que en las pruebas realizados, agua acida a pH = 6,5 el proceso de oxidación del acero 1018 es más rápida y espontaneo, se manifiesta en las primeras horas algo de hierro oxidado y al termino de 10 días gran parte del hierro se encuentra oxidado con la formación de herrumbre y un cambio en el color de la

disolución. Por lo tanto, el proceso de oxidación del hierro ocurre con mayor velocidad e intensidad que en los otros sistemas (Silberberg, 2002). Esto sucede, cuando los protones necesarios son proporcionados por cualquier ácido, como el  $\text{CO}_2$  atmosférico disuelto en el agua, además de la precipitación ácida en las áreas más contaminadas. Es conocido que el agua no posee una concentración de protones 1 Molar, por lo que la posibilidad de una reacción global sería algo reducida, pero también positiva lo que señala que el proceso es espontáneo (McMurry, 2009). (ver figura 15).

En relación al agua básica, con un  $\text{pH} = 7,4$ , en las primeras horas no se perciben señales de corrosión, sin embargo, pero tras 10 días se nota una gran cantidad de hierro oxidado. Esto señala que el proceso de oxidación del hierro es más pausado y/o moderado a un  $\text{pH}$  levemente básico, a pesar de la presencia de electrolitos en el agua, que facilitan una mayor velocidad en el proceso de oxidación. Sin embargo, es probable que el medio levemente alcalino tenga un impacto considerable en la intensidad y velocidad del proceso de oxidación del hierro. Asimismo, sucede cuando el agua es neutra,  $\text{pH} = 7,0$ , en la que el oxígeno se transforma en ion hidróxido (ver figura 16) con un potencial inferior al medio ácido. Esto facilita que el proceso de oxidación del hierro en agua neutra se realice con menor intensidad y velocidad que en el agua ácida.

En todos los experimentos, simbolizan el gasto de oxígeno del aire utilizado para la oxidación del hierro. Por ende, existe una correlación directa entre el agua a distintos  $\text{pH}$  y la velocidad e intensidad de la oxidación del hierro. Además, se evidencia que la oxidación no solo es el resultado de un único factor, sino que es un fenómeno provocado por diversas propiedades del agua, oxígeno, que influyen de forma conjunta la degradación del hierro. La tabla 6, presenta la correlación entre el  $\text{pH}$  y la corrosión, elaborado por ASTM Internacional (Hack y Veleva, 2005).

#### 4.1.2 Determinar el periodo de tiempo en el estudio de la oxidación de objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno

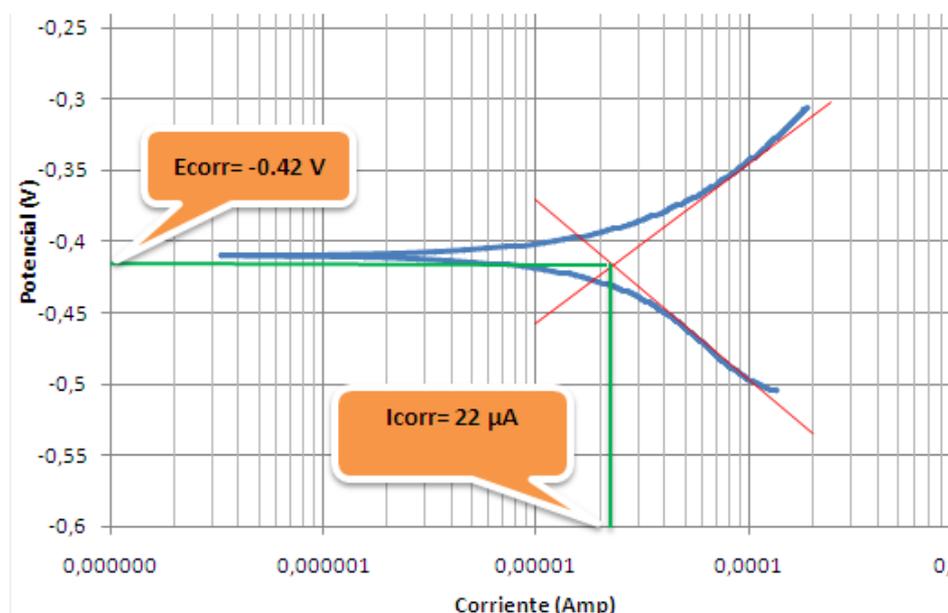
Respecto del segundo objetivo específico, mediante técnicas electroquímicas de ensayos de polarización obtenidos mediante el Potenciostato/galvanostato PGSTAT 302N, figuras 16 y 17 y curvas de extrapolación de Tafel, se obtuvo la velocidad de oxidación en función al tiempo de oxidación del objeto de hierro.

Los resultados de los ensayos de polarización son:

##### A. Hierro en muestras de agua pH 7,4

**Figura 16**

*Curva de polarización del hierro – Agua pH 7,4*



Calculo de los datos según los metodos de Tafel

$$I_{corr} = 22 \mu A$$

$$A = 5 \text{ cm}$$

$$I_{corr} = \frac{I_{corr}}{A} = \frac{22}{5} = 4,4 \frac{\mu A}{cm}$$

$$E_{corr} = -0,42 \text{ V}$$

$$\text{Densidad del Fe} = 7,86 \text{ gr/cm}^3$$

Peso Atomico = 55,85

$$\text{Peso equivalente} = \frac{\text{Peso atomico}}{\text{Numero de valencia}} = \frac{55,85}{2} = 27,925$$

Hallamos la velocidad de oxidacion:

$$r = 0,13 \frac{i_{corr} * e_g}{\rho}$$

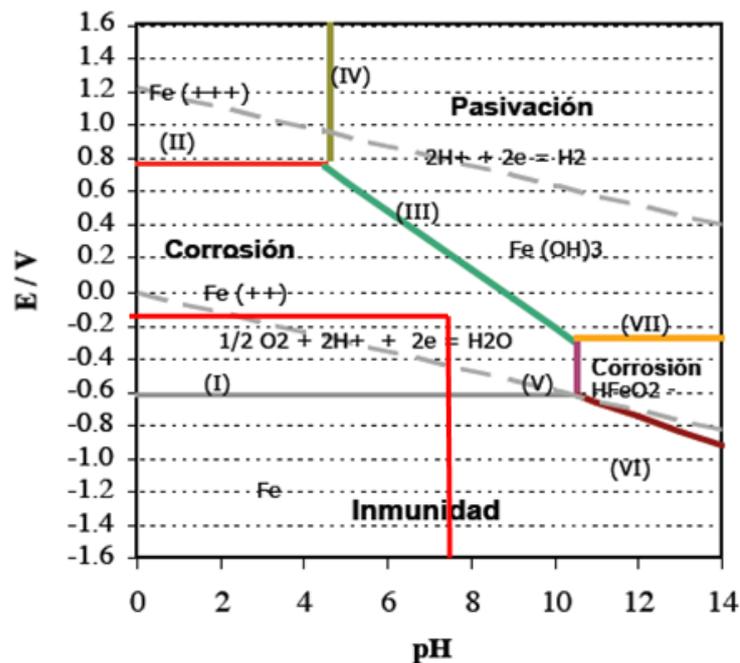
$$r = 0,13 \frac{4,4 * 27,925}{7,86} = 2,032 \text{ miles/año}$$

$$r = 51,613 \text{ Micrones/año}$$

$$r = 0,051613 \text{ mm/año}$$

**Figura 17**

*Diagrama de Pourbaix para el sistema Fe-Agua pH 7,4*

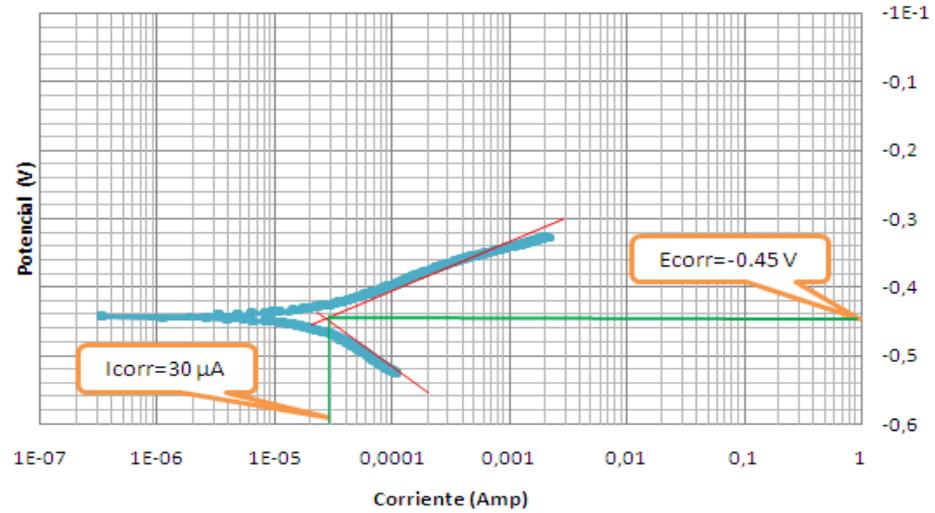


El potencial de equilibrio para la reacción hierro en contacto con el agua de las muestras tomadas en la Universidad (FMVZ y FCA), es de  $-0,42 + 0,24 = -0,18$  a un pH de 7,4 y su velocidad de oxidación es de 0,052.mm/año. Así como también observamos fig. 17, que el hierro se encuentra en la zona entre las dos líneas discontinuas, lo que indica una velocidad de corrosión moderada.

## B. Hierro en muestras de agua pH 6,5

**Figura 18**

*Curva de polarización del hierro – Agua pH 6,5*



Calculo de los datos:

$$I_{corr} = 30 \mu A$$

$$A = 5 \text{ cm}$$

$$I_{corr} = \frac{I_{corr}}{A} = \frac{30}{5} = 6 \frac{\mu A}{Cm}$$

$$E_{corr} = -0,45 \text{ V}$$

$$\text{Densidad del Fe} = 7,86 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Peso Atomico} = 55,85$$

$$\text{Peso equivalente} = \frac{\text{Peso atomico}}{\text{Numero de valencia}} = \frac{55,85}{2} = 27,925$$

Hallamos la velocidad de oxidacion:

$$r = 0,13 \frac{i_{corr} * e g}{\rho}$$

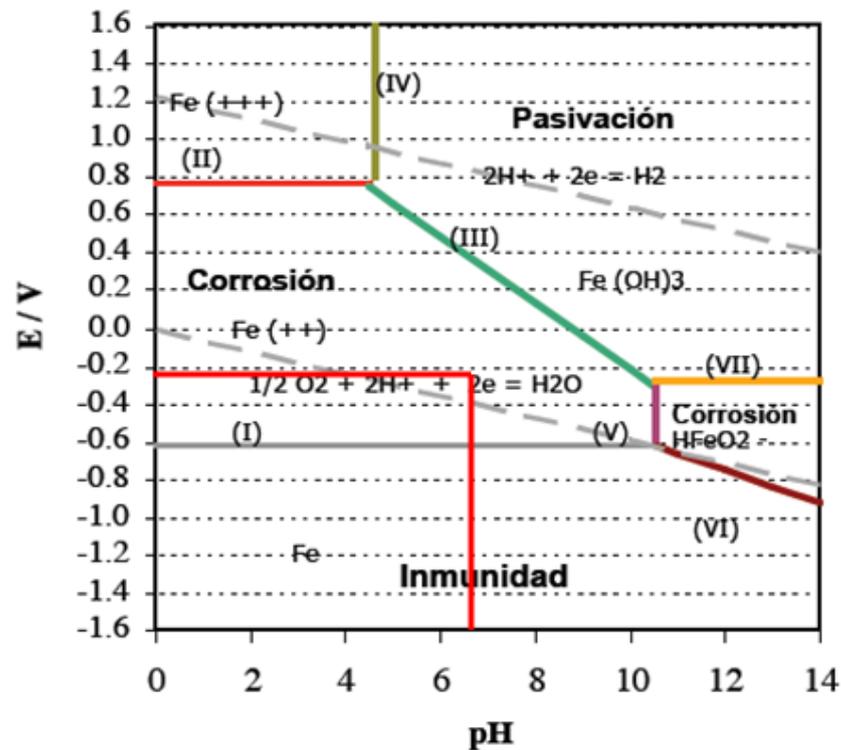
$$r = 0,13 \frac{6 * 27,925}{7,86} = 2,771 \text{ miles/año}$$

$$r = 70,383 \text{ Micrones/año}$$

$$r = 0,073 \text{ mm/año}$$

**Figura 19**

Diagrama de pourbaix para el sistema Fe-Agua pH 6,5



El potencial de equilibrio para la reacción del hierro con el agua de las muestras tomadas en la zona de Salcedo, es de  $-0,45 + 0,24 = -0,21$  a un pH de 6,5 y su velocidad de corrosión es de 0,073 mm/año. También observamos la fig. 19 que el hierro se encuentra en la zona entre las dos líneas discontinuas, cerca de la línea discontinua inferior lo que indica una alta velocidad de corrosión.

**Tabla 10**

Velocidad de oxidación de aceros de bajo carbono

Ensayos	Densidad de corriente Icorr $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Velocidad de oxidación mm/año
pH 6,5	30	0,073
pH 7,4	22	0,052

La tabla 10 resume los datos medidos en la ejecución de ensayos mediante las curvas de polarización de Tafel.

### C. Resultados de ensayos estadísticos

La matriz de diseño se visualiza en la tabla 6 y 11.

**Tabla 11**

*Resultados de la concentración del hierro*

<i>Ejecución</i>	<i>bloque</i>	<i>pH</i> <i>Unidad</i>	<i>Tiempo</i> <i>Día</i>	<i>Concentración</i> <i>Ppm</i>
1	1	6,5	0,0	0,53
2	1	7,0	0,0	0,48
3	1	6,5	10,0	0,54
4	1	7,0	10,0	0,49
5	2	6,5	0,0	0,53
6	2	7,0	0,0	0,48
7	2	6,5	10,0	0,55
8	2	7,0	10,0	0,49

### D. Aplicación de la prueba estadística

Se aplicó el diseño experimental 2<sup>2</sup>, se consideran dos variables pH y tiempo cada uno con dos niveles, para el pH 6,5 – 7 y para el tiempo 0 – 10 días; con dos bloques.

### E. Efectos estimados por el software Statgraphics

El diseño elegido tiene ocho ejecuciones, cada una con una muestra para tomar. El modelo por defecto tiene interacciones de dos factores y cuatro coeficientes.

**Tabla 12**

*Efectos estimados como resultado de la oxidación.*

<i>Efecto</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estd.</i>	<i>V.I.F.</i>
Promedio	0,51125	0,00125	
A: Ph	-0,0525	0,0025	1,0
B: Tiempo	0,0125	0,0025	1,0
AB	-0,0025	0,0025	1,0
Bloque	0,0025	0,0025	1,0

Errores estándar basados en el error total con 3 g.l.

La Tabla 12, exhibe las proyecciones de cada uno de los efectos e interacciones proyectados, así como el error estándar de cada uno de estos efectos, que calcula se error de muestreo. Además, se nota que el mayor factor de inflación de varianza más grande, o VIF, es igual a 1,0.

**Tabla 13**

*Análisis de varianza para concentración de hierro por oxidación*

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:pH	0,0055125	1	0,0055125	441,00	0,0002
B:Tiempo	0,0003125	1	0,0003125	25,00	0,0154
AB	0,0000125	1	0,0000125	1,00	0,3910
Bloques	0,0000125	1	0,0000125	1,00	0,3910
Error total	0,0000375	3	0,0000125		
Total (corr.)	0,0058875	7			

- R-cuadrada = 99,3631 por ciento.
- R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 98,5138 por ciento.
- Error estándar del est. = 0,00353553.
- Error absoluto medio = 0,001875.
- Estadístico Durbin-Watson = 2,83333 (P = 0,7925).
- Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,458333.

En la tabla 13, se encuentra diferencia altamente significativa entre pH 6,5 y pH 7,0 puesto que el valor p igual a 0,0002 menor que  $\alpha = 10,05$  y tienen un nivel de confianza del 95,0 %. Como también entre los tiempos 0 y 10 hrs. Existe diferencia significativa puesto que p igual 0,0154 menor a  $\alpha = 0,05$

El modelo ajustado aplica  $R^2 = 99,3631$  % de la variabilidad en concentración. El estadístico R-cuadrado ajustado de 98,5138 % indica de la variabilidad de la concentración (ppm). El error estándar de desviación estándar de los residuos es 0,00353553. El valor promedio de los residuos es 0,001875, que es el error medio absoluto (MAE). No hay indicación de auto correlación serial en los desechos con un nivel de significancia del

5,0 %, según el estadístico (Durbin-Watson), que el valor-P es superior al 5,0 %.

**Tabla 14**

*Coefficiente de regresión y modelo matemático, oxidación del hierro*

<i>Coefficiente</i>	<i>Estimado</i>
Constante	1,18
A:pH	-0,1
B:Tiempo	0,008
AB	-0,001

Se presenta la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Concentración} = 1,18 - 0,1 \cdot \text{pH} + 0,008 \cdot \text{Tiempo} - 0,001 \cdot \text{pH} \cdot \text{Tiempo}$$

**Tabla 15**

*Matriz de correlación para los efectos estimados*

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
(1) promedio	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
(2) A:pH	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000
(3) B:Tiempo	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000
(4) AB	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000
(5) bloque	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000

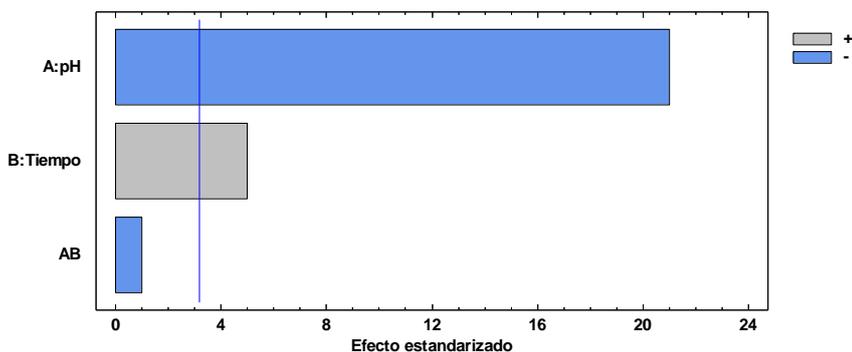
Según los resultados de la investigación, no hay correlación entre ninguno de los efectos. Para todos esos efectos, se estimarán "limpios".

## **F. Otros resultados estadísticos**

Se tiene el diagrama de Pareto. Efectos principales y superficie de respuesta.

**Figura 20**

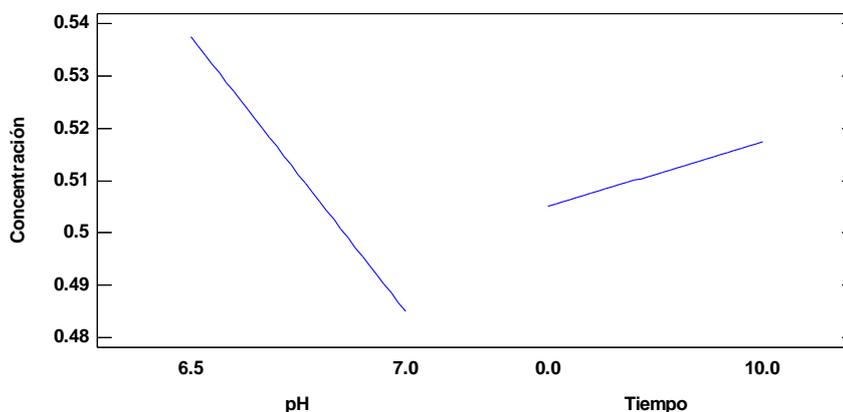
*Diagrama de Pareto*



La figura 20, nos muestra que el factor A que es el pH es más significativo, seguido del factor B que es el tiempo. Por las características del diseño, la interacción del factor AB continúa en significancia.

**Figura 21**

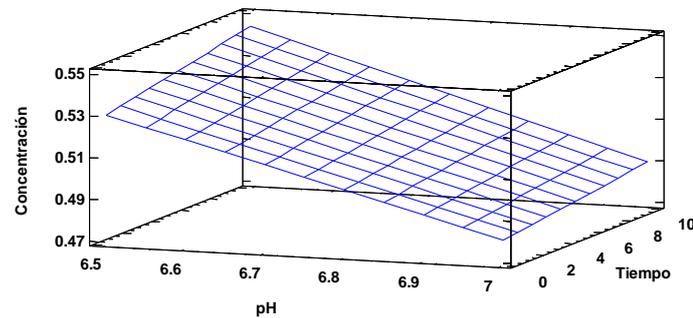
*Efectos principales*



La figura 21, muestra los efectos principales de la concentración de hierro por oxidación. La curva de la variable pH presenta una pendiente negativa lo que nos indica que a mayor pH la solubilidad u oxidación será menor, con una alta sensibilidad. La curva de la variable tiempo presenta una pendiente positiva, lo que implica una relación directa, a mayor tiempo mayor oxidación, sin embargo, la sensibilidad se puede considerar como de pequeña magnitud.

**Figura 22**

*Superficie de respuesta.*



La figura 22, presenta contornos de superficie de respuesta para la concentración de hierro en solución por oxidación. La concentración es de 0,55 ppm de hierro para 10 días de exposición.

## 4.2 Discusión

El desarrollo del método electroquímico aplicando las curvas de extrapolación de Tafel nos permitió la detección de la velocidad de oxidación en función al tiempo de los aceros de bajo carbono de la ciudad de Puno colocados en un medio (agua) con pH de 6,5 y 7,4, permitiéndonos examinar los datos cuantitativos de manera numérica, apoyados frecuentemente en la estadística.

Esto se explica por la teoría de Wagner y Traud (2000) que demostró que se puede determinar la velocidad de corrosión de la reacción mediante procedimientos electroquímicos, consiguieron una correlación positiva de la velocidad de oxidación a través de curvas de polarización, utilizando lo que actualmente se conoce como “extrapolación de Tafel”.

De los resultados obtenidos en el presente estudio de tesis y con el propósito de precisar la relación existente entre la velocidad de oxidación (tiempo) en función del pH, se ha comprobado que, con los ensayos realizados, agua con un pH 6,5, el valor de intensidad de corriente es de 30  $\mu$ /A, por lo tanto, la velocidad de oxidación es significativo siendo 0,073 mm/año esto se debe a que existe una mayor transferencia de carga en los valores de pH ácido. En cambio, con soluciones de agua pH 7,4 la intensidad es de 22  $\mu$ /A, como resultado la velocidad de oxidación es de 0,052 mm/año, en consecuencia, la velocidad de oxidación decrece.

Cobo (2001) en sus investigaciones sobre la velocidad de corrosión del acero, señala que a medida que se reduce el pH, que cuando es muy elevado, suele ser extremadamente corrosivos. La velocidad de corrosión en relación al pH se ve afectado por la composición del electrolito. Al incrementar la concentración del ion hidrogeno, la solución se torna más acida y el valor de pH disminuye. El pH nos muestra la cantidad de acidez o alcalinidad presente en el entorno. Esta magnitud se muestra a través de una escala donde el número siete señala que la solución es pH neutro; es neutra; los números inferiores a siete señalan que es acida y los mayores son alcalinas.

En consecuencia, los objetos de hierro cuando están sumergidos en aguas pH acidas la velocidad de oxidación es mayor; por encima de las pH neutras y alcalinas; en relación a los valores de intensidad ocurre en forma parecida, se concluye que la velocidad de oxidación de los objetos de hierro es mayor en presencia de agua de pH ácidos.

Analizando los diagramas de Pourbaix, con la finalidad de determinar y predecir las zonas de inmunidad, corrosión y pasivación del objeto de hierro en agua de pH 6,5 y 7,4; de los resultados obtenidos podemos deducir claramente que el agua con un pH de 6,5 y un potencial de -0,21V, el hierro se encuentra en la región de las líneas discontinuas, produciéndose el inicio de la destrucción del estado pasivo, por lo tanto, significa una oxidación activa y una alta velocidad de oxidación. En cambio, cuando el agua está a pH 7,4 y un potencial de -0,18, se encuentra en la zona de corrosión, indica que el hierro tiene una tendencia a oxidarse y la velocidad de oxidación es moderada. Esto se explica por la teoría de (Hernández, 2012). Los diagramas de Pourbaix, son ilustraciones graficas de la estabilidad de un metal, ósea, representan las condiciones en las que se halla en estado sólido (s), liquido (l), gaseoso (g) o acuoso (ac), y sus productos de corrosión, basándose en el potencial y el pH (acidez o alcalinidad). Estos diagramas pueden emplearse para anticipar el rumbo natural de las reacciones, calcular la estabilidad y la composición de los productos de corrosivos, y anticipar las modificaciones ambientales que prevengan o minimicen la corrosión.

En investigaciones de la (UNAM, 2009) efectuaron pruebas de pH y el potencial siguiendo las curvas de Pourbaix; calcularon el pH promedio de los tipos de agua 11 y 7,5, para exponerlos a los potenciales ánodos de 0,5V, 1,0V, 1,5V y 2,0V. Para cuantificar y conservar el potencial del ánodo en los valores previamente fijados, se empleó un electrodo de referencia de Ag/Cl, el cual se correspondía con el estándar de hidrogeno de

0,2V; obteniendo el siguiente resultado a pH ligeramente ácido, el hierro es bastante inestable con respecto a la oxidación, en cambio en soluciones oxigenadas el hierro se corroe mucho más lentamente.

Los resultados obtenidos mediante el diseño factorial  $2^2$ : Se observa que los efectos principales con respecto al factor A, pH, con un nivel de 6,5, se tiene una oxidación alta y con un nivel alto de pH 7,0, se tiene una oxidación baja y con respecto al factor B del tiempo, con un nivel de 00 horas, se tiene una oxidación baja y con un nivel de 10 horas se tiene una oxidación alta, se visualiza que el pH tiene una incidencia en el proceso de oxidación. En los efectos del proceso de pH 6,5 operando con un tiempo cero se tiene baja oxidación, y trabajando también con el pH 6,5 y tiempo alto 10 horas se tiene alta concentración de oxidación, con estos niveles de tiempo al operar con el nivel pH7 aumenta la oxidación, los resultados de las líneas paralelas, por lo tanto, existe interacción. Se tiene como conclusión que los efectos del proceso de oxidación a un nivel bajo de pH y un tiempo mayor, existe alta concentración de oxidación. Para el cumplimiento del desarrollo del estudio se han considerado teorías que apoyan a los resultados obtenidos: Gutierrez y De la Vara (2012). Tome en cuenta los factores A y B con niveles de prueba a y b ( $a, b \geq 2$ ), respectivamente. Con estos se puede elaborar el diseño o arreglo factorial a x b, que se compone de tratamientos a x b. Algunas situaciones específicas de uso frecuente incluyen: La factorial  $2^2$ , la factorial  $3^2$ . No obstante, existen varios ejemplos particulares del diseño factorial general que son relevantes debido a su aplicación extendida en la investigación y porque representan los fundamentos de otros diseños de gran relevancia práctica. El diseño  $2^k$  es de particular utilidad en las etapas iniciales del trabajo experimental, cuando probablemente se estén investigando muchos factores. (Montgomery, 2004). La velocidad de oxidación anódica durante la oxidación debe ser igual a la velocidad de reducción catódica porque la oxidación es un fenómeno que involucra reacciones anódicas y catódicas. Las curvas de polarización anódica y catódica nos darán un potencial de oxidación y una densidad de corriente de oxidación, que será proporcional a la velocidad de corrosión (Vargas y Gonzales Díaz, 2005).

## CONCLUSIONES

- En esta tesis doctoral se han llevado a cabo el estudio de la oxidación de objetos de hierro al ponerlos en un ambiente corrosivo, agua a diferentes pH (6,5 y 7,4); con la finalidad de evaluar que ocurren después de un cierto tiempo y calcular la velocidad de oxidación. Según las pruebas experimentales, los fundamentos teóricos y los antecedentes indican que los objetos de hierro desechados a la intemperie, estos se hacen muy sensibles a los efectos del medio ambiente (agua, pH, oxígeno y otros), por lo tanto, forman sustancias insolubles, produciéndose el fenómeno de la oxidación.
- Los óxidos de hierro se forman cuando el objeto de hierro es sometido a un ambiente corrosivo, en ella se producen diferentes reacciones químicas y electroquímicas y a partir de los resultados obtenidos se pudo identificar una experiencia comparativa entre agua de pH ácidos, agua de pH neutros y básicos, se pudo observar cuando el objeto de hierro es sometido a agua de pH ácido (6,5) el proceso de oxidación es espontánea y rápida formando un herrumbre; como también su velocidad (tiempo) de oxidación es mayor en comparación de aquellos objetos que son sometido a pH neutros y básicos, donde la oxidación es lenta y moderado como también su velocidad de oxidación. Por lo tanto, revelan que el medio más corrosivo para esta investigación de los objetos de hierro es cuando están en un medio de pH ácido.
- Con base a los resultados obtenidos se encontró que la técnica electroquímica permite caracterizar el comportamiento de oxidación y corrosión del acero de bajo carbono y nos permitió calcular la velocidad de corrosión (tiempo). De los resultados obtenidos en el presente estudio de tesis doctoral, se ha comprobado que, con los ensayos realizados, agua con un pH 6,5, el valor de intensidad de corriente es de  $30 \mu/A$ , por lo tanto, la velocidad de oxidación es significativo siendo  $0,073 \text{ mm/año}$  esto se debe a que existe una mayor transferencia de carga en los valores de pH ácido. En cambio, con soluciones de agua pH 7,4 la intensidad es de  $22 \mu/A$ , como resultado la velocidad de oxidación es de  $0,052 \text{ mm/año}$ , en consecuencia, la velocidad de oxidación decrece. En consecuencia, la velocidad de oxidación del acero de bajo carbono es mayor cuando están en un



pH ácido, se corrobora con los ensayos estadísticos en la cual la concentración de hierro es de 0,55 ppm.

## RECOMENDACIONES

La realización de esta experiencia permitió observar que el campo de investigación de la oxidación y reducción de objetos de hierro o acero son fenómenos muy complejos debido a que existen muchos factores que producen este fenómeno. Se recomienda continuar con la investigación de algunos de los siguientes ítems.:

- Continuar con la investigación del estudio de los objetos de hierro o acero que son utilizados en las diferentes industrias en la Ciudad de Puno, efectuando mediciones de pérdida de peso, profundidad de picaduras y caracterización de productos de corrosión con el propósito de determinar la velocidad de oxidación en función al tiempo, aplicando nuevas técnicas electroquímicas.
- Estudiar la oxidación atmosférica de los objetos de hierro desechados en la intemperie por ser uno de los factores que en su composición química tienen oxígeno, monóxido de carbono, lluvia ácida y son medios corrosivos.
- Llevar a cabo investigaciones sobre el comportamiento del hormigón armado, el material más utilizado en la edificación. Uno de los retos más significativos en cuanto a la durabilidad del hormigón armado, es la oxidación de sus armaduras.
- Realizar estudios de oxidación y corrosión de las tuberías metálicas que transportan agua potable y las que se encuentran en la superficie, debido a que el oxígeno de agua reacciona con el metal produciendo la oxidación. Las máquinas y tuberías se fabrican con hierro. Cuanto más simple sea el hierro, mayor es el riesgo de oxidación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo-Sandoval, O., Ortiz-Hernández, E., Cruz-Sánchez, M., & Cruz-Chávez, E. (2004). Role of Iron Oxides in Soils. *Terra Latinoamericana*, 22(4), 485–487. <https://www.redalyc.org/articulo.02?>
- Alcántara, J., Chico, B., Díaz, I., De la Fuente, D., & Morcillo, M. (2015). Airborne chloride deposit and its effect on marine atmospheric corrosion of mild steel. *Corrosión Science*, 97, 74–88. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.04.015>
- Alter, L. B., & Mestres, F. L. (2003). *Corrosión y protección*. Univ. Politèc. de Catalunya. Barcelona: Ediciones UPC.
- Antonio, & Carmen. (2021). *Análisis de la corrosión en materiales metálicos*. Revista de la Real sociedad de química, 2(2), 625- 649. <http://95007627x>
- Arias, F. G. (2020). *El Proyecto de Investigación: Introducción a la metodología científica* (7, Ed.). Editorial Episteme.
- Ashby, & Jones. (2008). *Engineering Materials: An Introduction to Properties, Applications and Design*. Editorial Reverte, Mexico.
- Bastidas, L. (2018). *Evaluación de la corrosión en concreto reforzado por métodos electroquímicos*. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Tecnológica de Pereira. <https://hdl.handle.net/110559/9411>
- Bertholon, R. (2007). Archaeological metal artefacts and conservation issues: long-term corrosion studies. In *Corrosion of Metallic Heritage Artefacts* (pp. 31–40). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845693015.31>
- Bilurbina Alter, L., Liesa Mestres, F., & Iribarren Laco, J. I. (2003). *Corrosión y Protección*. Ediciones UPC. [www.edicion.SUPC.es](http://www.edicion.SUPC.es)
- Bueso, A., Furió-Mas, C., & Mans i Teixidó, C. (2006). Interpretación de las reacciones de oxidación-reducción por los estudiantes. Primeros resultados. *Enseñanza de Las Ciencias. Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 6(3), 244–250. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.5101>

- Cano, N. (2015). *Diseño de un plan de recubrimiento con pintura industrial y mantenimiento para disminuir la corrosión en tanques de combustible diésel para centrales termoeléctricas*. Tesis de pre grado, Universidad Nacional del Callao. Repositorio: [unac.edu.pe/handle/20.500.12952/254](http://unac.edu.pe/handle/20.500.12952/254)
- Carrizo, J., Uribe, M., & Hernandez, O. (2007). Diagramas de predominancia, de Frost y de Pourbaix: Tres contextos para desarrollar competencias. *Scientia et Technica*, 13(34), 569–574.
- Carvalho, G. (2014). *Estudio de la corrosión atmosférica sobre dos tipos de acero de bajo carbono en instalaciones industriales petroleras cercanas al mar en el nor oeste del Perú*. Tesis de grado. Facultad de Química e Ing. Química. UNMSM.
- Chandia C., F., & Hernández H., S. (2009). *Corrosión del hierro en distintos tipos de aguas: una propuesta experimental*. Facultad de Ciencias, Universidad Católica de la Santísima Concepción. Ciencia Ahora. Vol 24, p.52-58
- Chang, R. (2003). *Fundamento de Química*. McGraw Hill. México.
- Cifuentes, A., & Garcia, M. (2005). *Manual del auxiliar de laboratorio*. España SL
- Cisterna, Osorio.; P., & Hierro. (2013). ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA OXIDACIÓN ABASTECIMIENTO A TRAVES DE AIREACIÓN. *Universidad Del Bío-Bío &quot;* Departamento de Ingeniería civil y ambiental. Chile. <https://repositorio.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/1359>
- Cobo, E. (2001). *Corrosión del acero en estructuras de hormigón armado: causas y procedimientos de rehabilitación*. Fundación Escuela de la Edificación. Universidad Politécnica de Madrid. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1203>
- Cruz del Castillo, C., Olivares Orozco, S., & González García, M. (2014). *Metodología de la investigación*. Grupo Editorial Patria. Mexico.
- Culcasi, J. D., Elsner, C. I., & Di Sarli, A. R. (2010). Hojalata: Evaluación de su comportamiento frente a la corrosión en medios acuosos. *Información Tecnológica*, 21(3), 149–162. <https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4242it.09>

- Culebro, M. (2004). *Problemas patológicos derivados de la Corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto*. Tesis doctoral. Instituto Tecnológico de Sonora.
- Datta, T., Pathak, A. D., Basak, S., Gollapudi, S., & Sahu, K. K. (2021). Fractal behavior of surface oxide crack patterns on AISI 4140 high-strength low-alloy steel exposed to the simulated offshore environment. *Applied Surface Science Advances*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100110>
- Doménech-Carbó, A., Peiró-Ronda, M. A., Vives-Ferrándiz, J., Duffó, G. S., & Farina, S. (2021). “Dry” electrochemistry: A non-invasive approach to the characterization of archaeological iron objects. *Electrochemistry Communications*, 125. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2021.106992>
- Enriquez, J. L., & Tremps, E. (2009). *Monografías sobre tecnologías sobre el acero. Parte I: Acería eléctrica*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Fuentes, H. (2013). *Análisis experimental de la oxidación del hierro en aguas subterráneas de abastecimiento a través de aireación*. Universidad Bio Bio.Chile.<https://repositorio.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/1359>
- Gonzales, a.; Sabio, L.; Dominguez, J. (2023). Érase una vez el hierro. *Revista de La Real Sociedad Española de Química.*, 2(2), 625–649. <https://9507627x>
- Guzmán, G. (2008). *Influencia del agrietamiento del concreto en la corrosión del acero de refuerzo*. Tesis de grado. Instituto Politecnica Nacional; Oaxaca. [https://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx:8080/xmlvi/handle/LITER\\_CIIATROAX/62](https://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx:8080/xmlvi/handle/LITER_CIIATROAX/62)
- Gueorgui, A., Fedina, T., Sundqvist, J. & Kaplan, A. F. (2021). *Sputtering and oxidation phenomena during recycling of low alloy steel powder in laser powder bed fusion. Materials Today Communications.* <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102241>
- Gutierrez, H., & De la Vara, R. (2012). *Análisis y diseños de experimentos*. Corporación Universitaria AUTONOMA del Cauca. Ed. Mac Graw Hill

- Hack, H. P., & Veleva, L. (2005). Corrosion tests and standards: Application and Interpretation. In 2 (Ed.), *ASTM International*. ASTM International. [http://www.astm.org/digital\\_library/mnl/pages/mnl11038m.htm](http://www.astm.org/digital_library/mnl/pages/mnl11038m.htm)
- Heredia Avalos, S. (2011). Experiencias sobre corrosión en metales de uso cotidiano. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 8(extra), 466–475. [https://doi.org/10.25267/rev\\_eureka\\_ensen\\_divulg\\_cienc.2011.v8.iextra.14](https://doi.org/10.25267/rev_eureka_ensen_divulg_cienc.2011.v8.iextra.14)
- Hernández, J. (2012). Diagrama de Pourbaix herramienta termodinámica aplicada a los problemas de corrosión. *Revista Digital de Investigación y Postgrado*, 2(4), 297–306. <https://redip.bqto.unexpo.edu.pe>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista, P. (2010). *Metodología de la Investigación*. <https://www.uca.ac.cr/wpcontent/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
- Huang, Y., Cai, F., Lu, D., & Wang, X. (2022). Estudio del comportamiento y mecanismo de corrosión del acero AISI 4135 en ambientes marinos basado en un experimento de exposición de campo. *Ciencia Del Medio Ambiente Total*, 830. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/2338>
- Hurtado, S. (2010). *Determinación del Nivel de Corrosión y Perfil de Carbonatación en Vigas de Concreto Reforzado con 3 años de Exposición al medio Ambiente*. Tesis de pre grado. Universidad Veracruzana. Xalapa-México.
- Ijiri, M., Okamoto, N., Okamoto, S., Ogi, T., Kikuchi, S., & Yoshimura, T. (2022). Characteristics of oxide film formed on cavitation-treated steel surface in water. *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 1897–1905. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.182>
- Javaherdashti, R. (2000). How corrosion affects industry and life. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 47(1), 30–34. <https://doi.org/10.1108/00035590010310003>
- Khanna. (2002). *Introduction to High Temperature Oxidation and Corrosion*. ASM international. Books.google.com

- Kumari, S., Saini, A., & Dhayal, V. (2021). Metal oxide based epoxy coatings for corrosion protection of steel. *Materials Today: Proceedings*, 43, 3105–3109. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.587>
- Li, G., Feng, Y. R., Bai, Z. Q., Zhu, J. W., & Zheng, M. S. (2007). Influence of temperature, chloride ions and chromium element on the electronic property of passive film formed on carbon steel in bicarbonate/carbonate buffer solution. *Electrochimica Acta*, 52(28), 7877–7884. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.06.059>
- Li, S., Chen, B., Tan, C., & Song, X. (2022). Effects of oxygen content on microstructure and mechanical properties of 18Ni300 maraging steel manufactured by laser directed energy deposition. *Optics & Laser Technology*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108281>
- Loayza Jaramillo, Luis. (2018). Diseño y construcción de una columna con piedra caliza para reducción de hierro y cobre en agua de drenaje ácido de mina. *Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias.*, 53(1), 1–8. <https://dspace.edla.edu.ec/handle/33000/9168>
- Lopez, L. (2008). *Corrosión del acero al carbono en una solución NACE TM 0177 en presencia de hidrocarburo*. Tesis de grado, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. Chihuahua. <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/510>
- Mamani V., E. (2012). *Propuesta de Estándares Nacionales de calidad ambiental para agua subterránea*. Ministerio del Ambiente, Viceministerio de Gestión Ambiental, Dirección General de calidad Ambiental. Lima, 25-28.
- Marechal, L., Perrin, S., Dillmann, P., & Santarini, G. (2007). Study of the atmospheric corrosion of iron by ageing historical artefacts and contemporary low-alloy steel in a climatic chamber: comparison with mechanistic modelling. In *Corrosion of Metallic Heritage Artefacts* (pp. 131–151). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845693015.131>
- Mcfarland, M. L., & Dozier, M. C. (2018). *Problemas del agua: el hierro y el manganeso*. Cooperativa de Texas Extensión. El Sistema Universitario Texas A&M, (3) 1–6.

- Mercier-Bion, F., Li, J., Lotz, H., Tortech, L., Neff, D., & Dillmann, P. (2018). Electrical properties of iron corrosion layers formed in anoxic environments at the nanometer scale. *Corrosion Science*, *137*, 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.03.028>
- Misad Saide, Alessandra. (2012). *Modelación fenomenológica atómica de la corrosión de hierro*. Tesis Pregrado, Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología Modelación. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/112112>
- Muñoz Portero, M. J. (2011). *Características y usos de los diagramas de Pourbaix*. Departamento Ingeniería Química y Nuclear, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Valencia. <http://hdl.handle.net/10251/13708>
- Nordberg, G., Langard, S., Sunderman, F. W., Mager Stellman, J., Osinsky, D., Markkanen, P., Dinman, B. D., & Atsdr. (2001). *Metales: propiedades químicas y toxicidad*. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo, vol.2, p.63.
- Ortiz, M., & Solarte, L. (2012). *Estudio de la oxidación y la corrosión de metales: Una construcción fenomenológica sobre transformación de las sustancias*. Tesis de grado. Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá. <https://hdl.handle.net/20.500.12209/16814>
- Pancorbo, F. J. (2010). *Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación*. Ediciones técnicas Marcombo S.A.
- Parker, M., & Peattie, E. G. (1984). *Pipe Line Corrosion and Cathodic Protection*. A practical Manual for corrosion. Gulf Professional Publishing.
- Payne, A. (2017). *The application of scanning electrochemical microscopy to corrosion research*. Journal of corrosion science. <https://doi.org/10.5006/2354>
- Remazeilles, C., Saheb, M., Neff, D., Guilminot, E., Tran, K., Bourdoiseau, J. A., & Refait, P. (2010). Microbiologically influenced corrosion of archaeological artefacts: characterization of iron (II) sulfides by Raman spectroscopy. *Journal of Raman Spectroscopy*, *41*(11), 1425–1433.

- Revie, R. W., & Uhlig, H. H. (2008). *Corrosión y control de la corrosión. Introducción a la ciencia y la ingeniería de la corrosión*. Wiley-Interscience. A. John Wiley & Sons, inc. publication.
- Roberge, P. R. (1999). *Handbook of corrosion engineering*. McGraw-Hill.
- Rocca, E., Faiz, H., Dillmann, P., Neff, D., & Mirambet, F. (2019). Electrochemical behavior of thick rust layers on steel artefact: Mechanism of corrosion inhibition. *Electrochimical Acta*, 316, 219–227.
- Romero Bonilla, H. Í., Tello Román, D. C., Vega Quezada, C. A., & Castillo Sánchez, A. E. (2017). Costos por corrosión de hierro ASTM A36 en procesos hidrometalurgicos auríferos. Comparación entre cianuro y tiourea. *Industrial Data*, 20(1), 37. <https://doi.org/10.15381/idata.v20i1.13506>
- Salazar-Jiménez, J. A. (2015). *Introducción al fenómeno de corrosión en el proceso de deterioro de materiales metálicos mediante reacciones químicas y electroquímicas*. Tecnología en marcha. Vol. 28, N° 3, julio-setiembre. Pag 127-136. <https://www.cielo.sa.cr ›pdf›tem›0379-3982-tem-28-03-00127.pdf>
- Silberberg, M. (2002). *Chemistry: The Molecular Nature of Matter and Change* (3, Ed.). McGraw-Hill.
- Simoès, G. (2013). *Estudio experimental de los efectos de la corrosión de las armaduras en viga continuas de hormigón armado*. Tesis de grado. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. <http://hdl.handle.net/2099.1/18385>
- Soliz, F., Fe, S., Aires, B., BOERSEN, A. C., Pública, F., Proyecto, D. E. L., Del, T., Obtención, P., Sangre, D. E. H. D. E., Por, D., Nedjaoum, F., Dhulster, P., Fatah, N., Guillochon, D., Legrand, C., Lepley-Legrand, M.-P., DE, T., Zamora Rodríguez, L. M., Vargas-rosa, N., ... Jiménez, M. (2011). Remoción de hierro y manganeso por oxidación con cloro y filtración en grava. *Revista de Química*, 9(1), 1–14.
- Terán, J., Arroyo, M., Mauricio, M., & Vásquez, D. (2022). *Desarrollo de un sistema galvanostático para la corrosión acelerada en varillas de refuerzo* publicación técnica vol.673. Instituto Mexicano de transporte.



- Tristancho, J. L. (2011). *Caracterización por sales fundidas de los recubrimientos metálicos NiCrFeNbMoTiAl, NiCrAlY, mediante técnicas electroquímicas*. Tesis de grado. Centro de Investigación en Materiales Avanzados,S.C. Chihuahua-México. [Cimav.repositorioinstitucional.mx](http://Cimav.repositorioinstitucional.mx)
- UNAM. (2009). *Corrosión*. <https://unita.unam.mx/pdfs/corrosion>
- Vallejo, J. (2004). *Conocimiento y prevención de la corrosión*. Trabajo de graduación. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala. [https://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0513\\_M](https://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0513_M)
- Vargas, F., (2022). *Análisis de las variables operativas para el control de corrosión por contenido de CO<sub>2</sub> en la planta la Vertiente*. Universidad Mayor de San Andrés. Bolivia. <http://repositorio.umsa.bo/xmlvi/handle/123456789/38893>
- Vásquez, C. (2010). *Vida útil en estructuras de concreto armado desde el punto de vista de comportamiento del material*. Universidad Privada Antenor Orrego. Trujillo-Perú. <http://blog/wp-content/uploads/sites/109/2010/12>
- Wagner, C., & Traud, W. (2000). Concerning the evaluation of corrosion reactions by superposition of Electrochemical Partial reactions and concerning the Potential Formation on Mixed Electrodes. *Z.Elektrochem*, 44. <https://doi.org/10.5006/1.3279894>
- Young, D. J. (2008). *High Temperature Oxidation and Corrosion of Metals*. Printed and bound in Great Britain.
- Zhang, A. (2022). Investigación sobre la selectividad iónica de capas de óxido de acero de baja aleación producidas en ambientes marinos industriales y no industriales. *Materiales Hoy Comunicaciones*, 31.

## ANEXOS

### Anexo 1. Matriz de consistencia

PROBLEMAS	HIPÓTESIS	OBJETIVOS	VARIABLES	METODOLOGÍA
Problema general	Hipótesis general	Objetivo general	Variable independiente	
¿Será posible el estudio de la oxidación de objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno?	Con el estudio termodinámico y cinético se determina la oxidación de objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno.	Determinar el estudio de la oxidación de objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno.	1.pH 2.Agua	Tipo: Cuantitativo de nivel explicativo
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable dependiente	Método:
PE1: ¿Será posible determinar las reacciones de oxidación y reducción en el estudio de la oxidación de objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno?	HE1: La determinación de las reacciones de oxidación y reducción permiten cuantificar la oxidación de objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno.	OE1: Determinar las reacciones de oxidación y reducción en el estudio de la oxidación de objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno.	1.Objetos de hierro (Acero de bajo carbono 1018)	Experimental a escala de laboratorio
PE2: ¿Será posible determinar el periodo de tiempo en el estudio de la oxidación de objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno?	HE2: La determinación del periodo de tiempo en el estudio permite cuantificar la oxidación de objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno.	OE2: Determinar el periodo de tiempo en el estudio de la oxidación de objetos de hierro en el medio ambiente de la ciudad de Puno.		Población: Tres zonas: Salcedo, Zona sur de Puno y UNAP. Muestra: Aleatorio simple de tipo probalístico.

## Anexo 2. Resultados de análisis de agua con pH diferentes



Universidad Nacional del Altiplano  
**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**  
**LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACION AMBIENTAL**



---

**INFORME DE ANÁLISIS DE AGUA**

**N° 20-LA136**

---

<b>ASUNTO:</b> Análisis del metal por Espectrofotómetro de Emisión Atómica por Plasma Microondas 4210 MP-AES	<b>CODIGO DE LABORATORIO:</b> L01LA136
<b>SOLICITANTE:</b> GERMÁN COILLO COTRADO	<b>N° ORDEN:</b> LMEA - 4210 - MP - AES
<b>PROYECTO:</b> ESTUDIO DE LA OXIDACION DE OBJETOS DE HIERRO EN EL MEDIO AMBIENTE DE LA CIUDAD DE PUNO	<b>FECHA DE INGRESO:</b> 13/12/2023
	<b>TIPO DE SERVICIO:</b> Único

---

**INFORMACIÓN DE LA MUESTRAS DE AGUA**

EMPAQUE PRIMARIO: Botella Transparente	TEMPERATURA DEL RECIPIENTE:	Ambiente <input checked="" type="checkbox"/>
TIPO DE MUESTRA: AGUA		Refrigeración <input type="checkbox"/>
CANTIDAD DE MUESTRAS: 4	FECHA DE INICIO DE ANÁLISIS:	18/12/2023

---

**I.- RESULTADO DE ANALISIS**

Código de muestra	Método de ensayo	Elemento 371.993 nm	Resultado ppm
M_08_pH_7_T_10	Método de ensayo por digestión multiácida ICP - AES	Fe	<0.49
M_08_pH_7_T_0	Método de ensayo por digestión multiácida ICP - AES	Fe	<0.52
M_01_pH_6.5_T_0	Método de ensayo por digestión multiácida ICP - AES	Fe	<0.52
M_01_pH_6.5_T_10	Método de ensayo por digestión multiácida ICP - AES	Fe	<0.51



M.S. I. F. P. S. COILLO COTRADO  
LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACION AMBIENTAL - FIM UNA

Los resultados corresponden solamente a las muestras analizadas en el laboratorio se prohíbe la reproducción parcial de este sin la aprobación escrita del laboratorio

### Anexo 3. Muestreo en las zonas de Salcedo (Av. Estudiante)



### Anexo 4. Muestreo en la Zona de la costanera (Mercado Progreso)



### Anexo 5. Muestreo en la Zona de la Universidad FMVZ y FIA



### Anexo 6. Espectro fotómetro de absorción atómica de la FIM



### Anexo 7. Equipo de Potentiostat Gavanostat



### Anexo 8. Preparación de muestras - Inicio



### Anexo 9. Realizando el ensayo químico de las muestras



### Anexo 10. Resultados finales del estudio de las muestras



## Anexo 11. Declaración jurada de autenticidad



Universidad Nacional del  
Altiplano Puno



Vicerrectorado de  
Investigación



Repositorio  
Institucional

### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo **GERMAN COILLO COTRADO** identificado(a) con N° DNI: **01333798** en mi condición de egresado(a) del:

**DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

con código de matrícula N° 144723, informo que he elaborado la tesis denominada:

**ESTUDIO DE OXIDACIÓN DE OBJETOS DE HIERRO EN EL MEDIO AMBIENTE DE LA CIUDAD DE PUNO**

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y no existe plagio/copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno, 02 de Noviembre del 2024.



FIRMA (Obligatorio)



Huella

## Anexo 12. Autorización de depósito de tesis en el Repositorio Institucional



Universidad Nacional del  
Altiplano Puno



Vicerrectorado de  
Investigación



Repositorio  
Institucional

### AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo **GERMAN COILLO COTRADO** identificado(a) con N° DNI: **01333798**, en mi condición de egresado(a) del **Programa de Maestría o Doctorado: DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**, informo que he elaborado la tesis denominada:

**ESTUDIO DE OXIDACIÓN DE OBJETOS DE HIERRO EN EL MEDIO AMBIENTE DE LA CIUDAD DE PUNO**

para la obtención de  **Grado**.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno, 02 de Noviembre del 2024.

FIRMA (Obligatorio)



Huella