

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

DETERMINACIÓN DE LA CORROSIVIDAD ATMOSFÉRICA EN LA CIUDAD DE ESMERALDAS PARTE II

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
QUÍMICO DE LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

PABLO ANDRÉS VINUEZA MADRIGAL

(vinuezapablo@yahoo.com)

DIRECTOR: Dr. FRANCISCO CADENA

(fcadena@server.epn.edu.ec)

Quito, DM, (Enero, 2009)

© Escuela Politécnica Nacional 2008
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Pablo Andrés Vinueza Madrigal declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Pablo Andrés Vinueza Madrigal

CERTIFICACIÓN

Certifico que el siguiente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr. Pablo Andrés Vinueza Madrigal como requerimiento parcial a la obtención del título de Ingeniero Químico.

Dr. Francisco Cadena

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio financiero del CONESUP, que se ejecuta en el Centro de Investigación Aplicada a Polímeros CIAP.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
INTRODUCCIÓN	xix
RESUMEN	xxiii
1.- PARTE TEORICA	1
1.1. Corrosión Metálica	2
1.1.1. Concepto	2
1.1.2. Factores de Influencia	2
1.1.2.1. Tiempo	2
1.1.2.2. Diferencia de Potencial	2
1.1.2.3. Temperatura	3
1.1.2.4. Contaminantes Atmosféricos	4
1.1.2.5. Condición de la Superficie	5
1.1.2.6. Abrasión	5
1.1.2.7. Factores Biológicos	5
1.1.2.8. Tiempo de Humectación	5
1.1.3. Clasificación	6
1.1.3.1. Clasificación según la Forma	6
1.1.3.2. Clasificación según el Medio	7
1.1.3.3. Otros Tipos de Corrosión	8
1.1.3.3.1. Corrosión por Fatiga	8
1.1.3.3.2. Corrosión por Cavitación	9
1.1.3.3.4. Corrosión Atmosférica	9
1.1.4. Termodinámica de la Corrosión	10
1.1.4.1. Estados de Oxidación	10
1.1.4.2. Proceso de Oxidación y Reducción en Soluciones Acuosas	11
1.1.4.3. Electrodo	11
1.1.4.4. Ecuación de Nernst	12
1.1.4.5. Potencial de Electrodo	14
1.1.4.6. Diagrama de Pourbaix	15
1.2. Corrosión Atmosférica	19

1.2.7.2.1. Breve descripción de los Productos de	
Corrosión del Zinc	42
1.2.7.2.1.1. Hidróxido de Zinc	45
1.2.7.2.1.2. Zincita	45
1.2.7.2.1.3. Hidrozincita	45
1.2.7.2.1.4. Cloruro Básico de Zinc	45
1.2.7.2.1.5. Carbonato de Zinc	45
1.2.7.2.1.6. Hidróxi-Sulfato de Zinc	45
1.2.7.2.1.7. Sulfato de Zinc	45
1.2.7.3. Corrosión del Cobre	45
1.2.7.3.1. Breve descripción de los Productos de	
Corrosión del Cobre	47
1.2.7.3.1.1. Cuprita	47
1.2.7.3.1.2. Brocantita	47
1.2.7.3.1.3. Posnjankita	48
1.2.7.3.1.4. Antherita	48
1.2.7.3.1.5. Atacamita	48
1.2.7.3.1.6. Paratacamita	48
1.2.7.3.1.7. Calcocita	48
1.2.7.3.1.8. Covelita	48
1.2.7.4. Corrosión del Aluminio	48
1.2.7.4.1. Breve descripción de los Productos de	
Corrosión del Aluminio	51
1.2.7.4.1.1. Alúmina	51
1.2.7.4.1.2. Sulfato Básico de Zinc	51
1.2.8. Corrosión en Atmósferas Marinas	51
1.2.8.1. Antecedentes	51
1.2.8.2. Introducción	51
1.2.8.3. Agua de Mar	52
1.2.8.4. Atmósferas Marinas	54
1.2.8.4.1. Variables de Importancia	54
1.2.8.4.1.1. Humedad	54
1.2.8.4.1.2. Contaminantes del Aire	54

1.2.8.4.1.3. Cloruros	55
1.2.8.4.1.4. Luz del Sol	57
1.2.8.4.1.5. Viento	57
1.2.8.4.1.6. Temperatura	57
1.2.8.4.1.7. Tiempo	57
1.2.9. Corrosión en Atmósferas Industriales	58
1.2.9.1. Principales Contaminantes	59
1.2.9.1.1. Dióxido de Azufre	59
1.2.9.1.2. Dióxido de Carbono	61
1.2.9.1.3. Óxido de Nitrógeno	61
1.2.9.1.4. Material Particulado	62
2.- METODOLOGÍA	64
2.1. Determinación de la Ubicación de las Estaciones de Ensayo	65
2.1.1. Consideraciones Previas	65
2.1.1.1. Introducción	65
2.1.1.2. Objetivo General	66
2.1.1.3. Objetivo Específico	66
2.1.2. Estrategia Metodológica	66
2.1.2.1. Determinación de Zonas Geográficas de Ensayo	67
2.1.2.2. Diseño y Construcción de los Muebles Porta-probetas	68
2.1.2.3. Diseño y Construcción de las Probetas Metálicas	71
2.1.2.4. Limpieza y Acondicionamiento de las Probetas	71
2.1.2.4.1. Limpieza Química para el Acero al Carbono	72
2.1.2.4.2. Limpieza Química para el Acero Galvanizado	72
2.1.2.4.2.1 Determinación del blanco de Zinc	72
2.1.2.4.3. Limpieza Química para Cobre	73
2.1.2.4.4. Limpieza Química para el Aluminio	73
2.1.2.5. Enjuague y Secado	73
2.1.2.6. Identificación de las Probetas	74
2.1.2.6.1. Código de Identificación	74

2.1.2.6.1.1.- Estación de Ensayo	74
2.1.2.6.1.2.- Ubicación en el Mueble	75
2.1.2.6.1.3. Material	75
2.1.2.6.2. Masa Inicial	75
2.1.2.7 Instalación del los Muebles Porta-probetas	75
2.1.2.8 Instalación de las Probetas Metálicas en los Respectivos Muebles	80
2.1.2.9. Retiro periódico de las Probetas	81
2.1.2.10. Evaluación de las Probetas	83
2.2. Evaluación de la Corrosión en función del Tiempo	85
2.2.1. Introducción	85
2.2.2. Evaluación de la Corrosión en función de las Condiciones Meteorológicas	85
2.2.3. Evaluación de la Corrosión en función del TDH y Concentración de Contaminantes.	86
2.2.4. Evaluación de la Corrosión en función del Tiempo	87
2.2.5. Evaluación de la Corrosión en función de las Normas ISO	88
2.3. Determinación del Tiempo de Vida Útil de los Materiales Metálicos	88
3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	90
3.1. Contaminantes	91
3.2. Corrosión del Acero al Carbono	91
3.2.1. Aspecto General	91
3.2.2. Cálculo de la Velocidad de Corrosión	94
3.2.3. Cinética de la Corrosión del Acero al Carbono.	95
3.2.4. Análisis de la Cinética de Corrosión del Acero al Carbono	98
3.3. Corrosión del Cobre	102
3.3.1. Aspecto General	102
3.3.2. Cálculo de la Velocidad de Corrosión	104
3.3.3. Cinética de la Corrosión del Cobre	105
3.3.4. Análisis de la Cinética de Corrosión del Cobre	109
3.4. Corrosión del Aluminio	112

3.4.1. Aspecto General	112
3.4.2. Cálculo de la Velocidad de Corrosión	115
3.4.3. Cinética de la Corrosión	116
3.4.4. Análisis de la Cinética de Corrosión del Aluminio	120
3.5. Corrosión del Zinc	122
3.5.1. Aspecto General	122
3.5.2. Cálculo de la Velocidad de Corrosión	125
3.5.3. Cinética de la Corrosión	127
3.5.4. Análisis de la Cinética de Corrosión del Zinc	130
3.6. Análisis Comparativo	133
3.6.1. Acero al carbono	134
3.6.2. Aluminio	136
3.6.3. Acero Galvanizado	137
3.6.4. Cobre	139
3.7. Clasificación de las Atmósferas según la norma ISO 9223	140
3.8. Comparación con estudios Anteriores	141
3.9. Cálculo del tiempo de vida del recubrimiento metálico del material	142
3.9.1. Cálculo del Tiempo de Vida del Recubrimiento de Acero Galvanizado	142
3.10. Sistemas Anticorrosivos sugeridos de acuerdo con la Atmósfera de Servicio	143
3.10.1. Recubrimientos Metálicos	144
3.10.2. Recubrimientos No-metálicos	145
3.10.3. Recubrimientos Orgánicos	145
3.10.3.1. Primers	146
3.10.3.2. Top Coats	147
3.10.3.2.1. Resinas Alquídicas	147
3.10.3.2.2. Resinas Vinílicas	147
3.10.3.2.3. Caucho Clorinado	147
3.10.3.2.4. Resinas Epóxicas	148
3.10.4. Sistema Sugerido para Atmósferas Categoría C1 y C2	148
3.10.5. Sistema Sugerido para Atmósferas Categoría C3 y C4	149
3.10.6. Sistema Sugerido para Atmósferas Categoría C4 y C5	149

4.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	150
4.1. Conclusiones	151
4.2. Recomendaciones	153
BIBLIOGRAFÍA	155
ANEXOS	158

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Título	Página
Figura 1.1	Velocidad de corrosión	4
Figura 1.2	Tipos de corrosión	7
Figura 1.3	Corrosión por fatiga	8
Figura 1.4	Corrosión por cavitación	9
Figura 1.5	Diagrama de Pourbaix para Fe/Cu	16
Figura 1.6	Diagrama de Pourbaix para Al/Zn	17
Figura 1.7	Factores Ambientales que influncian la corrosión	19
Figura 1.8	Corrosión vs. Humedad relativa	22
Figura 1.9	Corrosión vs. Contenido de cromo en la aleación	29
Figura 1.10	Corrosión vs. Contenido de cromo en la aleación	26
Figura 1.11	Atmósfera industrial Termoesmeraldas	27
Figura 1.12	Atmósfera industrial REE	28
Figura 1.13	Atmósfera marina	29
Figura 1.14	Atmósfera rural	30
Figura 1.15	Diagrama de Pourbaix para el sistema Fe/H ₂ O	39
Figura 1.16	Formaciones de goethita y lepidocrecita	40
Figura 1.17	Diagrama de Pourbaix para el sistema Zn/CO ₂ /H ₂ O	43
Figura 1.18	Micrografía de los productos de corrosión del Zn	44
Figura 1.19	Diagrama de Pourbaix para el sistema CuSO ₄ /H ₂ O	46

Figura 1.20	Fotografía de los productos de corrosión del cobre (14 años)	47
Figura 1.21	Micrografía de una probeta de aluminio (13 años)	49
Figura 1.22	Diagrama de Pourbaix para el sistema Al/H ₂ O	50
Figura 1.23	V _c vs. Concentración de NaCl en agua	52
Figura 1.24	Zonas de corrosión en el agua	53
Figura 1.25	V _c vs. Humedad relativa	55
Figura 1.26	Variación de la salinidad vs. Distancia a la costa	56
Figura 1.27	V _c . Vs. Temperatura	58
Figura 1.28	Emisiones gaseosas REE	59
Figura 1.29	Proceso cíclico de formación de herrumbre	61
Figura 2.1	Estación de ensayo Refinería	69
Figura 2.2	Dimensiones del mueble portaprobetas	70
Figura 2.3	Detalle del diseño del mueble porta-probetas	70
Figura 2.4	Detalle del sistema de fijación	71
Figura 2.5	Estufa de secado	74
Figura 2.6	Ubicación de la estación de ensayo INOCAR	76
Figura 2.7	Estación de ensayo INOCAR	77
Figura 2.8	Ubicación de la estación de ensayo ILT	78
Figura 2.9	Estación de ensayo ILT	79
Figura 2.10	Estación de ensayo Refinería	79
Figura 2.11	Ubicación de la estación de ensayo Refinería	80

Figura 2.12	Limpieza mecánica	83
Figura 2.13	Baño químico de limpieza	84
Figura 2.14	Balanza analítica	84
Figura 2.15	Tiempo de vida del recubrimiento de acero galvanizado	89
Figura 3.1	Probeta de acero(0,75 años de exposición) cara anterior	91
Figura 3.2	Probeta de acero(0,75 años de exposición) cara posterior	92
Figura 3.3	Superficie corroída de Acero, estación ILT, cara anterior	93
Figura 3.4	Superficie corroída de acero, estación ILT, cara posterior	93
Figura 3.5	Corrosión del acero al carbono (um) vs. tiempo	97
Figura 3.6	Velocidad de corrosión del acero (g/ año* m ²) vs.tiempo	97
Figura 3.7	Velocidad de corrosión del acero (um/año) vs. tiempo	98
Figura 3.8	Corrosión del acero (um) vs. tiempo , estación ILT	99
Figura 3.9	Corrosión del acero (um) vs. tiempo , estación INOCAR	99
Figura 3.10	Corrosión del acero (um) vs. tiempo , estación Refinería	100
Figura 3.11	Probeta de cobre, cara anterior, estación INOCAR	102
Figura 3.12	Probeta de cobre, cara posterior, estación INOCAR	103
Figura 3.13	Superficie corroída cobre, cara anterior, Estación INOCAR	103
Figura 3.14	Superficie corroída cobre, cara posterior, Estación INOCAR	104
Figura 3.15	Corrosión del cobre (um) vs. tiempo	107
Figura 3.16	Velocidad de corrosión del cobre (um/año) vs. tiempo	108
Figura 3.17	Velocidad de corrosión del cobre (g/m ² *año) vs. tiempo	108
Figura 3.18	Corrosión del cobre (um) vs. tiempo , estación INOCAR	109

Figura 3.19	Corrosión del cobre (um) vs. tiempo , estación ILT	110
Figura 3.20	Corrosión del cobre (um) vs. tiempo , estación Refinería	111
Figura 3.21	Probeta de aluminio, cara anterior, estación Refinería	113
Figura 3.22	Probeta de aluminio, cara posterior, estación Refinería	114
Figura 3.23	Micrografía de aluminio, cara anterior, estación Refinería	114
Figura 3.24	Micrografía de aluminio, cara posterior, estación Refinería	115
Figura 3.25	Vc del aluminio ($\text{g/año}\cdot\text{m}^2$) vs. tiempo	118
Figura 3.26	Corrosión del aluminio (um) vs. tiempo , estación INOCAR	121
Figura 3.27	Corrosión del aluminio (um) vs. tiempo , estación ILT	121
Figura 3.28	Corrosión del aluminio (um) vs. tiempo , estación Refinería	122
Figura 3.29	Micrografía de la superficie corroída del zinc, estación ILT	123
Figura 3.30	Micrografía de la superficie corroída del zinc, estación INOCAR	124
Figura 3.31	Micrografía de la superficie corroída del zinc, estación INOCAR	125
Figura 3.32	Corrosión del acero galvanizado (um) vs. tiempo	128
Figura 3.33	Velocidad de corrosión del acero galvanizado (um/año) vs. tiempo	129
Figura 3.34	Velocidad de corrosión del acero galvanizado ($\text{g/m}^2\cdot\text{año}$) vs. tiempo	130
Figura 3.35	Corrosión del acero galvanizado (um) vs. tiempo , estación ILT	131
Figura 3.36	Corrosión del acero galvanizado (um) vs. tiempo , estación INOCAR	131
Figura 3.37	Corrosión del acero galvanizado (um) vs. tiempo , estación Refinería	132
Figura 3.38	Vc del acero al carbono ($\text{g/m}^2\cdot\text{año}$) vs. tiempo	135
Figura 3.39	Vc del aluminio ($\text{g/año}\cdot\text{m}^2$) vs. tiempo	137
Figura 3.40	Vc del acero galvanizado ($\text{g/año}\cdot\text{m}^2$) vs. tiempo	138

Figura 3.41	Vc del cobre ($\text{g/año}\cdot\text{m}^2$) vs. tiempo	139
Figura 3.42	Esquema de una sección de recubrimiento metálico	145
Figura 3.43	Esquema de una sección de pintura	146

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Título	Página
Tabla 1.1	Potenciales de oxido reducción	3
Tabla 1.2	Clasificación de las atmósferas de acuerdo a la corrosividad atmosférica	31
Tabla 1.3	Clasificación de las atmósferas de acuerdo al TDH ISO 9223	31
Tabla 1.4	Clasificación de las atmósferas de acuerdo a la contaminación de Cl y SO	32
Tabla 1.5	Clasificación de las atmósferas de acuerdo a la Vc al primer año	32
Tabla 1.6	Clasificación de las atmósferas de acuerdo a la Vc a los 10 años ISO 9224	34
Tabla 1.7	Clasificación de las atmósferas de acuerdo a la Vce ISO 9224	34
Tabla 2.1	Perdida del recubrimiento de zinc en el baño químico	73
Tabla 2.2	Códigos de estación	74
Tabla 2.3	Ubicación de las probetas en el mueble	75
Tabla 2.4	Código de material	75
Tabla 2.5	Cronograma de retiros	82
Tabla 3.1	Corrosión del acero al carbono vs. tiempo	94
Tabla 3.2	Ecuaciones de corrosión del acero al carbono	95
Tabla 3.3	Valores de corrosión y velocidad de corrosión para el acero al carbono	996
Tabla 3.4	Valores de velocidad de corrosión para el acero al carbono	101

Tabla 3.5	Corrosión del cobre vs. tiempo	105
Tabla 3.6	Ecuaciones de corrosión del cobre	106
Tabla 3.7	Valores de corrosión y velocidad de corrosión para el cobre	106
Tabla 3.8	Valores de velocidad de corrosión para el cobre	111
Tabla 3.9	Velocidad de corrosión del aluminio vs. tiempo	117
Tabla 3.10	Ecuaciones de corrosión del aluminio	117
Tabla 3.11	Valores de velocidad de corrosión para el aluminio	117
Tabla 3.12	Valores de V_c para el aluminio	119
Tabla 3.13	Corrosión del acero galvanizado vs. tiempo	126
Tabla 3.14	Velocidad de corrosión del acero galvanizado vs. tiempo	127
Tabla 3.15	Ecuaciones de corrosión del acero galvanizado	128
Tabla 3.16	Valores de V_c para el acero galvanizado	129
Tabla 3.17	Velocidad de corrosión para acero al carbono (1 año de exposición)	134
Tabla 3.18	Velocidad de corrosión para aluminio (1 año de exposición)	136
Tabla 3.19	Velocidad de corrosión para acero galvanizado (1 año de exposición)	137
Tabla 3.20	Velocidad de corrosión para cobre (1 año de exposición)	139
Tabla 3.21	Categorización de las atmósferas , Norma ISO 9223	140
Tabla 3.22	Valores de V_c para el proyecto MYCAT	141
Tabla 3.23	Tiempo de vida del recubrimiento	143

ÍNDICE DE ANEXOS

	PAGINA
ANEXO I	
Datos de las Probetas	i
ANEXO II	
Nomenclatura	vii
ANEXO III	
Corrosión del Acero al Carbono	viii
ANEXO IV	
Corrosión del Cobre	xiii
ANEXO V	
Corrosión del Aluminio	xix
ANEXO VI	
Corrosión del Acero Galvanizado	xxiv
ANEXO VII	
Datos experimentales estación Municipio	xxix

RESUMEN

El presente Proyecto de Titulación tuvo como objetivo determinar, medir y caracterizar la corrosividad atmosférica de la ciudad de Esmeraldas; mediante la exposición de probetas metálicas de acero al carbono, aluminio, cobre, y zinc a las diferentes condiciones atmosféricas imperantes en el sector sin la utilización de algún tipo de protector o inoculador de corrosión.

En cualquier ámbito de la vida es fácil observar estructuras, maquinaria y demás artefactos de uso común ser víctimas de la corrosión atmosférica, la misma que se ve potenciada por factores como la contaminación originada por las emisiones gaseosas de la industria, del parque automotor y demás actividades desarrolladas por el hombre, como por otras propias de cada zona climática. En el caso específico de este estudio se analizará el impacto de las emisiones gaseosas industriales de la ciudad de Esmeraldas y del alto porcentaje de iones cloruros presentes en el ambiente debido a su situación de ciudad costera, mediante la exposición de probetas metálicas a las condiciones atmosféricas.

En un país con una creciente industria, como es el caso del Ecuador, la contaminación del aire procede de los sistemas de transporte, los grandes focos de emisiones industriales y los pequeños focos de emisiones de las ciudades o el campo; pero debemos recordar que la contaminación está en proporción a la demanda de energía, productos o servicios que una sociedad como tal requiera.

De acuerdo con reportes bibliográficos (INAMHI, 2007), la ciudad de Esmeraldas es considerada una de las ciudades con mayor corrosión debido a las emisiones gaseosas emitidas por la Refinería Estatal Esmeraldas y la Central Termoeléctrica Termoesmeraldas que originan subproductos de combustión o procesos de refinación tales como el SO_2 , NO_2 , CO , entre otros, que conjuntamente con la presencia de iones cloruros por su cercanía al mar crean una atmósfera altamente agresiva. (Navarrete y Salgado 2007).

La atmósfera de la ciudad de Esmeraldas se caracteriza por hallarse en un territorio húmedo con una pluviosidad anual sobre los 700mm, con una temperatura media anual que oscila alrededor de los 25° C. (INAMHI, 2007)

Las probetas metálicas que se usaron en el presente trabajo, se prepararon y evaluaron de acuerdo con la norma ASTM G1, el diseño de los muebles porta probetas ASTM G 07.

Para el caso de acero al carbono se observa que la mayor velocidad de corrosión se presentó en la ciudad de Esmeraldas, específicamente en la estación Luís Tello seguida de la estación Sto. Domingo; se puede observar también que la corrosión promedio presentada en la ciudad de Quito es aproximadamente del 38 % del promedio presentado en Esmeraldas. Claramente se observa una mayor velocidad de corrosión en la estación Luís Tello, esto se puede explicar por la alta concentración de contaminantes presentes en la atmósfera circundante, los mismos que se originan en la Refinería Estatal Esmeraldas y se depositan allí por la influencia de los vientos imperantes en la zona. Las demás estaciones de la ciudad de Esmeraldas, esto es, Municipio y Refinería presentan valores similares, pero menores a los presentados en la estación Luís Tello. La estación INOCAR presentó valores más altos de velocidad de corrosión que las dos estaciones anteriores, esto se puede explicar debido a la alta concentración de iones Cl^- por su ubicación a orillas del mar. Cabe destacar el elevado valor de velocidad de corrosión que se presentó en la estación Santo Domingo, el mismo que se debe a los altos valores de TDH de la zona.

El acero galvanizado presentó el mayor valor de velocidad de corrosión en la estación Luís Tello. Como se mencionó anteriormente para el caso del acero al carbono, la alta concentración de contaminantes en la atmósfera de esta estación deriva en los altos valores de velocidad de corrosión. Hay que destacar el alto valor de velocidad de corrosión presentado en la estación Sto. Domingo, debido a los altos valores de TDH.

Se observó que la mayor velocidad de corrosión para el aluminio en la ciudad de Esmeraldas se presentó en la estación Municipio, este valor corresponde a un estudio anterior,(Narváez E, Salgado O, 2007); de las estaciones que fueron estudiadas en el presente trabajo, la estación INOCAR presentó el mayor valor de velocidad de corrosión. También se observó que el valor promedio de velocidad de corrosión en la ciudad de Quito es 200% más alta del que se presentó en la ciudad de Esmeraldas. Para este material no se disponen datos de la estación Sto. Domingo, por lo que no es posible hacer una análisis comparativo, también

es claramente visible que los valores de velocidad de corrosión para Quito y para la estación Municipio son mucho mas alto que para las otras tres estaciones de la ciudad de Esmeraldas.

Finalmente para el caso del cobre se observó que en la ciudad de Esmeraldas el mayor valor de velocidad de corrosión se presentó en la estación INOCAR, otro valor alto se presentó en la estación Municipio. En las otras dos estaciones los valores presentados son mucho menores, aproximadamente un 50% menos; mientras tanto los valores encontrados en Quito son aun menores.

Aún cuando los valores de corrosión y de velocidad de corrosión son mayores que en las ciudades de Quito y Santo Domingo, la categorización ISO 9224, es la misma para el acero y el cobre, esto es C3 y C5 respectivamente, para el acero galvanizado la corrosión se incrementa ubicándose en media respecto a los estudios anteriores en Quito y Santo Domingo, en tanto que para el Aluminio la categoría a continua en baja.

Generalizando, la atmósfera mas corrosiva es la del Instituto Luís Tello, fenómeno esperado por estar ubicada en una zona industrial, en segundo lugar tenemos la estación INOCAR, la misma que tiene influencia directa del mar y en tercer lugar esta la estación ubicada dentro de las instalaciones de la Refinería, la misma que no presenta valores altos de corrosión debido a que la influencia del viento arrastra los contaminantes aliviando la carga corrosiva del lugar.

INTRODUCCIÓN

“Se puede definir a la corrosión como el deterioro continuo y sistemático de un material debido a una reacción química entre este y su medio ambiente. De este concepto podemos inferir que los metales no son los únicos materiales susceptibles de corrosión”. (Gösta, 1985)

La composición e integridad física de un sólido son alteradas en un entorno corrosivo, cuando existe corrosión electroquímica se transfieren átomos como resultado del circuito eléctrico producido. La corrosión es la tendencia que tienen los metales a volver al estado combinado, es decir, al mismo estado en que se encontraban en la naturaleza, que es, en términos termodinámicos, el estado más estable.

La corrosión involucra la gradual destrucción de un material lo cual significa costos de reparación e inclusive un reemplazo futuro, por lo que el control de la corrosión representa un ahorro económico considerable.

Sin menoscabar la importancia que tiene con relación a otros aspectos, la principal motivación para el estudio de la corrosión es, sin duda, de índole económica. Las primeras estimaciones de los costos de la corrosión, así como las más recientes, coinciden en señalar que éstos corresponden a aproximadamente el 3% del PBI de un país. La corrosión es un fenómeno que puede afectar prácticamente a cualquier material y cuando esta no es prevenida o controlada puede reducir significativamente la vida útil o la eficiencia de componentes, equipos, estructuras e instalaciones (Gösta, 1985)

Se ha estimado que el costo anual de la corrosión metálica, incluyendo medidas contra la corrosión es de alrededor de 2000 a 3000 dólares por habitante en los países más altamente industrializados. Como un costo primario o directo de la corrosión, podemos contar el costo de los recubrimientos anticorrosivos u otros métodos de protección, el reemplazo del equipo corroído, el uso de metales caros en lugar del acero al carbono, etc. Pero también hay costos indirectos como la para de una industria debido a equipos corroídos, destrucción de grandes construcciones debido a la corrosión de pequeños detalles, daños causados por el goteo de agua o aceite de tuberías o depósitos corroídos.

Debido a la falta de información, es muy común que tanto en el ámbito industrial como en los ambientes más domésticos se considere a la corrosión metálica como un problema inevitable. Hoy en día se desarrollan proyectos enfocados a dar soluciones a este problema que genera enormes pérdidas de dinero alrededor del mundo.

Estos proyectos están orientados a buscar revestimientos que cumplan con una serie de características de acuerdo con las condiciones de operación a las que va a ser sometida la estructura y a las condiciones ambientales del lugar de instalación. Antes de desarrollar los revestimientos anticorrosivos se ha considerado oportuno caracterizar la agresividad de la atmósfera de la zona objeto del estudio

La corrosividad es diferente dependiendo del ambiente, por ejemplo el aire húmedo es más corrosivo que el aire seco, el aire caliente es más corrosivo que el aire frío, el agua caliente es más corrosiva que el agua fría, el aire contaminado es más corrosivo que el aire limpio, los ácidos son más corrosivos que los álcalis, el agua salada es más corrosiva que el agua dulce. Sin embargo, pueden existir algunas excepciones con lo mencionado anteriormente; la corrosión no ocurre en el vacío aún a elevadas temperaturas debido a la ausencia de oxígeno y agua que son los principales precursores de la corrosión.

1.- PARTE TEÓRICA

1.1.- CORROSION METALICA

1.1.1.-CONCEPTO

“La corrosión puede ser definida como un ataque no intencional a un material a través de una reacción con su medio circundante; de acuerdo con esta definición general, otros materiales como cerámicos, polímeros o concretos pueden también ser sujetos de corrosión. Cuando no se hace una referencia particular del material, se entiende normalmente que el material que esta siendo atacado es un metal” (Gösta, 1985)

Es posible apreciar la corrosión en materiales plásticos, cerámicos y celulósicos como la madera. Se debe destacar que la madera sufre una corrosión de carácter microbiano a diferencia de los otros materiales que sufren una corrosión química o electroquímica.

1.1.2.-FACTORES DE INFLUENCIA

1.1.2.1.-Tiempo

De trabajos de investigación realizados, (Narváez Billy 2006; Salinas Mónica 2004), se ha podido inferir una relación exponencial de la corrosión de un material metálico respecto al tiempo en los primeros meses de exposición, pero a partir del primer año la relación se hace lineal; para al final, es decir, sobre los tres o cuatro años hacerse constante. (ISO 9223, 2003)

1.1.2.2.-Diferencia de Potencial

Cuando existe diferencia de potencial (fem) entre los materiales expuestos a las mismas condiciones, tal como sucede con el zinc y acero en agua salada, el metal con un valor de potencial estándar de oxidación mayor se corroerá y protegerá al metal con el potencial estándar de oxidación menor. Cuando se tiene una disolución, las especies químicas en ella tienen un estado de oxidación determinado. Si se hace pasar una corriente eléctrica a través de la disolución, esto implica que la corriente tendrá un voltaje (también llamado "diferencia de

potencial") asociado a la relación de la Ley de Ohm; $V = RI$. (<http://www.lenntech.com>). Estos valores se los puede apreciar en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Potenciales estándar de oxidación y reducción a 25° °C (Babor Ibarz 1959)

Reacción de Corrosión	Potencial normal E^0 (V)
$K \rightarrow K^+ + e^-$	-2,92 (Activo)
$Na \rightarrow Na^+ + e^-$	-2,71
$Mg \rightarrow Mg^{+2} + 2e^-$	-2,38
$Al \rightarrow Al^{+3} + 3e^-$	-1,66
$Zn \rightarrow Zn^{+2} + 2e^-$	-0,763
$Cr \rightarrow Cr^{+3} + 3e^-$	-0,710
$Fe \rightarrow Fe^{+2} + 2e^-$	-0,440
$Cd \rightarrow Cd^{+2} + 2e^-$	-0,402
$Co \rightarrow Co^{+2} + 2e^-$	-0,270
$Ni \rightarrow Ni^{+2} + 2e^-$	-0,230
$Sn \rightarrow Sn^{+2} + 2e^-$	-0,140
$Pb \rightarrow Pb^{+2} + 2e^-$	-0,126
$H_2 \rightarrow 2H + 2e^-$	0,000
$Sn^{+2} \rightarrow Sn^{+4} + 2e^-$	0,154
$Cu \rightarrow Cu^{+2} + 2e^-$	0,340
$4OH^- \rightarrow O_2 + 2H_2O + 4e^-$	0,401
$Fe^{+2} \rightarrow Fe^{+3} + e^-$	0,771
$2Hg \rightarrow Hg_2^{+2} + 2e^-$	0,798
$Ag \rightarrow Ag^{+1} + 1e^-$	0,799
$Pd \rightarrow Pd^{+2} + 2e^-$	0,830
$2H_2O \rightarrow O_2 + 4H + 4e^-$	1,230
$Pt \rightarrow Pt^{+2} + 2e^-$	1,200
$Au \rightarrow Au^{+3} + 3e^-$	1,420 (Noble)

1.1.2.3 Temperatura

El coeficiente de difusión de oxígeno es una variable de gran importancia en la velocidad de corrosión. En soluciones acuosas se ha determinado que $D \times \mu = \text{cte}$, donde D es el coeficiente de difusión de oxígeno y μ es la viscosidad. Entonces, cuando la temperatura se incrementa, la viscosidad disminuye, por lo tanto D se incrementa, incrementando así la velocidad de corrosión alcanzando su máximo valor alrededor de los 80°C para los materiales metálicos.

A temperaturas cercanas al punto de ebullición del agua, la velocidad de corrosión disminuye debido a que la solubilidad del oxígeno se reduce apreciablemente, esto ocurre en sistemas abiertos o a presión atmosférica. En sistemas cerrados, en donde la presión se incrementa con la temperatura y en donde el oxígeno no puede escapar de la solución, se puede esperar un incremento en la velocidad de corrosión con el incremento de temperatura como se puede observar en la Figura 1.1. (Gösta ,1985)

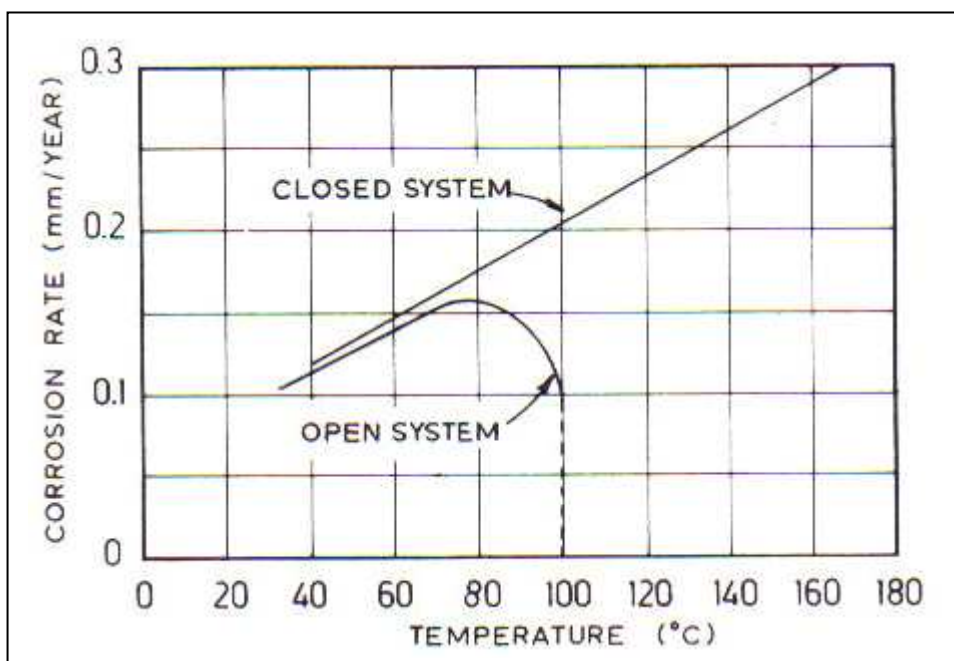


Figura 1.1: Velocidad de corrosión vs. Temperatura (Gösta ,1985)

1.1.2.4.-Contaminantes Atmosféricos

El estudio de los contaminantes ambientales es fundamental en la determinación de la corrosión de una determinada zona o región, pues estos pueden constituirse en catalizadores de la reacción de corrosión, o reaccionar separadamente con el material corroyéndole, o en algunos casos ser un inhibidor de la corrosión. (Askeland D. R., 2007)

Factor importante a considerar es determinar la concentración de dichos contaminantes en el medio ambiente y determinar su relación con la velocidad de corrosión. Este tema será tratado de manera más amplia en la sección 1.2.

1.1.2.5.-Condición de la superficie

Una incorrecta limpieza de la superficie previa a la aplicación de un recubrimiento protector o la concentración de algún contaminante o materia extraña al material sobre la superficie del mismo, puede constituirse en un potencial foco de iniciación de corrosión.

1.1.2.6.-Abrasión

Las condiciones abrasivas de un determinado tipo de servicio al que se ha destinado el material, pueden remover las capas protectoras haciendo al material presa de la corrosión.

1.1.2.7.- Factores Biológicos

Los microorganismos influyen en la corrosión en dos formas principalmente:

- Creando obstrucciones sobre la superficie lo cual produce celdas de aireación diferencial.
- Absorbiendo hidrógeno de la superficie del acero, que es un factor de protección en la corrosión. Ciertos sulfatos que son reducidos por bacterias son transformados a ácido sulfuroso en las proximidades de las áreas catódicas del acero provocando una aceleración en la corrosión. (Salgado O, Navarrete E, 2007)

1.1.2.8.-Tiempo de Humectación (TDH)

Se define como la suma de los tiempos parciales en los cuales se da que la humedad relativa (H_R) es mayor o igual al 80% y, simultáneamente, la temperatura es mayor a los 0 °C (ISO 9223, 2003), esto último por el hecho de que el agua se congela a temperaturas inferiores a los 0 °C.

El tiempo de humectación así determinado consiste en una aproximación pues debería tomarse en cuenta la velocidad de modificación de la humedad relativa, lo que implica que la superficie se mantenga con una cierta capa de humedad durante un tiempo adicional, mismo que se conoce como ΔTDH .

La velocidad de modificación de la humedad relativa, está relacionada con la altitud. Se ha comprobado que a mayor altitud la velocidad de disminución de la humedad relativa aumenta. (Salinas, 2004; Narváez, 2005).

1.1.3.-CLASIFICACION

Los procesos corrosivos se pueden clasificar según el medio en que se desarrollan o según la forma o morfología de los mismos.

1.1.3.1.-Clasificación según la forma (Gösta ,1985).

La forma en como se da la corrosión lleva a la siguiente clasificación:

- a) *Corrosión uniforme*.- El proceso se da de forma homogénea en toda la superficie metálica y su penetración media es igual en todos los puntos.
- b) *Corrosión por picado*.- Aquí el proceso se da en puntos aislados de la superficie metálica, propagándose hacia el interior pudiéndose formar túneles microscópicos.
- c) *Corrosión selectiva*.- Es un caso intermedio entre la corrosión por picado y la corrosión uniforme, por lo tanto la penetración es mayor en unas zonas que en otras pero se da en toda la superficie. Llamada también corrosión en placas.
- d) *Corrosión ínter granular*.- El proceso corrosivo se da como franjas estrechas de los límites de grano.
- e) *Corrosión fisurante*.- Se da cuando un metal está sometido a tensiones

mecánicas de tracción y simultáneamente a la acción de un medio corrosivo.

- f) *Corrosión en rendijas*.- se da en regiones mal aireadas donde la difusión del medio corrosivo es baja, como en roscas, depósitos de sólidos, grietas, hendiduras, soldaduras, etc. Los procesos corrosivos antes descritos pueden apreciarse en la Figura 1.2.

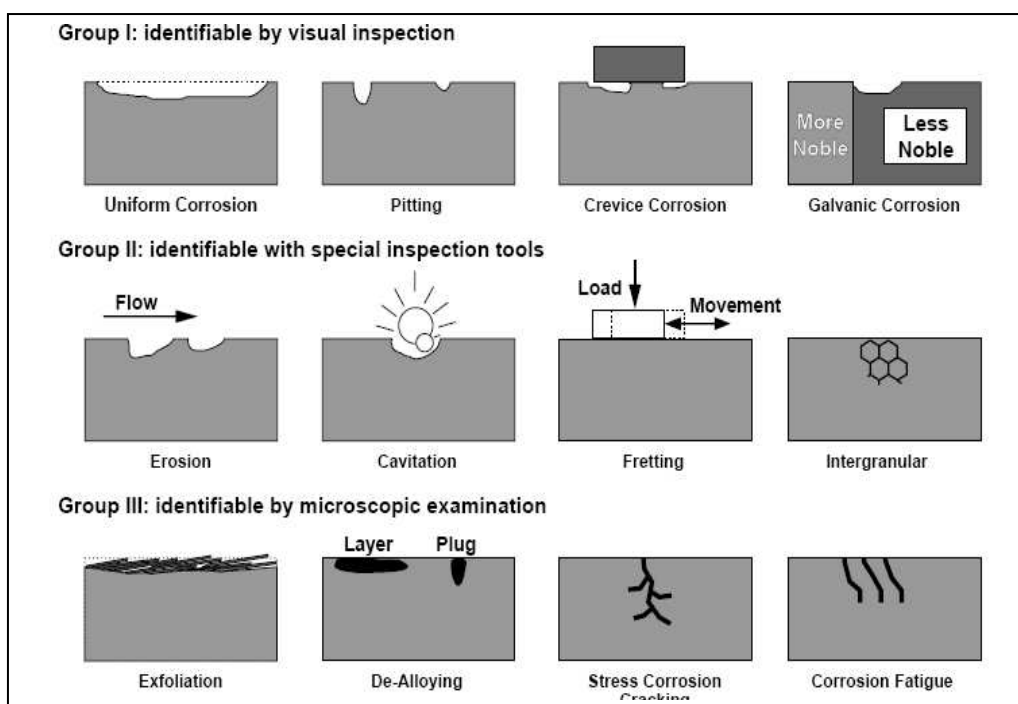


Figura 1.2: Tipos de Corrosión (Gösta ,1985)

1.1.3.2.-Clasificación según el medio (Askeland D. R., 2007)

a) *Corrosión Química*.- en este tipo de corrosión no hay la presencia de un medio electrolítico, es decir que se da una reacción química entre el metal y el medio, por ejemplo entre el metal y el oxígeno del aire.

b) *Corrosión Electroquímica*.- En este tipo de proceso corrosivo existe la presencia de cuatro elementos fundamentales: un ánodo, un cátodo, un electrolito, un medio físico que une al ánodo y al cátodo, que en este caso sería el mismo metal

Las corrientes eléctricas que originan el proceso corrosivo tienen varias causas:

- La presencia de dos o más metales distintos en contacto (corrosión

galvánica).

- Presencia de fases distintas en una misma aleación.
- Presencia de capas de óxidos conductores de electrones.
- Diferentes grados de aireación en una pieza metálica. Las zonas de escasez de oxígeno se comportan como ánodos cuando están unidas a otras zonas con buena aireación.
- Corrientes inducidas por circuitos eléctricos mal aislados.

1.1.3.3.-Otros tipos de corrosión

1.1.3.3.1.- Corrosión por fatiga

La fatiga es la falla por agrietamiento de un metal que está sujeto a una tensión cíclica, cuando la tensión aumenta, el número de ciclos necesarios para que el material falle disminuirá. Para cada material existe un nivel de tensión que corresponde al valor más bajo en el cual no ocurrirá falla alguna, aún con un número infinito de ciclos; a este valor de tensión se la conoce como *límite de resistencia*. (Gösta, 1985)

La corrosión por fatiga se la puede evitar mediante el uso de revestimientos de sacrificio, como por ejemplo el zinc y el cadmio sobre el acero.

El revestimiento de zinc sobre el acero se lo aplica mediante pulverización metálica, que es muy efectiva. En ambientes acuosos se puede lograr una mayor protección usando protección catódica e inhibidores, aunque no es efectivo cuando se encuentra en niveles altos de tensión cíclica. Un ejemplo de este proceso corrosivo se puede observar en la Figura 1.3:

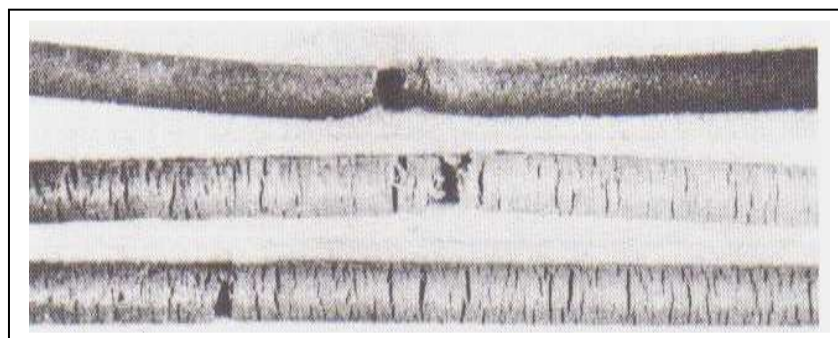


Figura 1.3: Corrosión por fatiga (Gösta, 1985)

1.1.3.3.2.-Corrosión por cavitación

La cavitación es la formación de vacíos o cavidades en un líquido debido a la turbulencia o a la temperatura, que producen un decrecimiento de la presión del líquido por debajo de la presión de vapor en zonas localizadas dentro de las tuberías reduciendo la resistencia del material . Los vacíos son realmente agujeros en el líquido los cuales contienen únicamente vapor de agua, usualmente existen por un corto tiempo debido a cambios en la presión de un líquido turbulento. (Askeland, 2001)

La prevención de este tipo de corrosión requiere el uso de aleaciones más resistentes, donde el diseño de sistemas que evite la turbulencia y la caída de presión en lo posible.

La Figura 1.4 nos muestra los daños ocasionados por este tipo de proceso corrosivo.

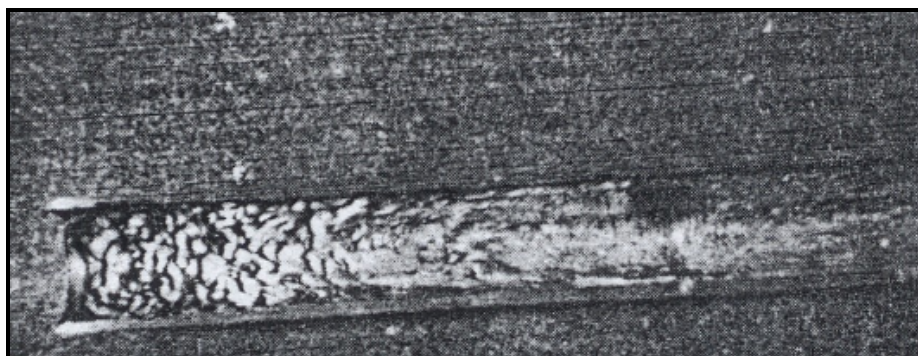


Figura 1.4: Corrosión por cavitación (Askeland, 2001)

1.1.3.3.3.- Corrosión atmosférica

Es un proceso electroquímico que involucra: un metal, productos de corrosión, superficie electrolítica y la atmósfera. Depende de varios factores: humedad relativa, niebla, temperatura de la superficie metálica, temperatura del ambiente de exposición, velocidad y dirección el viento, radiación solar, tiempo de humectación, presencia de contaminantes, etc.

La humedad que se deposita sobre la superficie metálica actúa como un electrolito, por ende los productos de la corrosión atmosférica son generalmente poco estables y no detienen el avance de la corrosión. (CYTED., 1998)

La corrosión atmosférica se asemeja a la corrosión en medio acuoso, con la distinción de que no existe evacuación constante de los productos de la corrosión, y que además atraviesa por períodos de sequedad y humedad a causa de los cambios climáticos.

1.1.4.-Termodinámica de la corrosión

El marco teórico requerido para evaluar los procesos corrosivos se puede obtener de las leyes Termodinámica. Estas proporcionan información de los estados de equilibrio de las reacciones, de los productos intermedios y de las reacciones secundarias que se producen.

1.1.4.1.- Estados de oxidación

El estado de oxidación o número de oxidación se define como la suma de cargas positivas y negativas de un ión, lo cual indirectamente indica el número de electrones que tiene este ión. El estado de oxidación es una aproximación: la mecánica cuántica; teoría aceptada en la actualidad para describir las propiedades de partículas muy pequeñas, impide adjudicar los electrones a un átomo o a otro en una molécula. En cambio, se considera que los electrones están compartidos por todos los átomos de la misma molécula. Aún así, el concepto de estado de oxidación resulta útil para estudiar procesos de oxidación y reducción . La combinación de los átomos para formar compuestos resulta ser una transferencia electrónica entre ellos. En un compuesto, cada átomo viene caracterizado por un estado de oxidación determinado por los electrones ganados o perdidos. (Gösta, 1985)

Los óxidos metálicos se forman por transferencia de electrones desde los átomos de metal electropositivos hacia los átomos de oxígeno electronegativos, convirtiéndolos en cationes y aniones respectivamente. El incremento unitario del estado de oxidación, representa la pérdida de un electrón y corresponde a la oxidación del metal. Los electrones que pierde el metal son ganados por el oxígeno, esto constituye la reducción complementaria del oxígeno.

1.1.4.2.- Proceso de oxidación y reducción en soluciones acuosas

Los procesos corrosivos involucran el intercambio de electrones en reacciones parciales: reacciones anódicas que liberan electrones (oxidación) y reacciones catódicas que los consumen (reducción).

1.1.4.3.- Electroodos

Son los componentes de un circuito eléctrico que conecta el cableado convencional del circuito a un medio conductor como un electrolito o un gas. El electrodo de carga positiva se denomina ánodo y el de carga negativa cátodo. (Breck ,1986; Encarta, 2007)

El estado de oxidación de las especies puede cambiar mediante la intervención de una superficie conductora de electricidad, mediante la cual los electrones pueden ser transportados.

Los electrodos acoplados de esta manera mantiene la corrosión activa de los metales. Por ejemplo el hierro disuelto en iones, incrementa el estado de oxidación de 0 a +2, perdiendo electrones y dando lugar a una carga positiva en exceso en el metal.

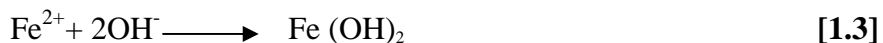


En el otro electrodo, los electrones son absorbidos por una reacción complementaria en la misma superficie, como por ejemplo el oxígeno disuelto es reducido:

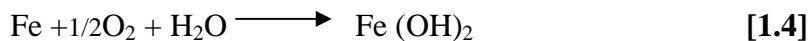


Reduciendo el estado de oxidación del oxígeno de 0 a -2, en el ión hidroxilo.

El balance de electrones entre las ecuaciones 1.1 y 1.2 produce iones Fe^{2+} y OH^{-} , los cuales producen la precipitación del hidróxido ferroso $\text{Fe}(\text{OH})_2$ el cual continuamente remueve los iones de la solución permitiendo que la reacción continúe:



Sumando las reacciones 1.1, 1.2 y 1.3 se tiene el proceso completo:



1.1.4.4.- Ecuación de Nernst

En un electrodo aislado, la carga transferida se acumula hasta establecer un equilibrio, como por ejemplo considerando la disolución de un metal, M, en un medio acuoso que produce iones, M^+ .



La acumulación de electrones en el metal estabiliza una carga negativa en el metal relativo a la solución creando una diferencia de potencial, salida de iones y la promoción del proceso reversible, dando lugar a la descarga de iones y su retorno al metal como átomos depositados. Un equilibrio dinámico es establecido cuando el metal ha adquirido un potencial característico hacia la solución. (Babor J., Ibarz J, 1959).

Las condiciones para que el equilibrio ocurra a temperatura constante son derivadas de una forma de la reacción isotérmica de Van't Hoff:

$$\Delta G = \Delta G^{\circ} + RT \ln J \quad [1.6]$$

En donde:

ΔG : Variación de energía libre de Gibbs.

ΔG° : Variación de energía libre de Gibbs, a condiciones estándar.

J : Cociente de la actividad correspondiente a la variación de energía:

$$J = \frac{a_{(\text{Producto 1})} * a_{(\text{Producto 2})} * \dots \text{etc}}{a_{(\text{Reactivo 1})} * a_{(\text{Reactivo 2})} * \dots \text{etc}} \quad [1.7]$$

En donde:

a : actividad

En un cambio químico estándar, sin transferencia de carga, la Ecuación 1.6 no especifica una condición de equilibrio.

Sin embargo para el proceso de transferencia de carga anteriormente descrito, la variación de la energía libre es balanceada mediante el potencial que adquiere el electrodo, esto se manifiesta en términos eléctricos mediante el reemplazo de los términos de la energía libre de Gibbs ΔG y ΔG° de la Ecuación 1.6 con los términos correspondientes al potencial eléctrico de equilibrio, E y E° usando las expresiones:

$$\Delta G^\circ = -zFE^\circ \quad [1.8]$$

$$\Delta G = -zFE \quad [1.9]$$

Generando la Ecuación de Nernst:

$$E = E^\circ - \left[\frac{R * T}{z * F} \right] * \ln J \quad [1.10]$$

En donde:

E = Potencial del electrodo (V)

E° = Potencial estándar del electrodo (V)

z = Número de equivalentes electroquímicos presentes (eq/gmol)

R = Constante universal de los gases (8,314 J/K*gmol)

F = Constante de Faraday (96500 Culombios/eq)

T = Temperatura absoluta (K)

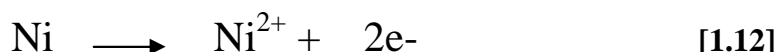
La Ecuación 1.10 es generalmente utilizada a temperatura ambiente de 25°C (298 K), y sustituyendo $2,303 \log J$ por $\ln J$, quedando la ecuación:

$$E = E^\circ - \frac{0.0591}{z} \log J \quad [1.11]$$

1.1.4.5.- Potenciales de electrodos

El estudio de los potenciales aislados de electrodos tiene su origen en la teoría de potencial de electrodo formulada por Nernst en 1889. Nernst supone que todo elemento es capaz de formar un electrodo activo, al introducirlo en agua o en una dilución tiene una tendencia a disolverse dando iones al líquido; esta tendencia se conoce como presión electrolítica de disolución.

Existe una convención para representar los electrodos en equilibrio así por ejemplo si nos interesa la corrosión activa de un metal esta debería ser escrita en la dirección de la oxidación como una reacción anódica en donde los electrones aparecen en el lado derecho de la ecuación:



De forma alternativa si lo que interesa es la electro-deposición del Níquel, esta ecuación se escribiría de manera muy similar a una reacción catódica, en la dirección de reducción donde los electrones aparecen en el lado izquierdo de la ecuación:



Similarmente, la reducción del oxígeno complementando la disolución anódica de metales en agua aireada puede ser escrita como una reacción catódica tal como se la describe en la ecuación 1.2; sin embargo, el proceso reversible es una reacción anódica donde se genera oxígeno como se la muestra en la ecuación:



La dirección formal de la reacción determina si los signos para los potenciales de los electrodos en equilibrio, E , y de los potenciales estándares de los electrodos, E° , son positivos o negativos. (Babor J., Ibarz J, 1959)

1.1.4.6.- Diagrama de Pourbaix

El pH de la solución electrolito es un parámetro muy importante en la velocidad de corrosión, cuyos efectos pueden representarse en un diagrama potencial vs. pH, también llamado diagrama de Pourbaix, donde la selección de la actividad relativa de un ión se toma arbitrariamente. En la Figura 1.5 y 1.6 se muestran los diagramas de Pourbaix del Zn, Fe, Al, Cu con diferentes tendencias corrosivas en condiciones acuosas. Se incluye como referencia las líneas E vs. pH de los sistemas redox acuosos O_2 / OH^- y H^+/H_2 . Es importante destacar que estos diagramas se obtuvieron a partir de datos termodinámicos, y por tanto, sirven para indicar la posición de equilibrio a la cual posiblemente un sistema puede llegar, más no la cinética del proceso. Se sabe que un metal se disuelve con formación de iones metálicos a un determinado potencial. A un potencial inferior no hay disolución, y además ese potencial no es afectado por el pH del medio. Si el metal se disuelve da un óxido o un hidróxido, dependiendo esto del pH al que se encuentra el medio. En el diagrama de Pourbaix se sintetizan tanto los aspectos químicos y electroquímicos que termodinámicamente se deben tener en cuenta en un proceso corrosivo, pues cuando se tiene una solución ácida que contenga iones metálicos, al aumentar el pH, llegará a un punto en el que se forman precipitados de hidróxidos y, si el pH continúa aumentando, llegará un punto en que los hidróxidos precipitados se vuelven a disolver y dan aniones o iones complejos. En una superficie metálica ocurre algo similar. La formación de estos precipitados puede entorpecer el proceso corrosivo y de esta manera actuar como protector (pasivación). (Breck, 1986).

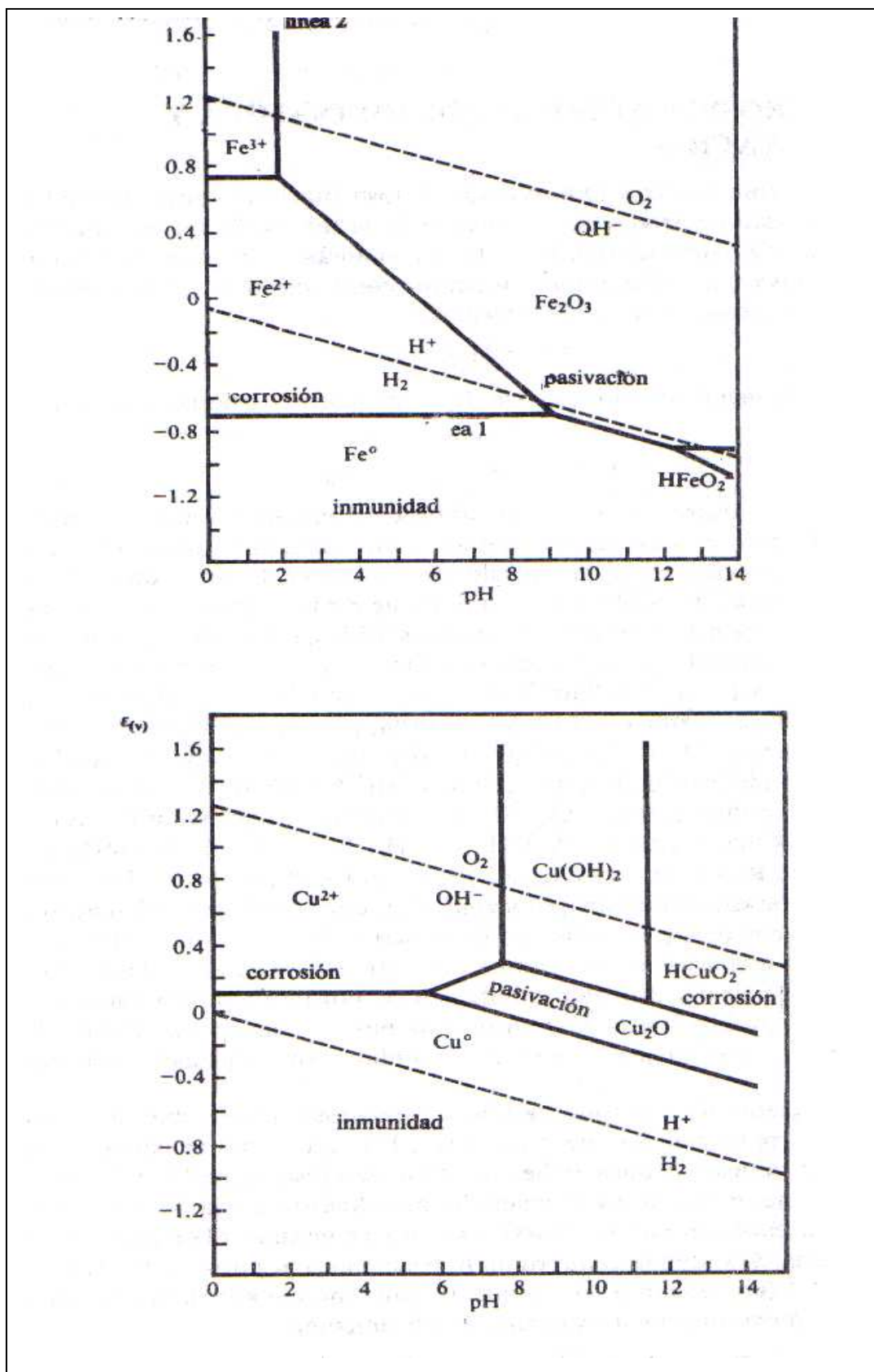


Figura 1.5.: Diagramas de Pourbaix para el Fe, Cu (Breck ,1986)

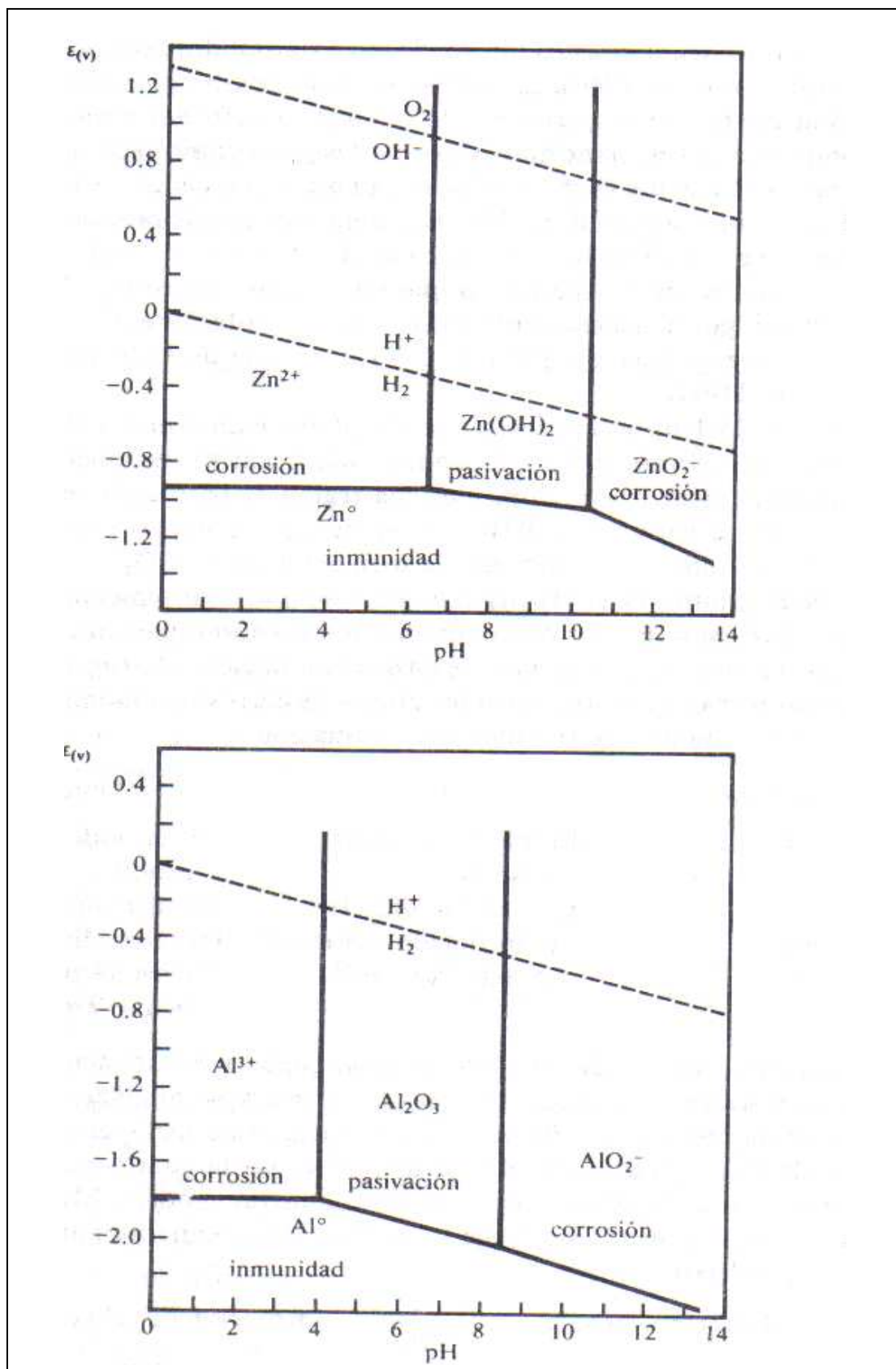


Figura 1.6.: Diagramas de Pourbaix para el, Zn, Al (Breck ,1986)

Como se puede observar, el diagrama de Pourbaix presenta varias zonas, las que se detallan a continuación:

Zona de inmunidad.- En la cual el metal es la especie estable y es inmune a la corrosión.

Zona de corrosión.- En esta zona, la especie estable es un ión soluble y el metal puede corroerse si la cinética es favorable.

Zona de Pasividad.- La especie permanece estable en esta zona, es un sólido insoluble que puede proteger el metal si forma una capa impermeable y adherente.

Los diagramas de Pourbaix tienen las siguientes limitaciones: nos proporcionan una zona de pasividad de un metal, pero no consideran que dicha pasividad pueda estar condicionada por los enlaces, los cuales dependen de la naturaleza, adherencia y cohesión de los metales; además, estos diagramas no consideran las impurezas que pueden existir en la solución o componentes de aleación en el metal que pueden modificar las reacciones como por ejemplo cloruros, sulfatos, que pueden atacar, modificar o reemplazar a óxidos e hidróxidos en las zonas de pasividad. (Breck, 1986; Gösta, 1985).

1.2.-CORROSION ATMOSFERICA

1.2.1 INTRODUCCION

Aunque el proceso corrosivo no es espectacular, los costos que produce si lo son; en Estados Unidos alcanzan los 2 billones de dólares anuales. Se ha estimado que más del 50% de las cuantiosas pérdidas globales de la corrosión se deben a la acción de las atmósfera sobre los materiales metálicos, y esto es lógico, pues es en este medio donde operan la mayoría de las instalaciones y equipos. La corrosión atmosférica es en general, el resultado de la co-acción de dos factores: el oxígeno y la humedad (agua en estado líquido); si uno de estos factores no está presente, la corrosión no se presenta. En aire seco, por ejemplo bajo el punto de congelación o con humedad relativa menor al 60 %, el acero no se corroe. Por consiguiente los procesos corrosivos no son factibles en las regiones polares ni en los desiertos. Además de estos factores podemos mencionar la radiación ultravioleta del sol, los contaminantes atmosféricos como SO₂, NO_x, NaCl, etc. Todas estas condiciones se denominan el Macroclima de la región. . (CYTED, 1998)

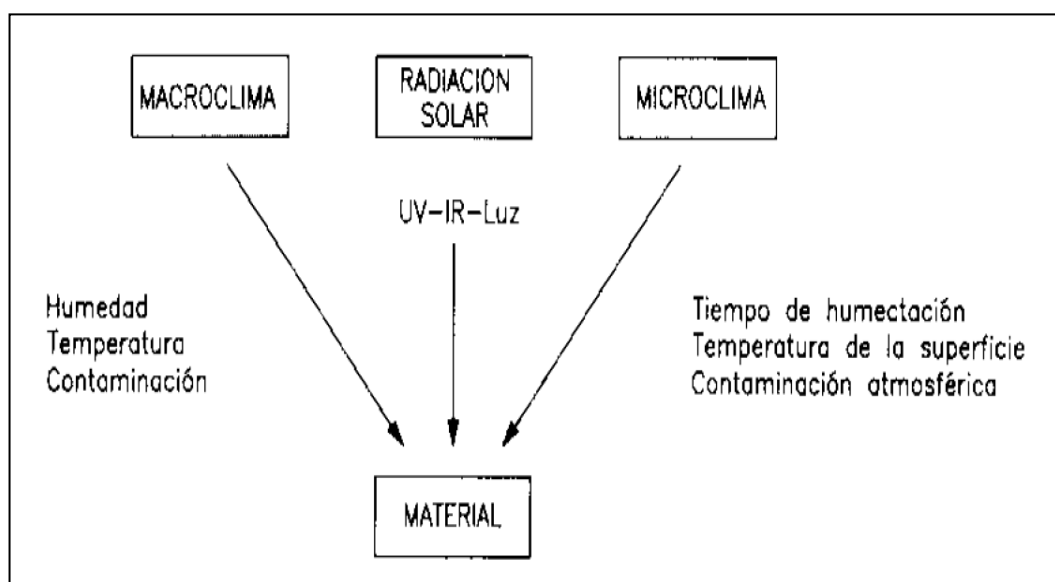


Figura 1.7: Factores ambientales que influyen la corrosión (CYTED, 1998)

El Microclima es, en cambio, el clima específico que se forma alrededor del material que se está corroyendo, y es de vital importancia para entender los

mecanismos de degradación, Entre los factores que forman el microclima podemos citar: la formación de rocío, el tiempo de humectación, la radiación infrarroja, la acumulación de iones ácidos como SO_3^{-3} , NO_2 , Cl^- . (CYTED, 1998).

La corrosión atmosférica se incrementa sustancialmente si el aire está contaminado por gases de combustión, particularmente dióxido de azufre de combustibles fósiles, o sales agresivas, por ejemplo cerca de chimeneas o ambientes marinos; por consiguiente, la corrosión es particularmente fuerte en ambientes industriales o marinos. Además la corrosión se ve aún más incrementada si la superficie metálica se halla recubierta de partículas sólidas como polvo, hollín o suciedad, pues estas partículas retienen la humedad y los contaminantes por más tiempo. Este tipo de corrosión es peculiar, puesto que en la corrosión atmosférica de los metales no existen grandes cantidades de electrolito, como sucede en otro tipo de corrosión electroquímica, así también no es posible determinar la diferencia de potencial, dirección de la polarización; sin embargo, todos los factores electroquímicos (ánodo, cátodo, electrolito) importantes aparecen en la corrosión atmosférica.

La corrosión atmosférica varía considerablemente entre las regiones geográficas y las condiciones climáticas locales (Gösta, 1985; Flinn, 1991)

1.2.2.- FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CORROSION

1.2.2.1.-Factores Meteorológicos

1.2.2.1.1.- Lluvia

La pluviosidad de una región es un factor determinante en los procesos corrosivos de los metales, la lluvia realiza un lavado de los contaminantes atmosféricos depositados sobre las superficies expuestas, lo que podría considerarse como un efecto benéfico.

Por otro lado, si la lluvia se estanca en las imperfecciones de las superficies metálicas (grietas o hendiduras) podría acelerar la corrosión por la acumulación de humedad en tales áreas. (ASTM Handbook, 1992).

1.2.2.1.2.- Rocío y condensación

El rocío y la condensación son factores indeseables desde el punto de vista de la corrosión si no están acompañados de lluvia frecuente, la cual va lavando o eliminando los contaminantes sobre las superficies metálicas expuestas.

Una película de rocío saturada conjuntamente con sal marina, ácidos de azufre y ácido clorhídrico de una atmósfera industrial provee un electrolito agresivo para promover la corrosión.

En los trópicos en donde, en la noche, la condensación aparece sobre las superficies metálicas, la condensación atrapa el dióxido de carbono y llega a ser tan agresivo como ácido diluido. (ASTM Handbook, 1992)

1.2.2.1.3.-Humedad Relativa

La humedad relativa es uno de los factores más importantes en el proceso de corrosión atmosférica, está influenciado por la frecuencia y duración de los períodos de lluvia, rocío y niebla durante las cuales las superficies metálicas aparecen visiblemente húmedas y desarrollan la corrosión.

La corrosión es un proceso electroquímico, por lo tanto debe existir un electrolito que permita el paso de una corriente a través de ella, por una difusión de aniones (iones cargados negativamente) y cationes (iones cargados positivamente). En los procesos corrosivos atmosféricos el agua es el electrolito, por consiguiente, el aumento de la humedad relativa en el ambiente, marca el aumento de la presencia de agua sobre las superficies metálicas, incrementando la velocidad de corrosión, como se puede ver en la Figura 1.8.

(ASTM Handbook, 1992)

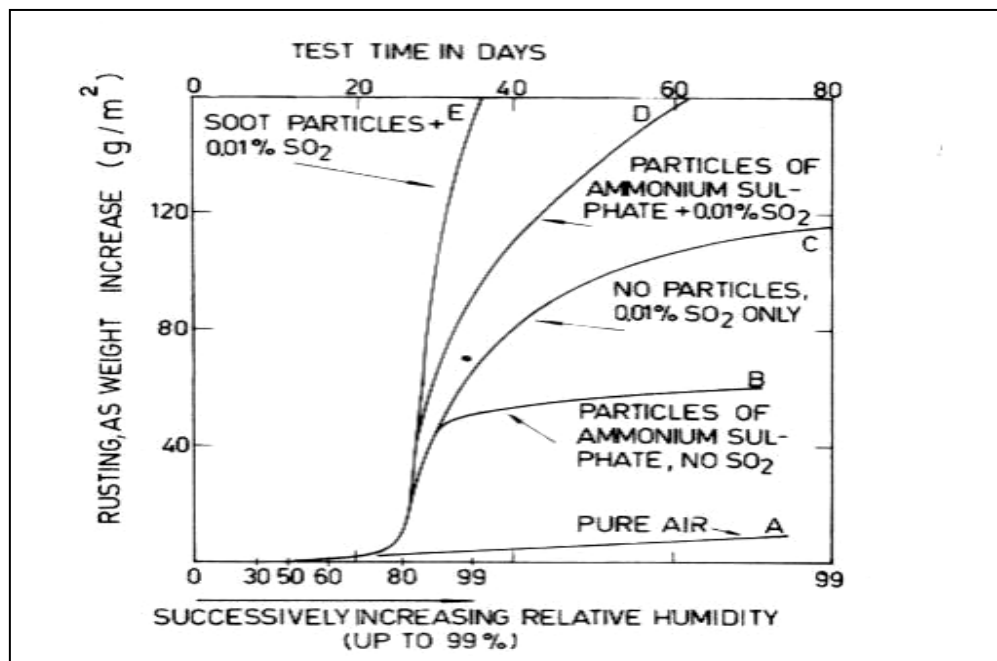


Figura 1.8.- Corrosión vs. H_R (Gösta ,1985)

El proceso de corrosión atmosférica es la suma de los procesos parciales de corrosión que tienen lugar cada vez que se forma la capa de electrolito sobre el metal. Las precipitaciones acuosas y las condensaciones de humedad sobre la superficie metálica son los principales precursores de corrosión.

1.2.2.1.4.-Tiempo de humectación

El tiempo de humectación TDH, representa el tiempo durante el cual una superficie metálica está cubierta por una película líquida de electrolito, siendo esta capaz de producir corrosión atmosférica.

Para determinar el tiempo de humectación existen varios métodos:

- Determinación directa mediante equipos especiales que detectan la presencia de la capa de humedad.
- Determinación mediante la suma de los períodos de precipitación de lluvia, rocío y niebla, considerando los períodos de secado de las superficies húmedas.

Determinación indirecta es el método más empleado se basa en sumar las horas en las cuales el valor de la humedad relativa media iguala o supera el 80% y una temperatura mayor a 0°C. (ASTM Handbook, 1992)

1.2.2.1.5.-Temperatura

La temperatura afecta la humedad relativa, el punto rocío, el tiempo de humectación y la cinética de los procesos de corrosión.

A altas temperaturas la cinética de las reacciones químicas de la corrosión se incrementa, por otro lado la humedad depositada sobre la superficie metálica se evapora, desciende la concentración de oxígeno y de otros gases corrosivos, e incluso pueden producirse cambios en las propiedades protectoras de las capas de los productos de corrosión. Mientras que bajo la temperatura de congelación de agua, la corrosión no ocurre debido a que el hielo es un electrolito pobre, razón por la cual la mayor oxidación ocurre en el rango de temperaturas comprendido entre 0 y aproximadamente 25°C.

Desde el punto de vista de corrosión atmosférica, condiciones secas y calientes son preferibles a condiciones frías y húmedas.

Las temperaturas de interés son: la temperatura del punto de rocío y la temperatura de la superficie del panel de ensayo.

Durante la llegada de la noche la temperatura ambiente decrece y la temperatura sobre las superficies metálicas tienden a ser más elevadas que el aire húmedo que las rodea y no ocurre la condensación; conforme avanza de tiempo, después que el punto de rocío ha sido alcanzado, como la temperatura del ambiente empieza a subir, el retraso de la temperatura de las superficies metálicas hace que tiendan a comportarse como condensadores manteniendo una película de humedad sobre sus superficies. (ASTM Handbook, 1992)

El punto de rocío de una atmósfera es la condición de equilibrio de condensación y evaporación de una superficie. Para asegurar que no ocurra corrosión por condensación sobre una superficie metálica la temperatura debe mantenerse alrededor de 10 a 15 sobre el punto de rocío.

El efecto de la temperatura sobre la velocidad de corrosión de los metales es diferente.

- La velocidad de corrosión incrementa para el hierro.
- La velocidad de corrosión decrece para el zinc.
- La corrosión permanece constante para el cobre.

1.2.2.1.6.-Presión atmosférica

Su influencia es indirecta, pues al aumentar la altitud del lugar, disminuye la capa de aire atmosférica y con esta, la presión y el oxígeno disuelto, entonces, aunque existan diferentes lugares que posean condiciones meteorológicas similares, su diferencia de altitud marcará una diferencia en el proceso corrosivo. (ASTM Handbook, 1992)

1.2.2.1.7.-Radiación solar

La radiación solar tiene influencia en el tiempo de humectación, pues produce una evaporación más rápida de la capa de agua que recubre la superficie. La radiación solar puede también estimular las reacciones de corrosión fotosensibles sobre metales tales como cobre y hierro. Además puede estimular las reacciones biológicas tales como el desarrollo de hongos. (ASTM Handbook, 1992)

1.2.2.1.8.-Viento

La dirección y velocidad del viento inciden en la dispersión de gases contaminantes en la atmósfera y en la acumulación de partículas sobre las superficies metálicas. (Gösta, 1985).

1.2.2.2.- Factores contaminantes

Las sustancias contaminantes importantes disueltas en el aire son: los cloruros, dióxido de azufre, óxido de nitrógeno, y partículas duras como la arena y minerales. Estos factores serán tratados con mayor precisión en la sección 1.2.9.

1.2.2.3.- Otros factores

1.2.2.3.1.-Contenido de la aleación

La selección de una composición particular de aleación puede causar una significativa diferencia en la velocidad de corrosión del material. El cromo como un elemento de aleación es de gran importancia, bajos niveles de cromo originan un rápido incremento en la velocidad de corrosión, sin embargo cuando se incrementa la concentración de cromo en la aleación, la velocidad de corrosión decrece hasta que en concentraciones alrededor del 12 %, la velocidad de corrosión atmosférica sobre la aleación expuesta llega a ser despreciable. (CYTED, 1985)

La relación de la velocidad de corrosión con la composición de aleación se puede observar en la Figura 1.9.

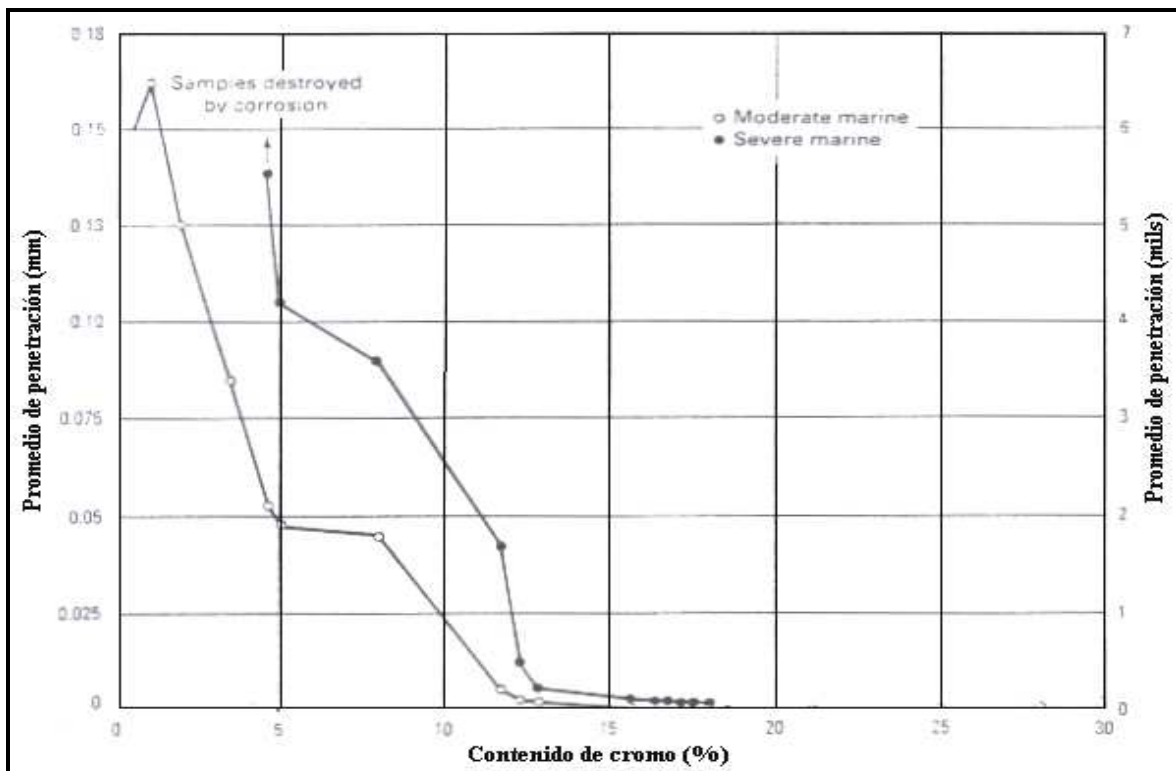


Figura 1.9: Corrosión vs. Contenido de cromo (CYTED, 1985)

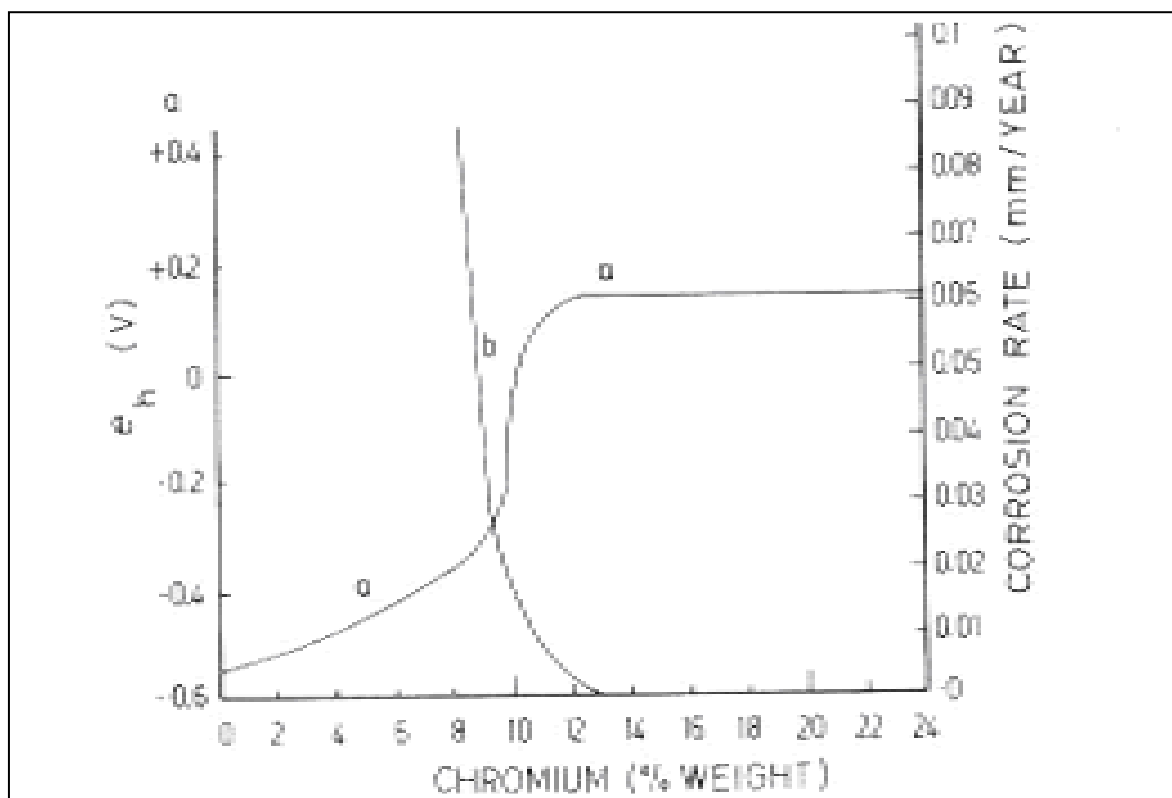


Figura 1.10: Corrosión vs. Contenido de cromo (Gösta, 1985)

La Figura 1.10 muestra el potencial de corrosión en función del contenido de cromo en la aleación.

1.2.3.- CLACIFICACION DE LAS ATMOSFERAS CORROSIVAS

Las atmósferas de acuerdo a su intensidad corrosiva pueden ser clasificadas en cuatro tipos básicos:

- Atmósfera Industrial
- Atmósfera Marina
- Atmósfera Rural
- Atmósfera Interior

1.2.3.1.- Atmósfera industrial

Una atmósfera industrial esta caracterizada por la presencia de contaminantes como: óxidos de nitrógeno, sulfuros. En general, estos contaminantes provienen del uso de combustibles fósiles. El dióxido de azufre, reacciona con el agua de la atmósfera produciendo ácido sulfuroso, el mismo es oxidado por algunos procesos catalíticos convirtiéndolo en ácido sulfúrico el cual se depositan en gotitas microscópicas sobre las superficies expuestas. (Leygraf C., Graedel T).

Las Figuras 1.11 y 1.12 ilustran zonas con atmósferas industriales.



Figura 1.11.- Atmósfera Industrial Termo Esmeraldas



Figura 1.12.- Atmósfera Industrial Refinería Estatal Esmeraldas

1.2.3.2.-Atmósferas marinas

En la atmósfera marina una gran cantidad de partículas finas de sal marina son transportadas por el viento y son depositadas en las superficies metálicas expuestas. La concentración de sal contaminante decrece rápidamente con la distancia desde el océano y es afectada enormemente por las corrientes del viento. (ASTM Handbook, 1992).

La Figura 1.13 muestra una atmósfera marina.



Figura 1.14.- Atmósfera Marina, Capitanía de Puerto, Esmeraldas

1.2.3.3.- Atmósferas rurales

Una atmósfera rural no contiene contaminantes peligrosos químicos, sin embargo si contienen polvos orgánicos e inorgánicos, su principal factor corrosivo constituye la humedad. La Figura 1.14 muestra una atmósfera rural.



Figura 1.14.- Atmósfera Rural (Puéllaro, Pichincha)

1.2.3.4.- Atmósfera interior

La atmósfera interior originalmente considerada como una corrosión escasamente severa, realmente algunas veces puede causar un alto nivel de corrosión. Sin embargo, no existe un contaminante típico o condiciones asociadas con las atmósferas interiores. Cualquier espacio cerrado si no es evacuado o lleno con un líquido puede ser considerado como una atmósfera interior. Si no existe ventilación, es posible la existencia de humos, que en presencia de la condensación o de alta humedad puede ser altamente corrosivo. (ASTM Handbook, 1992).

1.2.4.- CLACIFICACION DE LA AGRESIVIDAD ATMOSFERICA

La normativa internacional ISO, específicamente la norma ISO 9223, 2003, teniendo en cuenta los factores ambientales, metereológicos y contaminantes de una región ha clasificado las atmósferas de acuerdo con su agresividad corrosiva de la siguiente manera:

a) De acuerdo con la corrosividad

Tabla 1.2.-Clasificación de las atmósferas de acuerdo con la corrosividad atmosférica. (ISO 9223, 2003).

Categoría	Corrosividad
C1	Muy Baja
C2	Baja
C3	Media
C4	Alta
C5	Muy Alta

b) De acuerdo con el Tiempo de Humectación

Tabla 1.3.-Clasificación de las atmósferas de acuerdo con el tiempo de humectación. (ISO 9223, 2003).

Categoría	Tiempo de Humectación	
	Horas / año	% año
T1	< 10	< 0.1
T2	10 – 250	0.1 – 3
T3	250 – 2500	3 -30
T4	2500 – 5500	30 – 60
T5	> 5500	> 60

c) De acuerdo con el nivel de contaminantes (SO₂ y Cl⁻)

Tabla 1.4.-Clasificación de las atmósferas de acuerdo con la contaminación por SO₂ y Cl⁻. (ISO 9223, 2003).

Categoría		Velocidad de depósito de SO ₂ µg / m ³	Velocidad de depósito de Cl ⁻ mg / m ² día
SO ₂	Cl ⁻		
P ₀	S ₀	< 12	< 3
P ₁	S ₁	12 – 40	3 – 60
P ₂	S ₂	41 – 90	60 – 300
P ₃	S ₃	91 – 250	300 – 1500

d) De acuerdo con la velocidad de Corrosión (µm/año)

Tabla 1.5.-Clasificación de las atmósferas de acuerdo con la velocidad de corrosión (a partir de datos del primer año de exposición. (ISO 9223, 2003)

Categoría	Vc	Material			
		Acero	Zinc	Cobre	Aluminio
C1	g / m ² a	< 10	< 0.7	< 0.9	despreciable
	µm / a	< 1.3	< 0.1	< 0.1	--
C2	g / m ² a	10 – 200	0.7 – 5	0.9 – 5	< 0.6
	µm / a	1.3 – 25	0.1 – 0.7	0.1 – 0.6	--
C3	g / m ² a	200 – 400	5 – 15	5 – 12	0.6 – 2
	µm / a	25 – 50	0.7 – 2.1	0.6 – 1.3	--
C4	g / m ² a	400 – 650	15 – 30	12 – 25	2 – 5
	µm / a	50 – 80	2.1 – 4.2	1.3 – 2.8	--
C5	g / m ² a	650 – 1500	30 – 60	25 – 50	5 – 10
	µm / a	80 – 200	4.2 – 8.4	2.8 – 5.6	--

La velocidad de corrosión para 10 años de exposición se define por:

$$V_c = \frac{\Delta c_1}{t_1 - t_0} \quad [1.25]$$

Donde:

Δc_1 , son las pérdidas por corrosión a los 10 años de exposición (en μm).

t_0 y t_1 , son los tiempos de instalación y retiro de las probetas respectivamente (años).

V_c , velocidad de corrosión promedio a 10 años (en $\mu\text{m} / \text{año}$)

La velocidad en estado estacionario corresponde al periodo donde las pérdidas por corrosión en función del tiempo son constantes y esto se da a más de 10 años de exposición a la atmósfera. La ecuación que define a esta velocidad es la siguiente:

$$V_{c_e} = \frac{\Delta c_2}{t_2 - t_1} \quad [1.26]$$

Donde:

Δc_2 , son las pérdidas por corrosión en el intervalo de tiempo considerado (en μm).

t_2 y t_1 , son los tiempos en años en el intervalo considerado (+10 años) donde la curva Corrosión versus tiempo es constante.

V_{c_e} , velocidad de corrosión en estado estacionario (en $\mu\text{m} / \text{año}$).

Tabla 1.6.-Clasificación de las atmósferas de acuerdo con la velocidad de corrosión promedio (V_c), a 10 años de exposición (ISO 9224, 2003)

Categoría metal	C1	C2	C3	C4	C5
Acero al C	≤ 0.5	0.5 – 5	5 – 12	12 – 30	30 - 100
Zn	≤ 0.1	0.1 - 0.5	0.5 - 2	2 – 4	15 – 80
Cu	≤ 0.01	0.01 – 0.1	0.1 - 1.5	1.5 – 3	4 – 10
Al	≤ 0.01	≤ 0.025	0.025 – 0.2	*	*

- Los datos aquí pueden ser variados

Tabla 1.7-Clasificación de las atmósferas de acuerdo con la velocidad de corrosión en estado estacionario (V_{c_e}), (ISO 9224, 2003)

Categoría metal	C1	C2	C3	C4	C5
Acero al C	≤ 0.1	0.1 – 1.5	1.5 – 6	6 – 20	20 - 90
Zn	≤ 0.05	0.05 - 0.5	0.5 - 2	2 – 4	4 – 10
Cu	≤ 0.01	0.01 – 0.1	0.1 - 1	1 – 3	3 – 5
Al	No legible	0.01 - 0.02	0.02 – 0.2	*	*

* Los datos aquí pueden ser engañosos

1.2.5.- MAPAS DE CORROSION

Un mapa de corrosión es una ayuda visual que facilita el acceso a la información de los datos de corrosión de una región, tanto desde el punto de vista de selección del material más apto y sus medios de protección, como del económico. Este último teniendo en cuenta inclusive la contaminación atmosférica.

Estos mapas pueden estar aplicados a una región, un país o a todo un continente. Se realizan de acuerdo a tres enfoques como son:

- Medida directa de la corrosión mediante la exposición de distintos materiales a la atmósfera a través de una red de estaciones dispersas por toda la zona a evaluar en múltiples lugares representativos. Los materiales más usados con este fin son cobre, aluminio, acero, zinc.
- Estimación del efecto que sobre los distintos materiales causan los principales fenómenos ambientales propios de la zona, como son: humedad relativa, temperatura, precipitación, contaminantes a través de experimentación a nivel de laboratorio.
- Mediante un previo conocimiento de las relaciones matemáticas entre corrosión y los principales parámetros meteorológicos de la zona.

De forma general se ha determinado que los factores más influyentes en el proceso corrosivo y por ende los más tenidos en cuenta para la elaboración de estos mapas son: el tiempo de humectación y los contaminantes atmosféricos, estos últimos de manera indirecta mediante el uso de factores de corrección. (Genesca J, 1990).

1.2.6.- MECANISMO DE CORROSION

Bajo la película de electrolito, la mayoría de los metales expuestos en la atmósfera se corroen por medio del proceso catódico de reducción de oxígeno.



Únicamente en el caso de un alto grado de contaminación por productos ácidos adquiere importancia la reacción de descarga de iones hidrógeno.



La difusión de oxígeno a través de la película acuosa suele ser el factor controlante de la corrosión, ésta velocidad se incrementa al disminuir el espesor de película sobre el metal hasta alcanzar un valor máximo a espesores intermedios, se entiende que la unión de gotas individuales para dar lugar a capas relativamente gruesas de electrolito frene en algo la velocidad del ataque corrosivo, por la dificultad de difusión del oxígeno. Por otro lado, una disminución excesiva de la capa de humedad, frena el proceso corrosivo debido a la alta resistencia óhmica de las películas sumamente delgadas y también a estar obstaculizadas en su seno las reacciones de ionización y disolución del metal.

1.2.6.1. - Ley Bi logarítmica

Mediante el análisis de los procesos corrosivos ha sido posible establecer una relación matemática que represente el proceso de corrosión atmosférica según la Ecuación 1.29

$$M = a \cdot t^n \quad [1.29]$$

En donde:

M = Pérdida del metal en g/m^2

t = Tiempo de exposición en años

a y n son constantes que representan con gran aproximación la dependencia con el tiempo de la corrosión atmosférica de varios metales y aleaciones.

Como la mayoría de los puntos obtenidos experimentalmente, se sitúan muy próximos a la línea definida por la Ecuación 1.29 representada en escala log-log, a esta ecuación se la conoce como ley bilogarítmica.

$$\text{Log } M = \text{Log } a + n \text{Log } t \quad [1.30]$$

Para un mecanismo controlado por la difusión, la velocidad de formación del óxido sobre la superficie metálica es inversamente proporcional al espesor x de la película de productos de corrosión que cubre dicha superficie.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{k}{x} \quad [1.31]$$

Integrando con $x=0$ y para $t=0$

$$x^2 = 2kt \quad [1.32]$$

$$x = (2k)^{1/2} \cdot t^{1/2} \quad [1.33]$$

En donde:

x = espesor de película que cubre la superficie y

t = tiempo

Si $(2k)^{1/2} = a$ y $n = 0,5$ se obtiene una ecuación análoga a la Ecuación 1.29; éste es el caso de un mecanismo ideal controlado por la difusión, cuando todos los productos de corrosión permanecen sobre la superficie en forma de capa.

Sin embargo, si el coeficiente de difusión decrece con el tiempo, debido a una disminución de la porosidad de la capa de herrumbre por aglomeración, recristalización, o sellado de los poros por los mismos productos de corrosión, entonces n adquiere valores más bajos de 0,5.

Por el contrario si el proceso de difusión es acelerado por la desaparición total o parcial de la capa de herrumbre por erosión, disolución, desprendimientos, agrietamientos, etc., el exponente n adquirirá valores mayores que 0,5, siendo el valor límite 1. Por lo tanto el exponente n de la Ecuación 2.5 es un excelente indicador del comportamiento físico- químico de la capa de productos de corrosión y las reacciones que ocurren entre ésta capa y los factores ambientales. (Galvele, 1979)

El proceso de corrosión atmosférica puede ser representado con una buena aproximación con funciones del tipo:

$$C = a * t^n \quad [1.34]$$

C = Corrosión al cabo de t años ($\square m$)

t = Tiempo de exposición en (años)

a = Corrosión en el primer año de exposición ($\square m$)

n = Coeficiente de difusión que depende del metal, atmósfera y condiciones de exposición.

1.2.7.- CORROSION DE DIFERENTES MATERIALES METALICOS

1.2.7.1.-Corrosión del acero

Termodinámicamente la disolución de un metal se da por la formación de iones metálicos a un potencial dado por la ecuación de Nernst:



$$E^{\circ} = - \frac{RT}{nF} \ln [\text{Me}^{++}]$$

[1.35]

En donde:

E° = Potencial estándar del electrodo (V)

n = Número de equivalentes electroquímicos presentes (eq/gmol)

R = Constante universal de los gases (8,314 J/K*gmol)

F = Constante de Faraday (96500 Culombios/eq).

Por debajo de este potencial no existe disolución, y por encima de este la forma más estable es la iónica, disolviéndose según la ecuación 1.5 e independientemente del pH del medio, puesto que no intervienen en ella los iones H^+ u OH^- . Sin embargo, de alguna manera estos iones también condicionan las reacciones de corrosión, puesto que los iones metálicos producidos en estas reacciones forman óxidos e hidróxidos que influyen en la velocidad de dichas reacciones a través de la formación de capas subsecuentes que actúan como capas protectoras. Además sobre un umbral de potencial que es específico para cada material, los metales, óxidos e hidróxidos precipitados se disuelven para formar iones complejos. Este es un parámetro de suma importancia en el estudio de la corrosión pues estos productos pueden proteger al metal por pasivación (CYTED, 1998).

Toda esta información se recoge de forma grafica en un diagrama *potencial vs. pH*, llamado diagrama de Pourbaix, como se mencionó en la sección 1.1..4.6.

Entre los productos más comunes de la corrosión atmosférica del acero se puede encontrar los oxihidroxidos (α -FeOOH, goethita; γ -FeOOH, lepidocrecita y β -FeOOH, akaganeita), el óxido ferroso-férrico (Fe_3O_4 , magnetita) y el hidróxido ferroso ($\text{Fe}(\text{OH})_2$), de esta manera se comprueba la concordancia de la composición de los productos de la corrosión atmosférica del acero al carbono con la región de estabilidad mostrada en el diagrama de Pourbaix (Fig. 1.16). (CYTED, 1998).

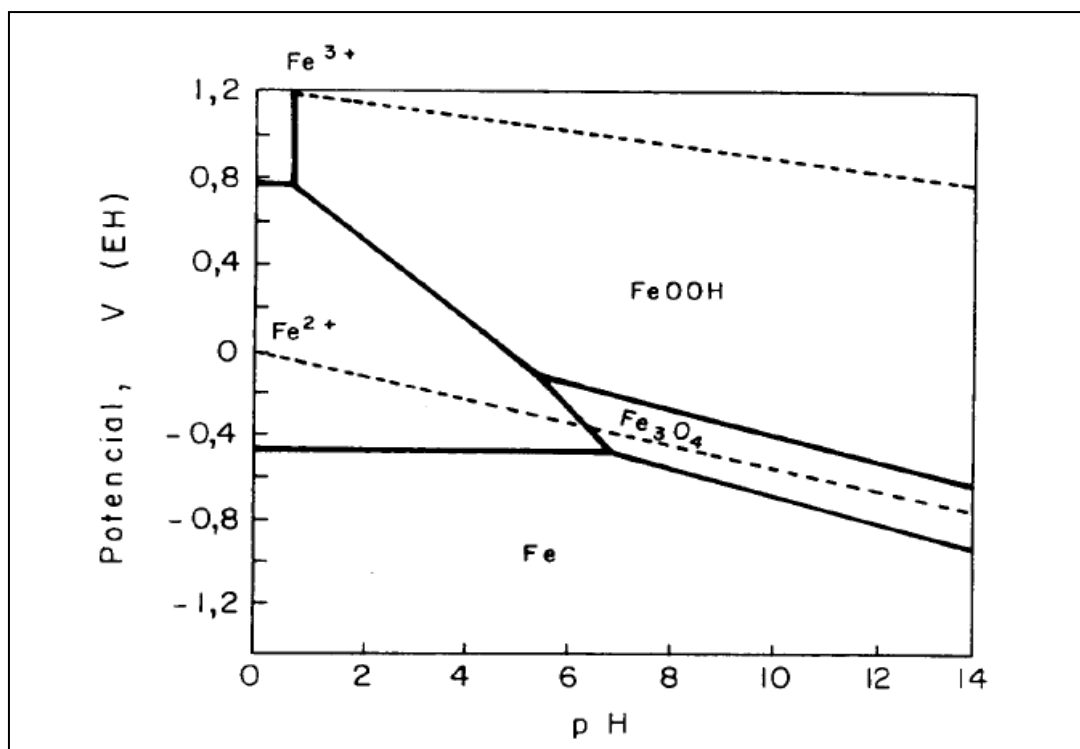


Figura 1.15: Diagrama de Pourbaix para el sistema Fe-H₂O. (CYTED, 1998)

Es muy difícil describir los procesos de crecimiento y transporte de los productos de corrosión atmosférica del acero al carbono, debido a la porosidad de estas capas que permiten el paso de O_2 y H_2O y demás iones presentes en la atmósfera. Estas capas de productos de corrosión presentan dos partes: una interna, de mayor densidad, próxima a la interfase metal-herrumbre, cuya composición en su mayoría corresponde a FeOOH amorfo con algo de Fe_3O_4 cristalina; además de una capa exterior porosa compuesta por oxihidróxidos cristalinos como α -FeOOH (goethita) y γ -FeOOH (lepidocrecita).

En atmósferas marinas tiene lugar la formación de akaganeita y magnetita, mientras que en atmósferas rurales, urbanas e industriales lejanas a zonas costeras se evidencia la formación de goethita y lepidocrecita (Fig. 1.16) (CYTED, 1998)

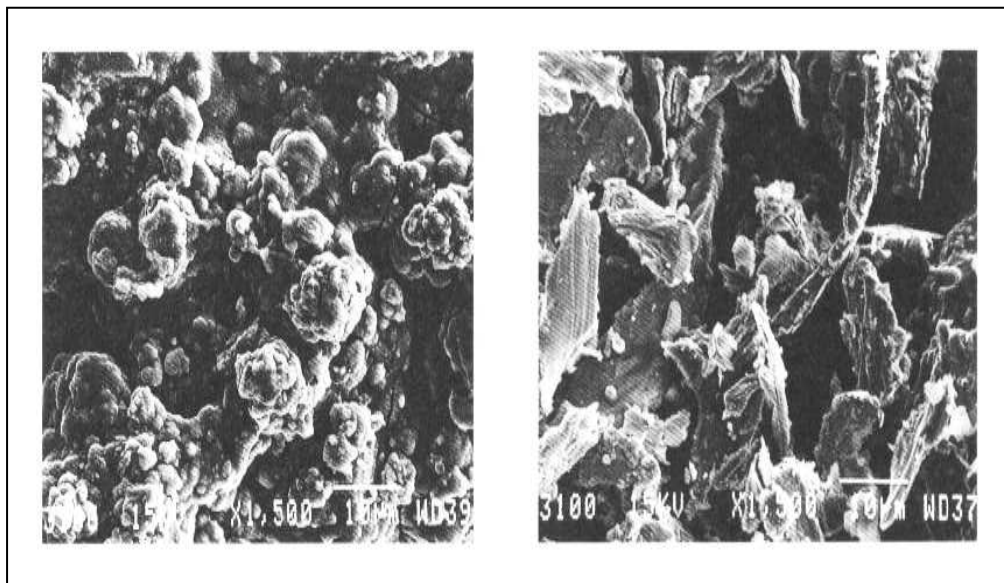


Figura 1.16: Formaciones de Goethita (izquierda) y Lepidocrecita (derecha) (CYTED, 1998)

Las reacciones electroquímicas son de vital importancia en la corrosión atmosférica del hierro y sus aleaciones (acero). En atmósferas no contaminadas, los productos primarios de la corrosión del hierro y sus aleaciones, en especial el hidróxido ferroso, se transforma en óxidos férricos hidratados insolubles de naturaleza amorfa y coloidal que dificultan la difusión de los reactantes y productos de la reacción a través de ellos, frenando así la velocidad de corrosión.

1.2.7.1.1.- Breve descripción de los productos de corrosión del acero. (CYTED, 1998)

1.2.7.1.1.1.-Magnetita.- Oxido de hierro de color negro, que se encuentra tanto en productos de corrosión como en la naturaleza. La formación de magnetita es favorecida por la baja concentración de oxígeno, este efecto se observa principalmente en regiones con concentraciones altas de cloruros. Se puede obtener por los siguientes métodos:

- Oxidación moderada seguida de deshidratación total en pH neutro, para atmósferas rural o urbana.
- Oxidación moderada seguida de deshidratación total en pH ácido, para atmósfera industrial.
- Reducción de lepidocrecita por mecanismos catódicos en pH ácido, para ambiente rural, urbano, industrial o marina.
- Unión directa de de iones ferrosos con agua en pH ácido.

1.2.7.1.1.2.-Goethita.- Es un oxi-hidróxido férrico de color gris rojizo resultado del rearrreglo molecular de la hematita hidratada. La formación de la goethita es favorecida por la mayor difusión de oxígeno en los productos de corrosión. Los mecanismos de formación de la goethita son los siguientes:

- Disolución de la lepidocrecita en dos oxi-hidróxidos férricos amorfos.
- Oxidación moderada seguida de deshidratación parcial en pH fuertemente alcalino.

1.2.7.1.1.3.-Akaganeita.- Es un oxi-hidróxido de color naranja, específico de Corrosión marina, formada únicamente en presencia obligatoria de iones cloruro en medio ácido.

1.2.7.1.1.4.- Lepidocrecita.- Es un óxido de hierro en forma de láminas de color rojo. La formación de la lepidocrecita es favorecida por el aumento de la temperatura atmosférica. Los mecanismos de formación de la lepidocrecita son los siguientes:

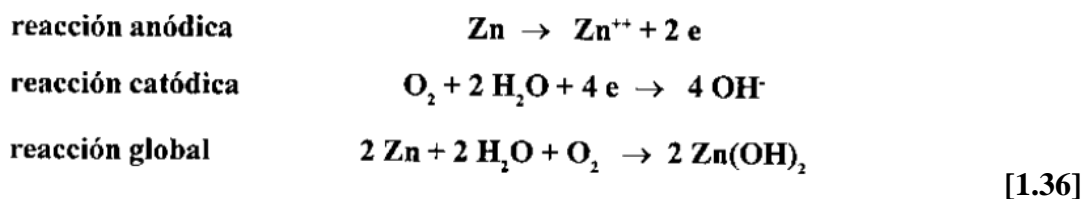
- Oxidación moderada seguida de deshidratación parcial en medio ácido de los complejos ferroso – férrica en complejos férricos básicos, para ambientes rurales y urbanos.
- Oxidación moderada seguida de deshidratación parcial en medio ácido para ambientes industriales.

1.2.7.1.1.5.-Productos amorfos (δ -FeOOH).- En atmósferas rurales y urbanas, cuando el pH medio se torna alcalino durante el proceso corrosivo de aceros y sus aleaciones, en presencia de H_2O y de iones Cu^{++} , o hidróxido ferroso, en fase

húmeda produce oxi-hidróxidos férricos amorfos. Los oxi-hidróxidos férricos se pueden redissolver y precipitar en forma de goethita.

1.2.7.2.- Corrosión del zinc

El zinc en presencia de O_2 y humedad forma hidróxido de zinc ($Zn(OH)_2$) de acuerdo a las siguientes reacciones:



El diagrama de Pourbaix de la Figura 1.17 muestra las zonas de estabilidad del Zn, Zn^{2+} , $ZnCO_3$, y $Zn(OH)_2$.

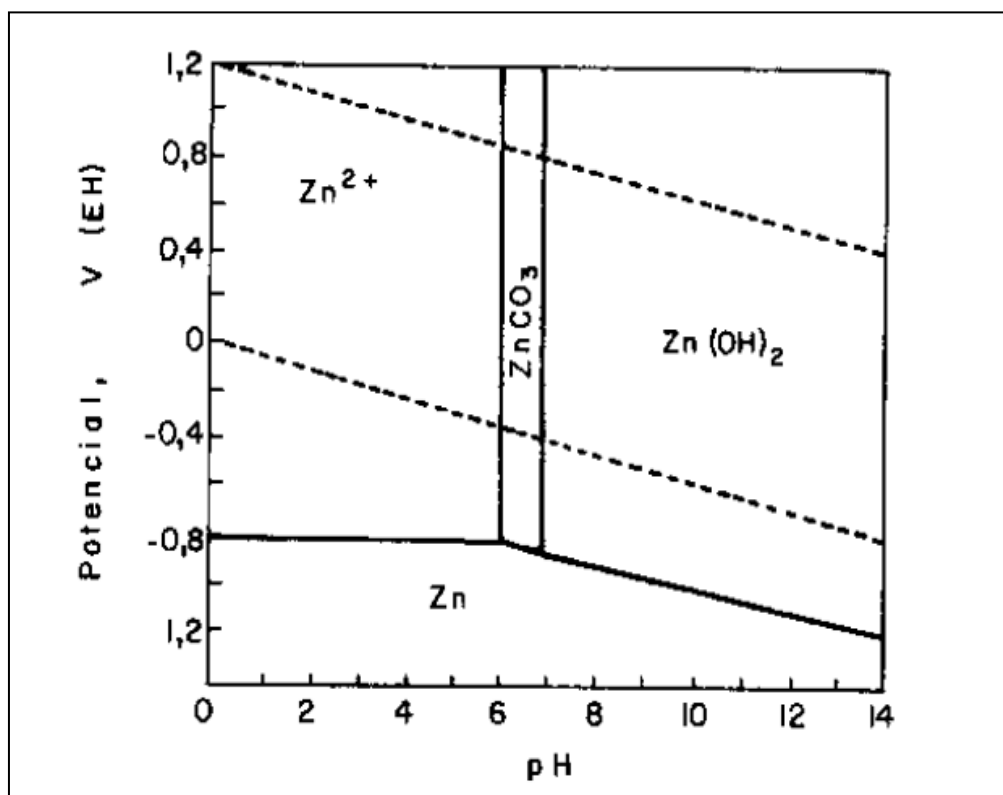
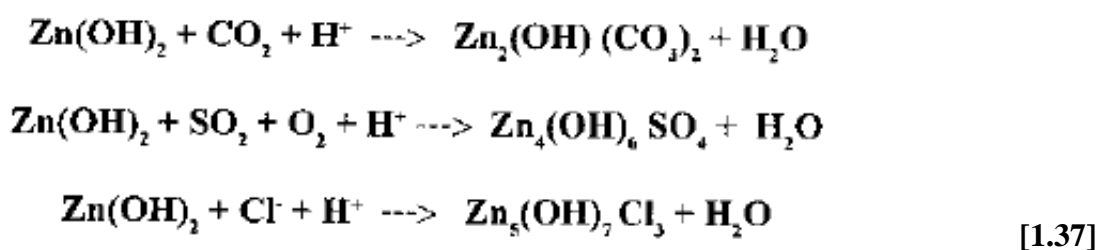


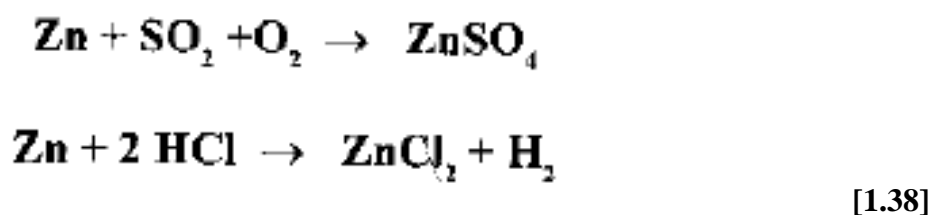
Figura 1.17: Diagrama de Pourbaix para el sistema Zn-CO₂-H₂O. (CYTED, 1998)

Los productos de corrosión más frecuentes del zinc son: hidrocincita, $Zn_5(OH)_6(CO_2)_2$ carbonatos básicos de zinc, ($Zn_2(OH)_2CO_3$), ($Zn_4(OH)_6CO_3$) ; óxido de zinc ,ZnO ; hidróxido de zinc (ϵ -Zn(OH)₂ y β - Zn(OH)₂ ; hidroxisales de zinc (sulfato básico de zinc, cloruro básico de zinc, etc.), productos todos estos solubles en agua a baja temperatura.

En presencia de CO₂, las reacciones de corrosión del zinc dan lugar a la formación de ZnCO₃, el mismo que es ligeramente soluble en soluciones acuosas. Los hidróxidos de zinc formados reaccionan con los gases disueltos en la Atmósfera, como CO₂, SO₂, Cl, etc., dando lugar a las correspondientes sales básicas, siempre que el pH de la película de humedad sea suficientemente alto.



En el caso de atmósferas fuertemente acidas, el pH de la película de humedad tiene valores bajos, por esta razón no se forman los hidróxidos y sales básicas de zinc y en su lugar se forma sulfato y cloruro de zinc.



El carácter soluble de estos compuestos en agua, hacen que se lixivien de la superficie metálica por acción de la lluvia.

Estudios de Difracción de rayos X y Micrografía Electrónica de Barrido en muestras de zinc expuestas a atmósferas contaminadas en periodos de larga duración, Fig. 1.18 muestran que los productos derivados de la corrosión del zinc se disponen en dos capas: una interna estable y sensible a la concentración de SO₂ que controla la cinética de corrosión, y otra exterior, relativamente no protectora que crece en forma continua. . (CYTED, 1998)

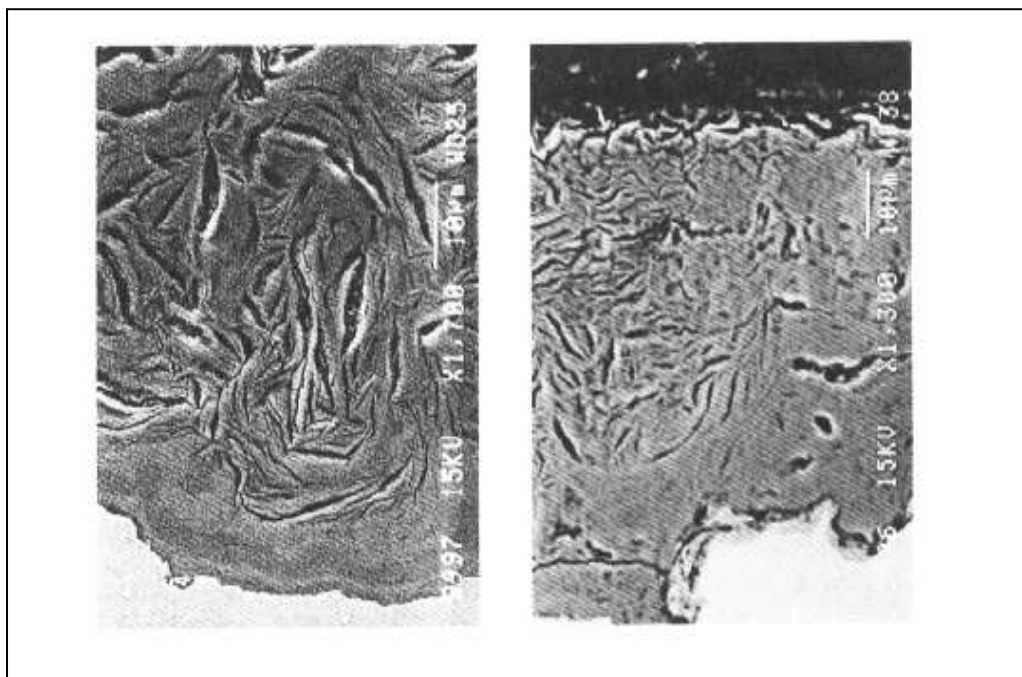


Figura 1.18.- Micrografías de la disposición de los productos de corrosión del Zinc (CYTED, 1998).

1.2.7.2.1.- Breve descripción de los productos de corrosión del zinc.

El zinc es muy usado como revestimiento anticorrosivo en acero galvanizado. Cuando el acero galvanizado es expuesto a atmósferas no contaminadas forma óxido de zinc, hidróxido de zinc, en presencia de CO_2 forma carbonato básico de zinc.

1.2.7.2.1.1.- Hidróxido de zinc.- Se forma en atmósferas de alta humedad y se observa frecuentemente en ensayos de cámaras climáticas.

1.2.7.2.1.2.-Zincita.- Es el producto inicial de la corrosión del zinc (óxido de zinc), se forma instantáneamente en aire seco a temperatura ambiente.

1.2.7.2.1.3.-Hidrozinca.- Es óxido de zinc convertido en carbonato básico de zinc debido a la presencia de agua y dióxido de carbono en la atmósfera.

1.2.7.2.1.4.-Cloruro Básico de zinc.- Se forma en ambientes de alta concentración de iones cloruro (alta salinidad). Se lo llama también simonkolleita.

1.2.7.2.1.5.- Carbonato de zinc.- Se forma en atmósferas urbanas después de largos periodos de exposición.

1.2.7.2.1.6.- Hidroxi-sulfato de zinc.- Se forma en atmósferas húmedas y ricas en compuestos de azufre con diferentes grados de hidratación, siendo el más común el $Zn_4SO_4(OH)_6 \cdot 4H_2O$.

1.2.7.2.1.7.-Sulfato de zinc.- Se forma en atmósferas ricas en dióxido de azufre (SO_2) y es soluble en agua. También es llamada Guningita ($ZnSO_4 \cdot H_2O$). . (CYTED, 1998)

1.2.7.3.-Corrosión del cobre

El cobre es un material metálico muy estable en un amplio dominio del área de estabilidad del agua, esto se puede observar en la Figura 1.19

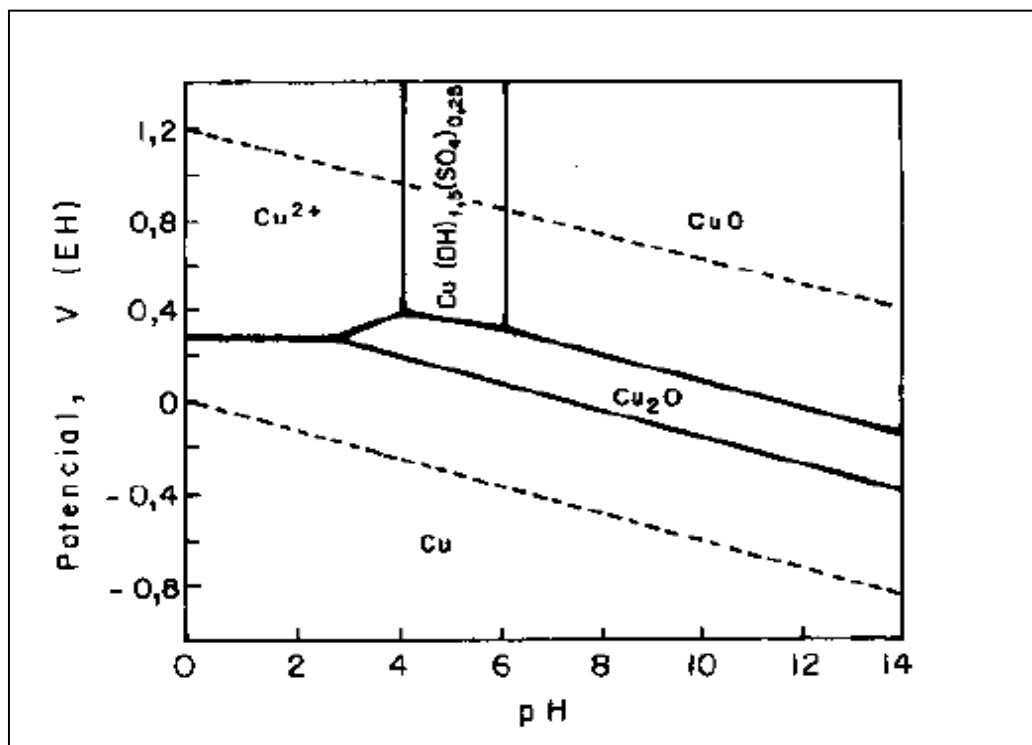
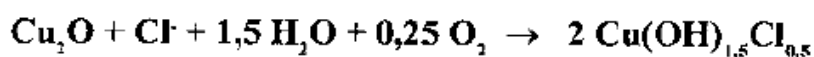
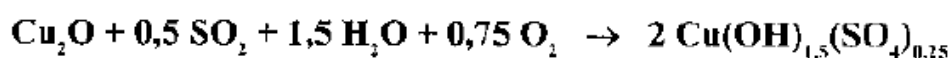


Figura 1.19.-Diagrama de Pourbaix para el sistema $CuSO_4-H_2O$ (CYTED, 1998)

Los productos más comunes de la corrosión atmosférica del cobre son insolubles en agua, entre estos podemos encontrar los óxidos de cobre (CuO, Cu₂O), sulfatos, carbonatos y cloruros básicos de cobre. El primer producto que se forma sobre la superficie metálica del cobre es la cuprita (Cu₂O), posteriormente esta reacciona con los gases disueltos en la atmósfera (SO₂, Cl₂, CO₂) y, dependiendo de si el pH de la película húmeda es suficientemente alto, se forman sales básicas de cobre.



[1.39]

En atmósferas moderadamente ácidas, las sales básicas formadas confieren protección a la superficie metálica, esto debido a que son estables a partir de pH mayor que 4.

Las capas de productos de corrosión atmosférica del cobre son química y microestructuralmente muy complejos, sus constituyentes químicos son conocidos y están relacionados con las especies encontradas en la atmósfera.

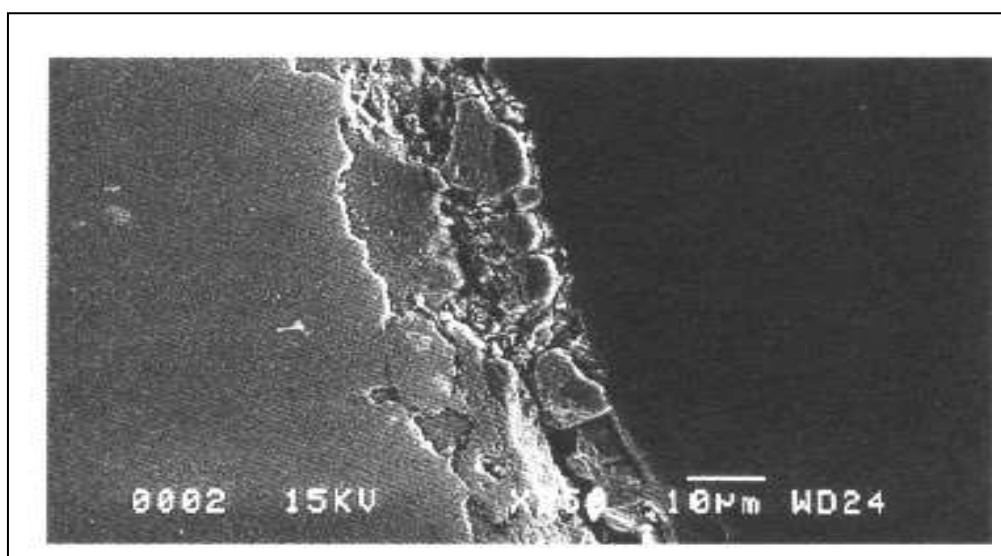


Figura 1.20.- Fotografía de los productos de corrosión del cobre después de 14 años de exposición. (CYTED, 1998).

El análisis microscópico de los productos naturales de la corrosión atmosférica del cobre muestra una estructura heterogénea, altamente porosa y con un bajo nivel de laminaridad, las capas más próximas al cobre son de óxido de cobre y las exteriores son sales básicas esencialmente, como el sulfato de cobre. . (CYTED, 1998)

1.2.7.3.1.- Breve descripción de los productos de corrosión del cobre

1.2.7.3.1.1.-Cuprita.-Es el principal producto formado en la superficie del cobre en condiciones de exposición atmosférica y fácilmente detectado por difracción de rayos X en un corto periodo de exposición atmosférica. Es de color rojo oscuro, insoluble en agua y ligeramente soluble en ácidos.

1.2.7.3.1.2.- Brocantita.- Es una mezcla de sulfato e hidróxido de cobre. Normalmente se la encuentra como una capa verde formada en atmósferas urbanas e industriales. Es insoluble en agua y en ácidos.

1.2.7.3.1.3.- Posnjakita.- Es un sulfato mineral, estequiométricamente es idéntica a la brocantita, excepto en el grado de hidratación, fue identificada por primera vez en 1974, es insoluble en agua y soluble en ácidos.

1.2.7.3.1.4.-Antlerita.- Es una mezcla de sulfatos e hidróxidos de cobre; su formación ocurre en las primeras fases de formación de la capa de producto corrosivo, antes de la brocantita. Es insoluble en agua y soluble en ácidos débiles.

1.2.7.3.1.5.- Atacamita.- Es un cloruro básico de cobre que se forma en ambientes marinos. Es insoluble en agua y soluble en ácidos débiles.

1.2.7.3.1.6.- Paratacamita.- Es un isómero de la atacamita, su presencia se debe a una ocasional conversión de la misma. Es insoluble en agua y soluble en ácidos débiles.

1.2.7.3.1.7.- Calcocita.- Es un producto común de la corrosión del cobre en zonas urbanas, su estructura es cristalina y es insoluble en agua y soluble en ácidos.

1.2.7.3.1.8.-Covelita.- Es producto de la posterior oxidación de la calcocita, es también insoluble en agua y soluble en ácidos. (CYTED, 1998).

1.2.7.4.- Corrosión del aluminio

Las superficies de aluminio y aleaciones de este expuestas a la atmósfera presentan una gran resistencia a gran cantidad de climas, esto se debe a la formación de capas de alúmina amorfa sobre la superficie metálica producto de la exposición a condiciones atmosféricas en ausencia de humedad.

Esta alúmina amorfa es el óxido de aluminio hidratado ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), el mismo que es muy adherente, insoluble en agua y fuertemente pasivante de la corrosión Fig. 1.21.

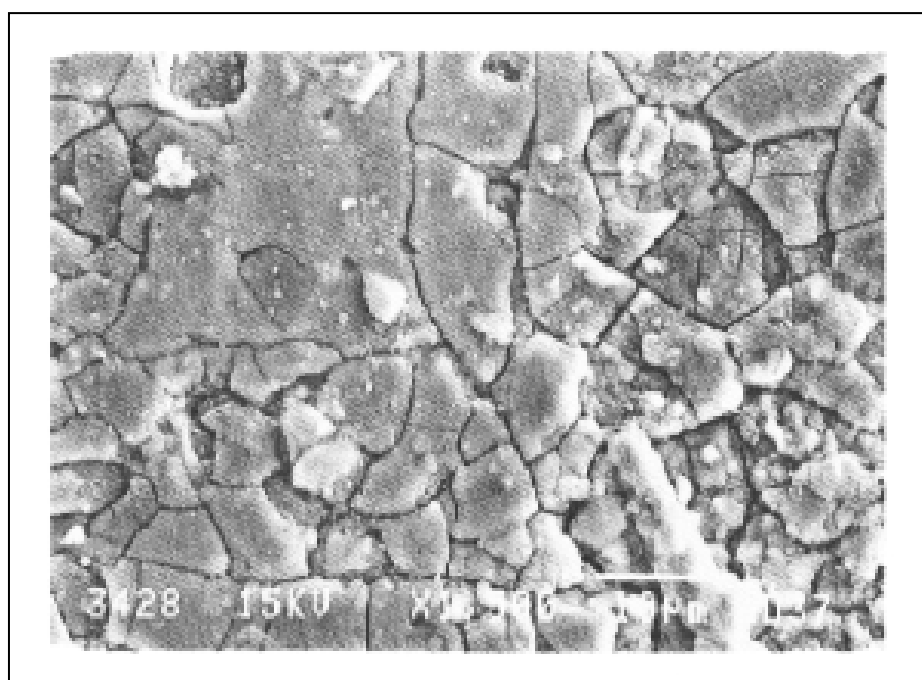


Figura 1.21.- Micrografía de una probeta de Al luego de 13 años de exposición. (CYTED, 1998).

Entre los productos más comunes de la corrosión del aluminio se han podido identificar: alúmina amorfa ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), bayerita ($\alpha\text{-Al}(\text{OH})_3$) y $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Estos compuestos son bastante inertes y forman una capa pasivante de la corrosión.

En la Figura 1.22 se muestra el diagrama de Pourbaix para el sistema Al-H₂O, en él se puede observar que la especie más estable en este sistema es la alúmina (Al₂O₃ · 3H₂O).

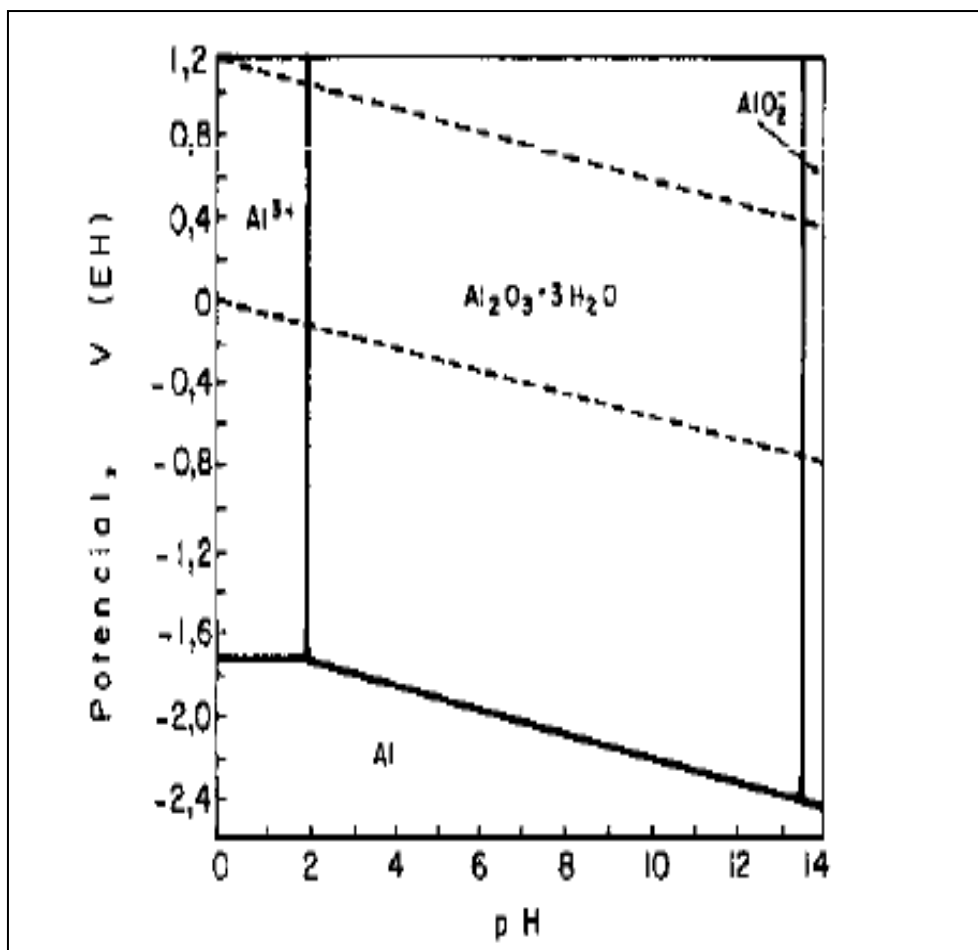


Figura 1.22.- Diagrama de Pourbaix para el sistema Al- H₂O. (CYTED, 1998).

El proceso corrosivo del aluminio es más complejo que el de otros metales, el aluminio puede atacarse de un modo uniforme por disolución de la capa de óxido por ácidos u otros iones reactivos, que conducen a la formación de sales solubles como el Al₂(SO₄), o sales básicas que se incorporan a la capa de productos de corrosión. Por otro lado, el principal ataque que sufre este metal es por picadura, de manera particular en presencia de iones Cl⁻, que se absorben en las porosidades de la capa de óxido formando complejos solubles como Al(OH)₂Cl, que se difunden lejos de la zona de reacción produciendo el adelgazamiento de la capa de óxido y la formación de la picadura. (CYTED, 1998)

1.2.7.4.1.- Breve descripción de los productos de corrosión del aluminio

1.2.7.4.1.1.- Alúmina.- Es una película de óxido de aluminio, Al_2O_3 , cuando la superficie metálica ha sido expuesta al aire o ha sido sometido a un proceso de anodizado. Esta es la responsable de la gran resistencia que presentan el aluminio y sus aleaciones a la corrosión atmosférica. Es insoluble en agua.

1.2.7.4.1.2.-Sulfato Básico de aluminio.- Lo forma el dióxido de azufre en presencia de humedad, es de color blanco y característico de zonas industriales; es soluble en agua fría. (CYTED, 1998)

1.2.8.- CORROSION EN ATMOSFERAS MARINAS

1.2.8.1.-Antecedentes

Fuera de la clasificación de las atmósferas hecha por la normativa ISO, de acuerdo con la intensidad y la agresividad de los procesos corrosivos que en ellas se dan, cabe tratar de manera más detallada a cierto tipo de atmósferas que por su ubicación y que por diversos factores tienen una intensidad corrosiva superior a las demás, como es el caso de la atmósfera de la ciudad de Esmeraldas, que por su condición de ciudad costera presenta una gran concentración de iones cloruro disueltos en la atmósfera, además de esto, existe otro factor que hace que esta atmósfera presente un comportamiento peculiar, su gran actividad industrial derivada de los procesos de refinación hidrocarburífera de la Refinería Estatal de Esmeraldas y de las emisiones de la central de generación eléctrica Termo Esmeraldas.

1.2.8.2.- Introducción

La corrosión marina incluye el deterioro de estructuras y recipientes de almacenamiento inmersos en agua marina, la corrosión de maquinaria y sistemas de tubería que usan agua marina para enfriamiento y otros usos industriales,

además de la corrosión atmosférica marina. Aunque los ambientes marinos son generalmente considerados como ambientes corrosivos, no están ampliamente entendidos como los ambientes de agua dulce. (ASTM Handbook, 1992)

La Figura 1.23 muestra la velocidad de Corrosión en solución acuosa de NaCl a varias concentraciones; la máxima Corrosión ocurre a una concentración de 3.5% de NaCl.

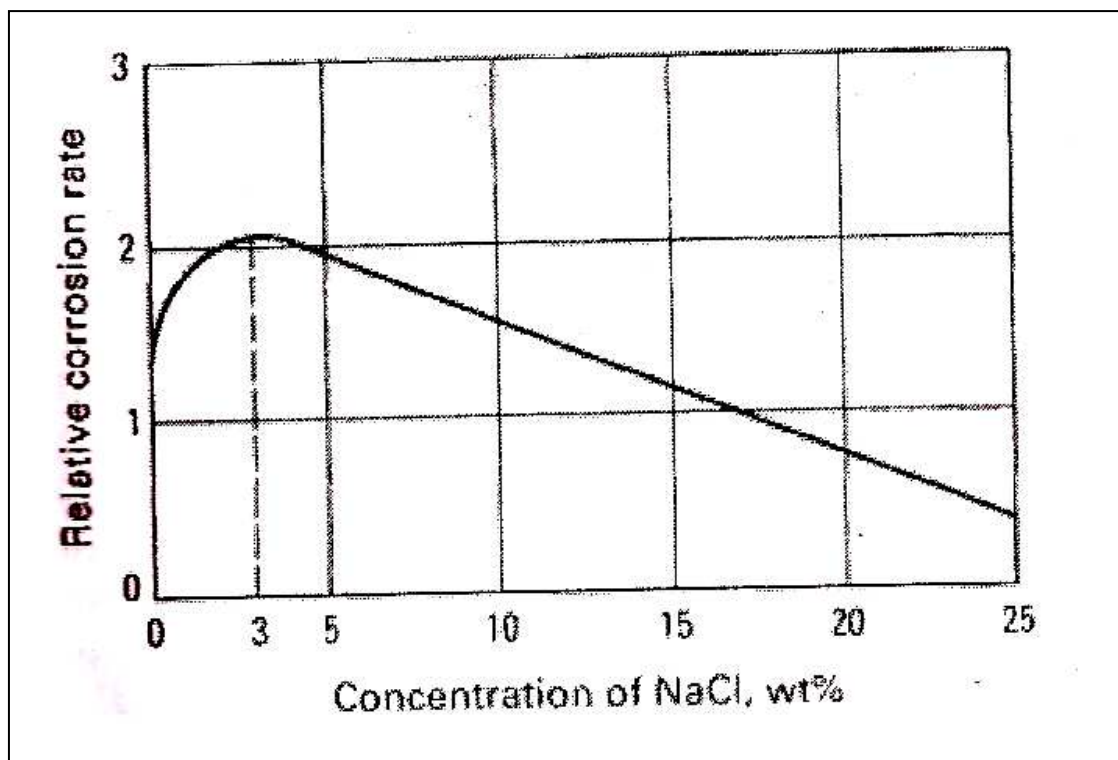


Figura 1.23: Velocidad de Corrosión Vs. Concentración de NaCl Agua (ASTM Handbook, 1992)

1.2.8.3.-Agua de mar

El ambiente marino incluye una gran diversidad de subambientes como agua en mar abierto, agua de mar costera, agua salobre de estuarios, sedimentos de fondos y atmósfera marina.

La exposición de estructuras y materiales a estos ambientes puede ser continua o intermitente, dependiendo de la aplicación. Las estructuras expuestas en aguas pocas profundas son muy a menudo expuestas a cinco zonas de corrosión,

comenzando con la atmósfera marina, la estructura entonces pasa a través del rocío, la marea, el subsuelo, los lodos. (ASTM Handbook, 1992)

La velocidad relativa de corrosión que a menudo experimenta una estructura de acero que atraviesa por estas zonas, se muestra en la Figura 1.24.

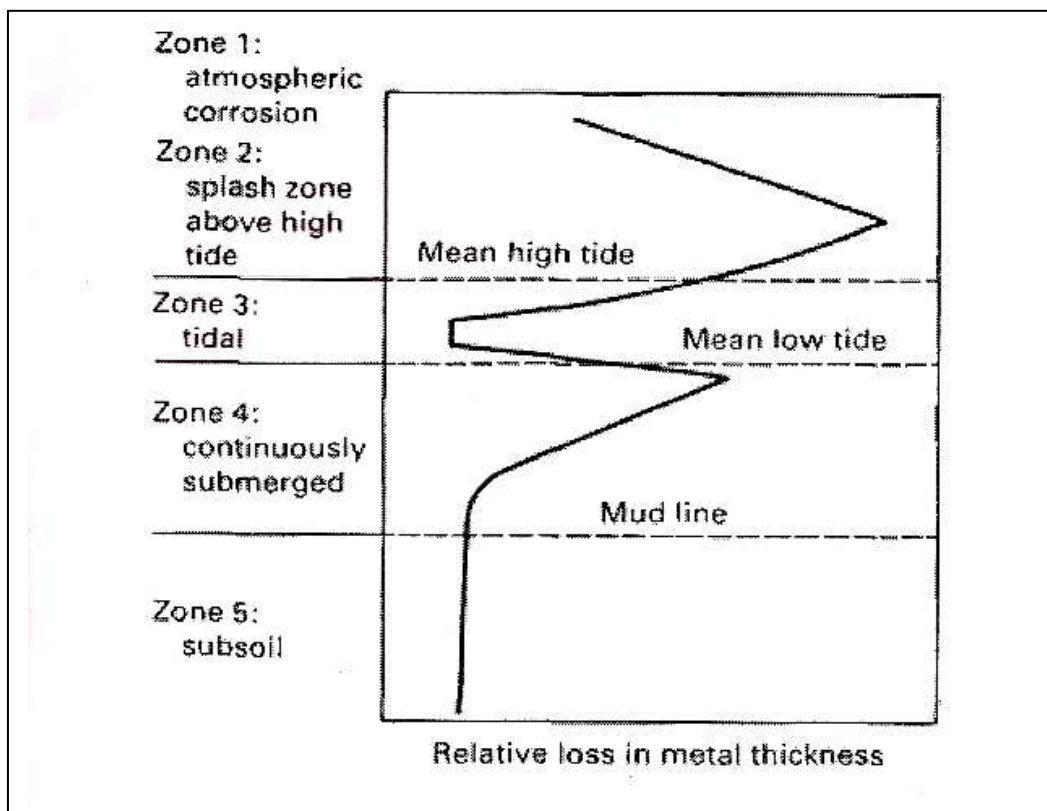


Figura 1.24.- Zonas de corrosión en el Agua (ASTM Handbook, 1992)

La mayoría de los componentes del agua de mar son constantes alrededor del mundo; sin embargo, ciertos componentes varían de sitio en sitio de acuerdo con las estaciones, mareas, tormentas, etc. Estos componentes incluyen trazas de elementos y gases disueltos, el agua de mar contiene también material orgánico disuelto y microorganismos vivos, frecuentemente estos componentes químicos minoritarios de agua de mar, junto al material orgánico y los organismos vivos son el factor controlante de la corrosión de estructuras metálicas. (ASTM Handbook, 1992).

1.2.8.4.- Atmósferas marinas

Una variedad de factores afectan la corrosión atmosférica y el comportamiento de los materiales, entre estos tenemos el tiempo de humectación (TDH), temperatura, materiales, contaminantes del aire, radiación solar, microorganismos, la composición de los productos de corrosión además de la localización del lugar de exposición.

La atmósfera marina y marina industrial son generalmente consideradas como los mas ambientes mas agresivos. (ASTM Handbook, 1992)

1.2.8.4.1.- Variables importantes

1.2.8.4.1.1.- Humedad.-En procesos corrosivos electroquímicos se necesita de un electrolito, el agua de mar es un excelente electrolito. Para el acero, mas allá del punto de humedad crítica, (H_c) se observa una aceleración de la velocidad de corrosión atmosférica.

Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 1.25, donde la H_c es del 60% para el hierro en atmósferas libres de SO_2 y del 90% para el magnesio. La H_c no es un valor constante, depende de la higroscopia de los productos de corrosión y de los contaminantes. Una manera de medir y caracterizar esta humedad es el tiempo de humectación (TDH).

1.2.8.4.1.2.- Contaminantes del aire.- El segundo más importante factor de la corrosión atmosférica son los contaminantes encontrados en el aire. Estos pueden ser naturales u originados por el accionar del hombre, por ejemplo, la humedad del aire que transporta la sal del océano o el SO_2 derivado de procesos industriales de combustión, los contaminantes más importantes son Cl^- , SO_2 , CO_2 , NO_2 y material particulado. (ASTM Handbook, 1992)

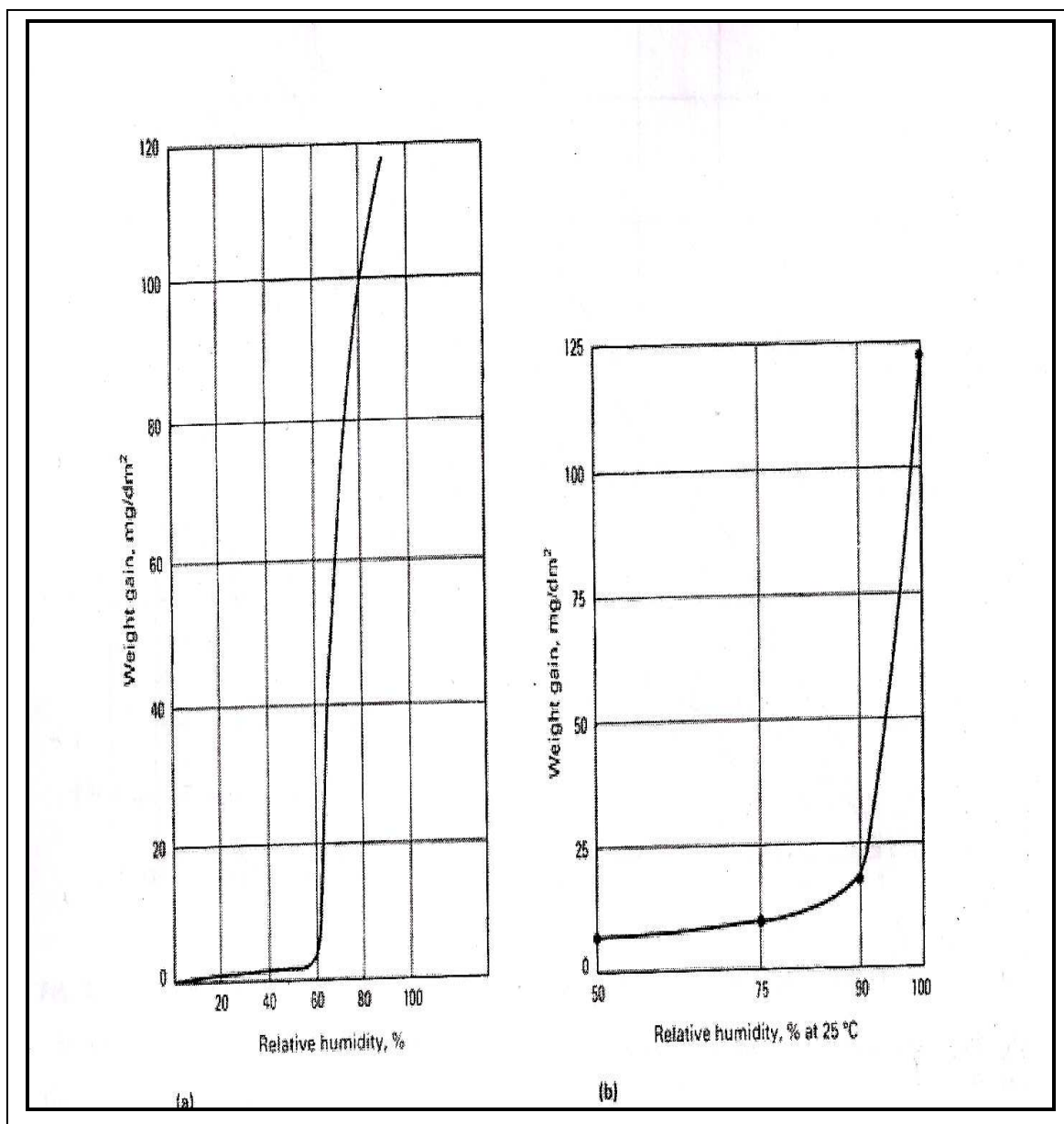


Figura 1.25.- Velocidad de Corrosión vs. Humedad (ASTM Handbook, 1992)

1.2.8.4.1.3.-Cloruros

Los iones cloruro presentes en la atmósfera proceden de los ambientes marinos que, mediante las corrientes de aire, son arrastrados tierra adentro; estos alcanzan una concentración comprendida entre: 0,5 y 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Otra fuente natural de emisiones de cloruro hacia la atmósfera son los gases procedentes de las

erupciones volcánicas. Se estima que cada año se liberan en la atmósfera de procedencia industrial, alrededor de tres millones de toneladas de HCl. (ASTM Handbook, 1992)

La salinidad de las atmósferas marinas varía dentro de un amplio rango desde valores muy elevados en áreas de olas rompiendo a valores bajos en zonas de agua de mar en calma. Además la salinidad varía su concentración de acuerdo con la distancia de un punto al mar, como se puede observar en la Figura 1.26.

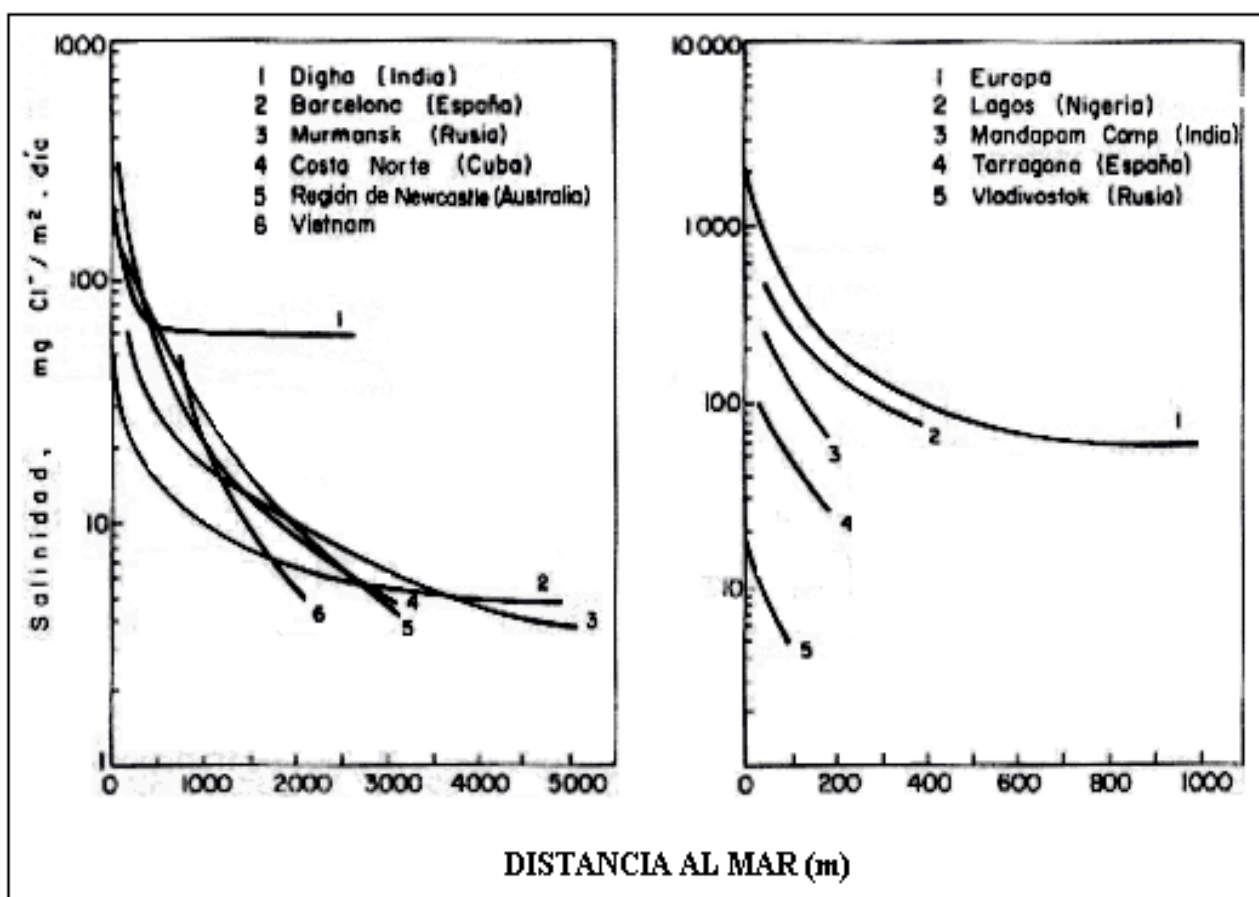


Figura 1.26.- Variación de la salinidad atmosférica con la distancia a la costa (CYTED, 1998).

El depósito de partículas de cloruro de sodio sobre la superficie metálica acelera la corrosión, ya que pueden dar lugar a la formación de productos de corrosión solubles, por lo tanto existe una relación directa entre el contenido de sal marina en la atmósfera y la velocidad de corrosión medida. Así se tiene que la cantidad de sal medida en la costa de Nigeria, para una salinidad de 10mg/m²día resulta

una velocidad de corrosión de al menos $0.1\text{g}/\text{dm}^2\text{mes}$ mientras que para una salinidad de $1000\text{mg}/\text{m}^2\text{día}$ se tiene una corrosión de $10\text{g}/\text{dm}^2\text{mes}$.

(CYTED, 1998).

1.2.8.4.1.4.-Luz del sol

La luz solar tiene influencia sobre el grado de humedad y afecta el rendimiento de los recubrimientos y de los plásticos. Puede también estimular las reacciones de corrosión fotosensible en metales como cobre y hierro. Además puede estimular las reacciones biológicas como el desarrollo de hongos, y la luz ultravioleta puede causar foto- oxidación. (ASTM Handbook, 1992)

1.2.8.4.1.5.- Viento

La dirección y velocidad del viento afecta la velocidad de acumulación de partículas sobre la superficie del metal. También, el viento dispersa los contaminantes presentes en el aire. Un ambiente marino puede ser aún más agresivo con la presencia de fuertes vientos que arrastren contaminantes industriales y partículas de SO_2 . (ASTM Handbook, 1992).

1.2.8.4.1.6.- Temperatura

La temperatura ambiental tiene influencia sobre el punto de rocío, la humedad relativa, el tiempo de humectación y la cinética de los procesos de corrosión. Para la corrosión atmosférica la presencia de humedad está determinada por el tiempo de humectación, este es el más importante rol de la temperatura. En la Figura 1.28 se puede observar el efecto de la temperatura en la velocidad de corrosión de diversos materiales. (ASTM Handbook, 1992)

1.2.8.4.1.7.- Tiempo

Para muchos materiales se tiene una disminución de la velocidad de corrosión al aumentar el tiempo de exposición. Esta disminución está asociada con la formación de capas protectoras de productos de corrosión.

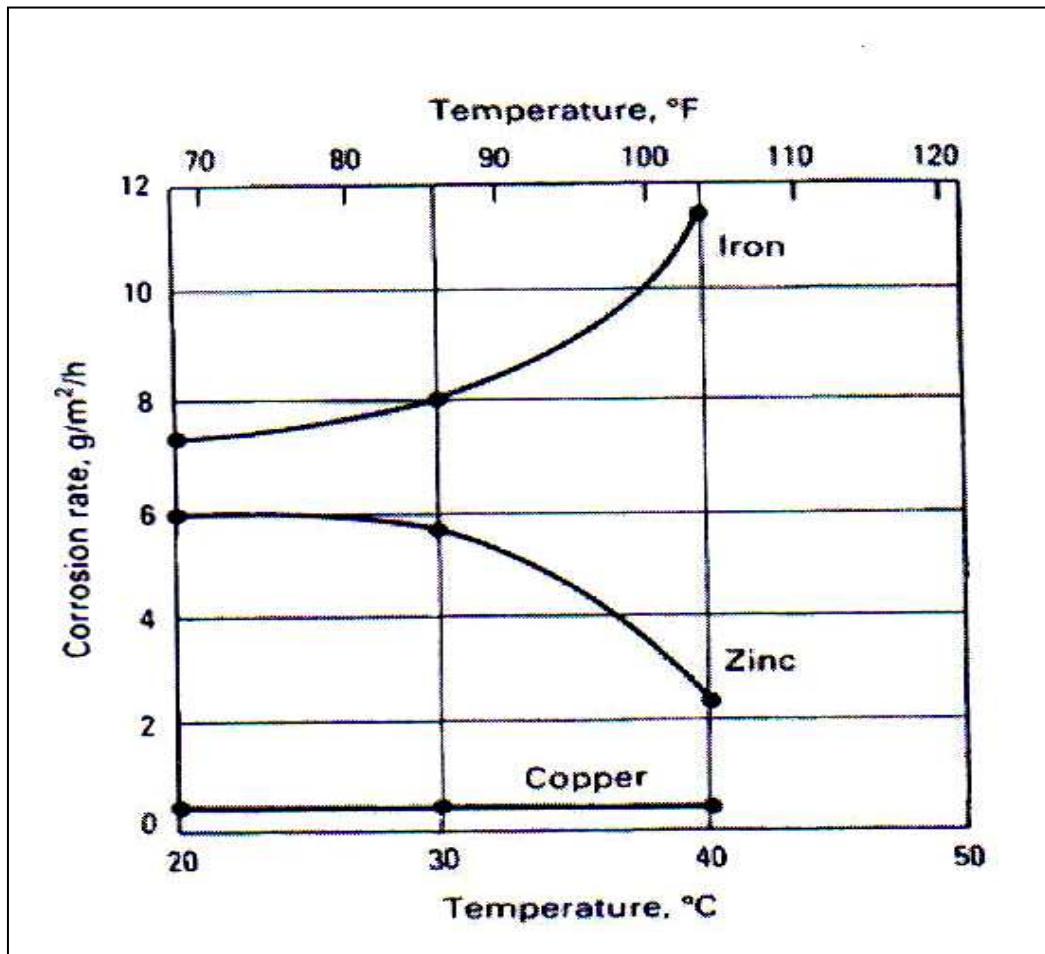


Figura 1.27.- Velocidad de Corrosión vs. Temperatura (Gösta, 1985)

1.2.9.- CORROSION EN ATMOSFERAS INDUSTRIALES

Las atmósferas industriales se caracterizan por su contaminación con hollín, cenizas, compuestos azufrados y productos químicos que resultan de procesos industriales cuyos residuos son desechados en ellas. Los compuestos azufrados permanecen mucho tiempo en el aire, son muy agresivos y, aunque se oxidan parcialmente con el oxígeno, al contacto con la humedad forman ácido sulfúrico que reacciona con los metales formando sulfatos.

En general, las atmósferas industriales son muy corrosivas por cuanto sirven como medio de difusión de infinidad de productos químicos. Por ello es necesario analizar su composición a

fin de proteger los objetos que están sometidos a su influencia. En una fábrica, por ejemplo, la atmósfera puede ser totalmente diferente de una sección a otra, según los productos que en ellas se elaboren y la contaminación que generen. Otros materiales corrosivos, contaminantes atmosféricos, pueden ser arrastrados por el viento desde otras áreas. (ASTM Handbook, 1992).

1.2.9.1.- Principales contaminantes

1.2.9.1.1.- Dióxido de azufre

La fuente natural de azufre es la actividad volcánica. Las emisiones artificiales de dióxido de azufre se han incrementado en las últimas décadas llegando a representar cerca del 90% total de emisiones.

Éste dióxido de azufre puede ser: emitido a la atmósfera, oxidado y convertido a ácido sulfúrico a través de reacciones homogéneas o heterogéneas, eliminado en forma de depósito seco sobre agua, plantas, edificios, etc., o en el peor de los casos inhalado por los seres vivos.

Las altas chimeneas de los complejos industriales fomentan este fenómeno en la atmósfera, como se puede observar en la Figura 1.28. (ASTM Handbook, 1992; CYTED, 1998).



Figura 1.28- Emisiones Gaseosas de chimeneas (Refinería Estatal Esmeraldas)

Para el acero al carbono el efecto de los niveles de SO_2 , en un estudio noruego muestra que cuando las concentraciones de SO_2 se elevan, también se incrementa la velocidad de corrosión medida a través del peso perdido, por ejemplo para una concentración de SO_2 de 25 ug/m^3 la velocidad de corrosión es de aproximadamente $55 \text{ g/m}^2/\text{mes}$ mientras que para una concentración de 100 ug/m^3 la correspondiente velocidad de corrosión es de $170 \text{ g/dm}^2/\text{mes}$. (CYTED, 1998).

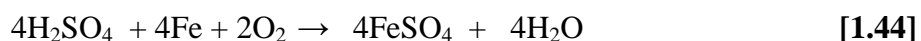
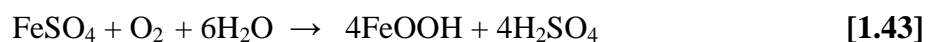
Un resumen escandinavo muestra las siguientes relaciones entre la velocidad de corrosión y la concentración de SO_2 para el acero al carbono y el zinc:

$$V_{\text{ACERO}} = 5.28 * [\text{SO}_2] - 176.6 \quad [1.40]$$

$$V_{\text{ZINC}} = 0.22 * [\text{SO}_2] - 6 \quad [1.41]$$

En donde V_c es la velocidad de corrosión en $\text{g/m}^2 \cdot \text{año}$ y la $[\text{SO}_2]$ en ug/m^3 . (CYTED, 1998).

Al analizar el efecto del dióxido de azufre en la corrosión del acero se observa los siguientes mecanismos de reacción: adsorción del dióxido de azufre sobre la superficie metálica del acero, a continuación formación de sulfato ferroso por la acción directa del dióxido de azufre y aire sobre el hierro, posteriormente se forma más herrumbre a partir del sulfato ferroso en presencia de humedad con la liberación de ácido sulfúrico, la cual reacciona con el hierro para obtener nuevamente sulfato ferroso. (ASTM Handbook, 1992)



El ácido sulfúrico se regenera con el consumo del agua, el proceso de la corrosión del metal depende del tiempo de humectación de la superficie metálica, por lo

tanto la superficie del acero se ve afectada por un proceso cíclico de formación de herrumbre como se muestra en la Figura 1.29:

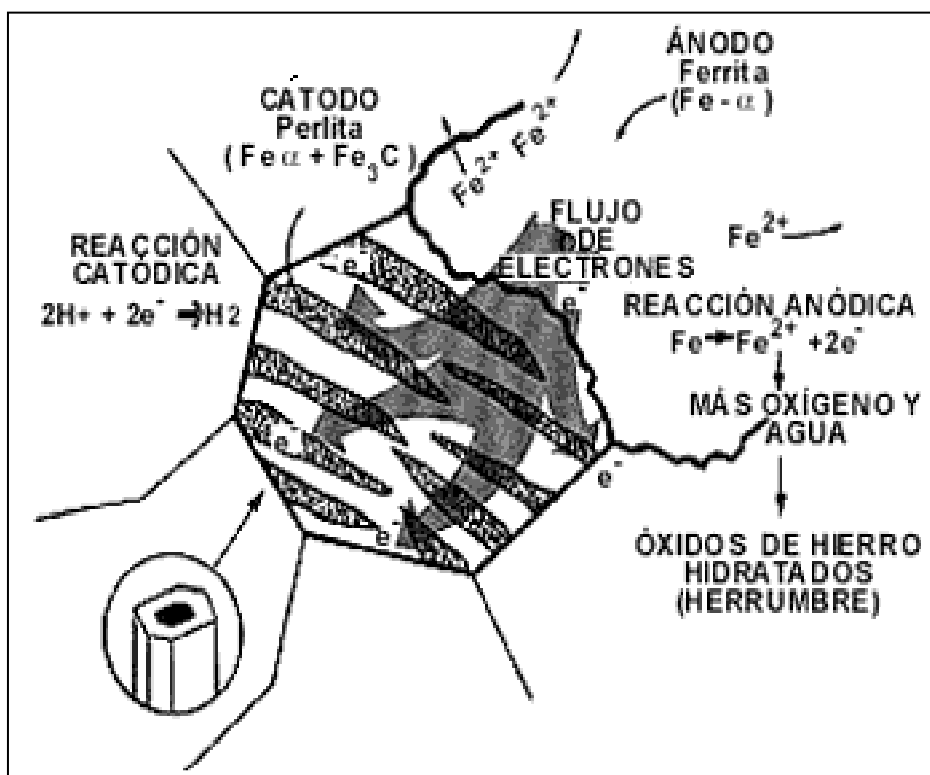


Figura 1.29.-Proceso cíclico de formación de herrumbre (Genescá J. y Ávila J., 1996)

1.2.9.1.2.- Dióxido de carbono

El dióxido de carbono se encuentra en la atmósfera en concentraciones de 0,03 a 0,05 % en volumen, existen variaciones ligeras durante del día y con la estación del año debido a su ciclo en la naturaleza.

El CO_2 en presencia de agua forma el ácido carbónico en un rango de pH de 5-6. Se han encontrado carbonatos en los productos de corrosión sobre un número de metales, tales como el acero y el cobre. La presencia de CO_2 podría disminuir los efectos del SO_2 debido a la naturaleza de los productos de corrosión formados.

1.2.9.1.3.-Óxidos de nitrógeno (NOx)

En el ambiente se encuentran alrededor de 20 compuestos inorgánicos de nitrógeno, siendo la mayoría gaseosos. Algunos de ellos son óxidos entre lo que

se destacan: el óxido nitroso (N₂O), óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂).

El óxido nitroso tiene su origen en la actividad biológica del suelo. El óxido nítrico y el dióxido de nitrógeno se generan en los procesos de combustión de alta temperatura, tales como plantas industriales, incendios forestales, centrales térmicas y especialmente en los motores de combustión interna.

Las concentraciones tanto de dióxido de nitrógeno como de óxido nítrico varían desde 0,47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en ambientes rurales hasta 1,60-121 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en ambientes urbanos. (ASTM Handbook, 1992).

El óxido nítrico cuando se encuentra a elevadas temperaturas se convierte a dióxido de nitrógeno en presencia de oxígeno de acuerdo con la siguiente reacción de combustión:



El dióxido de nitrógeno (NO₂) y el óxido nítrico (NO) no son los causantes directos de la corrosión, no obstante el dióxido de nitrógeno puede reaccionar con el agua y formar el ácido nítrico, el cual ocasiona el proceso corrosivo en las superficies metálicas mediante el siguiente mecanismo de reacción:



1.2.9.1.4.-Material particulado

La materia particulada en la atmósfera consta de partículas sólidas y líquidas que pueden ser tanto naturales como artificiales; es una mezcla variable y compleja de partículas de diferente tamaño y con diversos componentes químicos.

Las partículas de mayor tamaño provienen del polvo arrastrado por el viento, pueden ser de origen industrial, así como de partículas provenientes de los volcanes.

Las partículas arrastradas por el aire pueden ser químicamente activas o inertes, y dependiendo de su composición y estado físico, pueden causar grandes daños sobre las superficies metálicas. El efecto de mayor importancia que provoca el material particulado al depositarse sobre las superficies metálicas es la corrosión por aireación diferencial, que básicamente consiste en la diferencia de concentración de oxígeno en la superficie metálica. Otro de los efectos de menor importancia radica en que dichas partículas ensucian y erosionan el revestimiento polimérico, ocasionando altos costos debido a que se debe proteger las superficies metálicas nuevamente. La presencia de partículas higroscópicas depositadas sobre las superficies metálicas puede estimular el proceso de corrosión, aún sin que exista contaminante alguno. (ASTM Handbook, 1992)

2.- METODOLOGÍA

2.1. DETERMINACION DE LA HUBICACION DE LAS ESTACIONES DE ENSAYO

2.1.1.- CONSIDERACIONES PREVIAS

2.1.1.1.-Introducción

El presente trabajo forma parte del proyecto de investigación: “Determinación de la corrosividad atmosférica de las ciudades de Esmeraldas y Santo Domingo” que se viene realizando desde hace varios años en el Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros “CIAP” de la Escuela Politécnica Nacional con el financiamiento de la SENACYT-CONESUP.

Se seleccionó la ciudad de Esmeraldas debido a que corresponde a una zona muy corrosiva por la presencia de la Refinería Estatal Esmeraldas, la central termoeléctrica Termo Esmeraldas y su cercanía al mar. Se caracteriza por ser un territorio húmedo con una pluviosidad anual sobre los 700 mm, tiene una temperatura media anual que oscila alrededor de los 25 °C y una humedad relativa H_R variable entre el 80% y 90%. (INAMHI, 2007).

En el proyecto de titulación “Determinación de la Corrosión Atmosférica de la ciudad de Esmeraldas y Santo Domingo, parte I. 2007”, se instaló una estación de ensayo en la azotea del edificio del Municipio de Esmeraldas, la misma que sirve para caracterizar la agresividad atmosférica en la zona urbana de la ciudad, empero esta ciudad tiene el influjo corrosivo de varias fuentes contaminantes: los cloruros del mar y las emisiones gaseosas industriales de la Refinería y de Termo Esmeraldas.

Por este motivo, se intenta determinar el influjo de cada factor por separado. Se instaló una estación de ensayo dentro de las instalaciones de la Capitanía de Puerto de la Ciudad de Esmeraldas, junto a la estación metereológica del INOCAR para analizar la agresividad de los iones cloruro. Otra dentro de las instalaciones de la Refinería Estatal Esmeraldas y una tercera en las instalaciones del Instituto Tecnológico Luís Tello, ubicado en las inmediaciones de la Refinería, estas dos últimas, para determinar la influencia y agresividad de las emisiones gaseosas de la Refinería, y de Termo Esmeraldas, planta de generación Termoeléctrica ubicada al frente de la Refinería.

Es necesario destacar que la pérdida de materiales metálicos debido a los agentes y ambientes corrosivos aumenta día a día alrededor del mundo, por esto es necesario presentar al sector industrial y a la sociedad, en general, de una herramienta práctica para la selección de un material y de un recubrimiento anticorrosivo de acuerdo con el lugar escogido para desarrollar esta actividad.

Mediante la recopilación de datos de corrosión de metales se podrá empezar el análisis para la formulación de pinturas anticorrosivas específicas para este tipo de atmósferas tan agresivas.

2.1.1.2.- Objetivo general

Determinar la corrosividad atmosférica en varias zonas geográficas de la ciudad de Esmeraldas, mediante la exposición de probetas de ensayo de materiales metálicos sin protección: acero al carbono, aluminio, cobre y zinc.

2.1.1.3.- Objetivos específicos

- Evaluar la agresividad atmosférica de tres estaciones de ensayo en la ciudad de Esmeraldas: una marina y dos industriales.
- Determinar la evolución de la corrosión en función del tiempo de los metales: acero al carbono, aluminio, cobre y zinc.
- Determinar el tiempo de vida útil de los metales en función de los niveles de corrosividad de las zonas estudiadas.

2.1.2.- ESTRATEGIA METODOLOGICA

Para la realización del presente proyecto se planificaron las siguientes actividades:

- Determinación de las zonas geográficas de ensayo de acuerdo con la influencia de las variables objeto de este estudio.
- Diseño y construcción de los muebles porta probetas de acuerdo con la normas ASTM G07 y G50.
- Diseño y construcción de las probetas metálicas de acero al carbono, aluminio, cobre y zinc, de acuerdo con la norma ASTM G92.

- Limpieza y acondicionamiento de las probetas metálicas de acuerdo con la norma ASTM G 01.
- Identificación de las probetas.
- Instalación de los muebles porta-probetas en los lugares previamente seleccionados.
- Instalación de las probetas metálicas en los respectivos muebles para su exposición a las condiciones atmosféricas imperantes.
- Retiro y evaluación periódica de las probetas.
- Recopilación de datos y análisis de resultados.
- Elaboración de los modelos matemáticos.
- Categorización de las atmósferas según las normas existentes.

2.1.2.1.-Determinación de las zonas geográficas de ensayo.

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en la ciudad de Esmeraldas, capital de la provincia de Esmeraldas, ubicada al noroccidente del país. Es una zona de gran desarrollo industrial por la presencia del más grande complejo industrial del país, la Refinería Estatal Esmeraldas, que produce la gran mayoría de los combustibles y derivados de petróleo consumidos en el país, la Central Termoeléctrica Termo Esmeraldas, la misma que aporta energía al sistema Nacional Interconectado, el Puerto Marítimo Internacional, en el que se maneja gran cantidad de productos tanto de importación como de exportación y en el que atracan buques de gran calado que consumen grandes cantidades de combustible fósil con la consecuente emisión de gases de combustión. Todos estos factores en conjunto generan un gran crecimiento demográfico con sus consecuentes implicaciones en materia de emisiones gaseosas a la atmósfera producto del día a día de una sociedad moderna. Por tales motivos, hemos considerado oportuno desarrollar este proyecto en esta zona, la misma que nos facilita condiciones atmosféricas variadas y extremas en un mismo sector.

El proyecto "Determinación de la Corrosividad Atmosférica de las ciudades de Santo Domingo y Esmeraldas, parte I "(Salgado, 2007), instaló una estación de ensayo en la azotea del edificio de la Municipalidad de Esmeraldas, la misma que sirvió para determinar los valores de la corrosión atmosférica de la ciudad en la

zona urbana propiamente dicha. En el presente proyecto se determinan los valores de corrosión de una atmósfera industrial instalando dos estaciones de ensayo, una dentro de la Refinería, en la azotea del edificio de Capacitación, y otra ubicada a aproximadamente a 1 km del complejo industrial, en el Instituto Tecnológico Luís Tello, el mismo que sufre los estragos de la lluvia ácida en sus estructuras, las mismas que se encuentran deterioradas. Se ha realizado de esta manera, porque se ha observado que, por influencia de los vientos imperantes en la zona, la gran cantidad de gases emitidos producto de todos los procesos desarrollados tanto en la Refinería como en la Central Termoeléctrica son arrastrados a las inmediaciones de los dos complejos industriales.

Otro parámetro importante a considerar en este proyecto es la corrosión generada en las estructuras metálicas como producto de la influencia de los iones cloruro provenientes del mar. Por tal motivo, se ha instalado una estación de ensayo a la orilla misma del mar, en las instalaciones de la Estación Meteorológica del INOCAR, ubicada en la Capitanía del Puerto de Esmeraldas. Los resultados obtenidos en estas tres estaciones proporcionarán una idea global de las condiciones corrosivas imperantes en la zona. Cabe anotar que dentro de este proyecto también se evaluaron las probetas metálicas instaladas en la estación de ensayo ubicada en la terraza del edificio del municipio de Esmeraldas, correspondientes a 1 año de exposición y que forman parte del proyecto *"Determinación de la Corrosividad Atmosférica en las ciudades de Santo Domingo y Esmeraldas Parte I"*, "Salgado ,Navarrete ,2007. Los datos experimentales y los cálculos correspondientes se muestran en el Anexo VII.

2.1.2.2.-Diseño y Construcción de los muebles porta probetas

Los muebles han sido contruidos para una capacidad de 70 probetas dispuestas en 7 filas y 10 columnas, de acuerdo con la Norma ASTM G07.

Los muebles constan de dos partes principales: la estructura base y el tablero. La primera fue construida en acero y recubierta de pintura anticorrosiva, sus cuatro patas se han anclado al piso usando tacos fisher, su parte superior brinda al tablero una inclinación de 45° con referencia a la horizontal; está formado por platinas soldadas en forma de T que brindan el espacio suficiente para el anclaje

de los pernos de sujeción con la suficiente separación para evitar contaminación de una probeta a otra por arrastre de los productos de corrosión a través del flujo de agua lluvia.

La norma ASTM-G50 estipula que en el proceso de sujeción de las probetas debe evitarse formar pilas galvánicas, por tal motivo, se emplearon tornillos, tuercas y rodajas de polietileno, para garantizar el aislamiento eléctrico de las probetas de ensayo.

Cabe mencionar que en los trabajos anteriores relacionados al tema, las probetas compartían los tornillos de anclaje, esto producía contaminación de una probeta a otra por el flujo de agua lluvia que se daba a través de los tornillos. En el presente trabajo, se corrigió este particular, haciendo que cada probeta esté anclada al mueble de manera individual, eliminando así los problemas de contaminación.

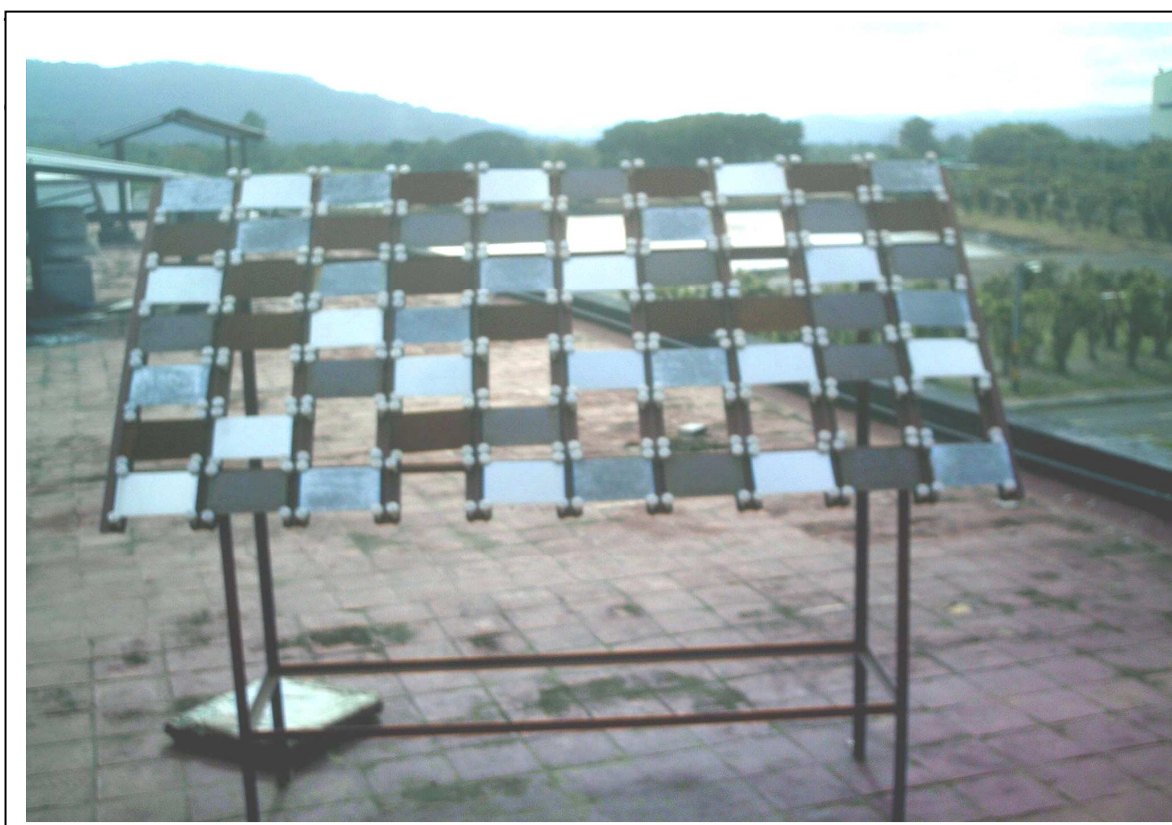


Figura 2.1: Estación de ensayo Refinería.

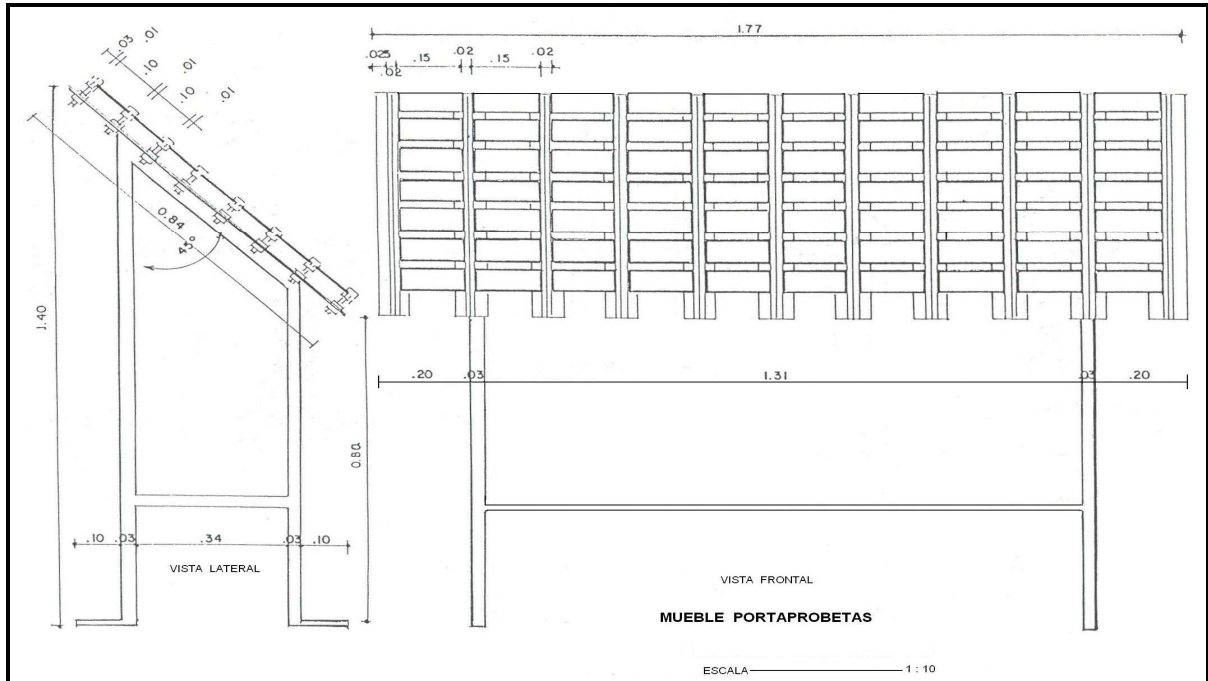


Figura 2.2: Dimensiones del mueble porta probetas

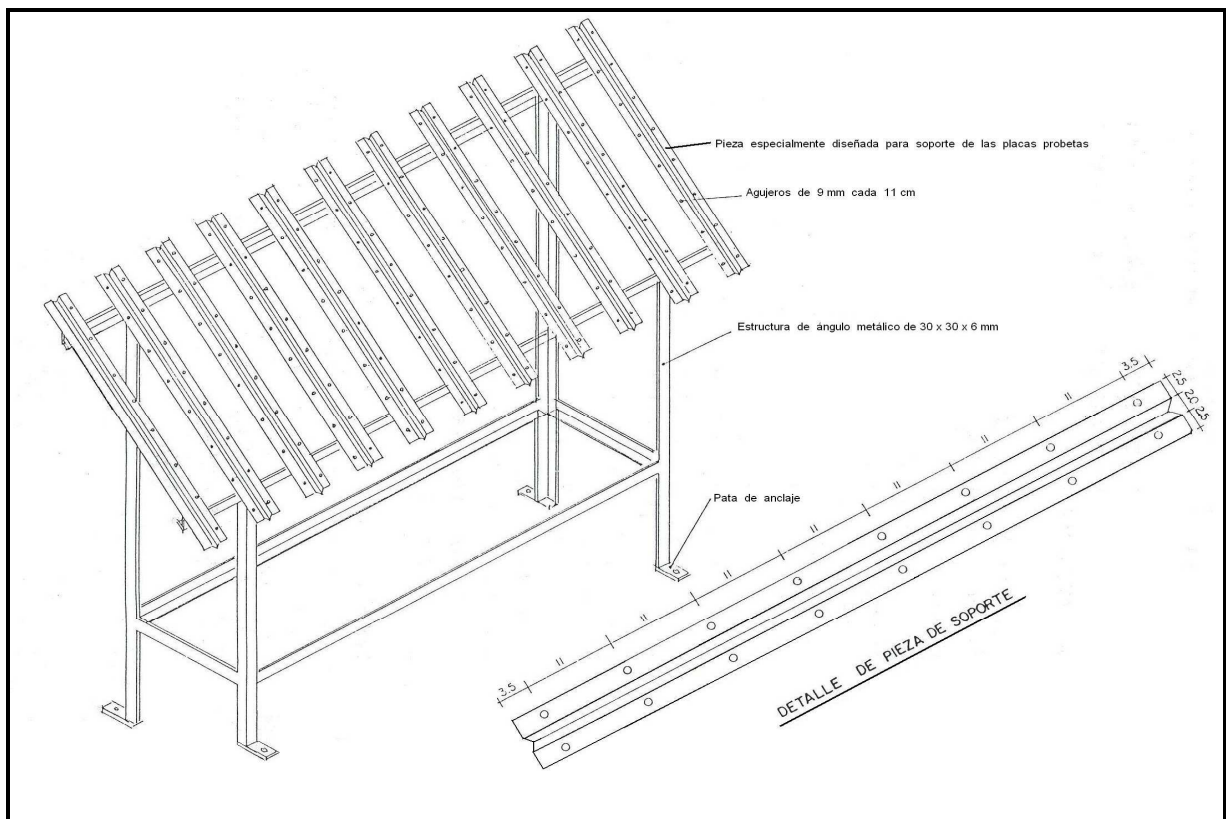


Figura 2.3: Detalle del diseño del mueble porta probetas

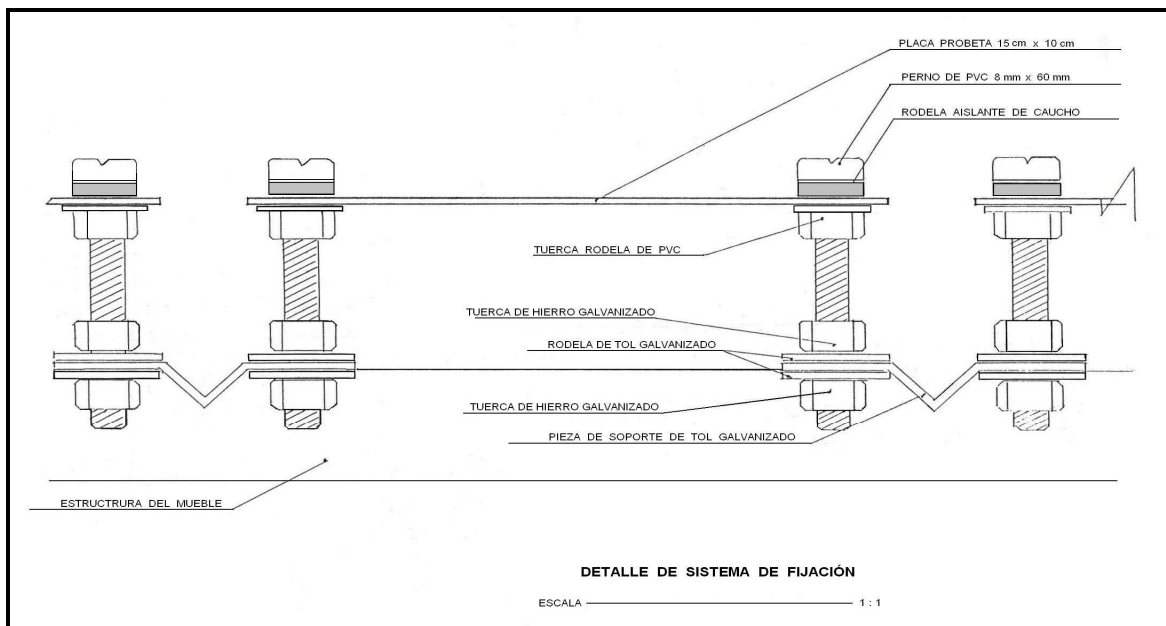


Figura 2.4: Detalle del sistema de fijación

2.1.2.3.-Diseño y Construcción de las probetas metálicas

Las probetas metálicas usadas en el presente trabajo de investigación fueron construidas de acuerdo con la norma ASTM G92, esto es de 0.15 m. de largo por 0.1 m de ancho y un espesor de 0.0007 m para las probetas de acero, 0.0008 m para el aluminio, 0.0007 m para el acero galvanizado y 0.001 m para el cobre.

2.1.2.4.- Limpieza y acondicionamiento de las probetas

Según estipula la norma ASTM G 01, previo a la exposición de las probetas a las condiciones atmosféricas imperantes en la zona de ensayo, se las debe someter a un proceso de limpieza.

El proceso de limpieza empezó con la remoción de la grasa superficial mediante el uso de alcohol etílico. Una vez concluido este proceso, se realizó el lavado químico, que es particular para cada material y se detalla a continuación.

2.1.2.4.1- Limpieza química para el acero al carbono (ASTM G1-90, 2003).

La limpieza del acero se realizó por inmersión de la probeta en un solución preparada a partir de 500 ml. de ácido clorhídrico (gravedad específica 1.19) más 3.5 g de hexametileno tetramina que actúa como inhibidor, para luego aforar a 1000 ml con agua destilada. La inmersión se realiza a 25 °C durante 10 min.

2.1.2.4.2.- Limpieza química para el acero galvanizado (zinc).

El proceso de limpieza de este material no corresponde a ninguno de los descritos por la norma ASTM debido a que en los trabajos anteriores se evidenció un desprendimiento de la capa de zinc de la base de acero. Por esta razón, el lavado se realizó por inmersión en una solución de ácido acético (5% en volumen), durante 5 minutos a temperatura ambiente. (Narváez, 2006).

2.1.2.4.2.1.-Determinación del blanco de zinc

La determinación de blanco de zinc consistió en cuantificar la cantidad de zinc que se perdió únicamente en el lavado químico y así al final poder establecer la cantidad real de galvanizado que se pierde debido a la corrosión atmosférica.

Para determinar la cantidad de recubrimiento metálico que se perdió únicamente empleando la solución de ácido acético se realizó el siguiente ensayo.

- ◆ Se pesaron las probetas en una balanza analítica
- ◆ Se sumergieron las probetas durante cinco minutos en la solución de ácido acético 5% v/v.
- ◆ Se lavó con agua corriente y agua destilada.
- ◆ Se secó rápidamente con aire caliente.
- ◆ Se registró el peso final.

La diferencia entre el peso inicial y final de las placas ensayadas representan la cantidad de recubrimiento metálico desprendido (blanco).

Tabla 2.1: Determinación de la pérdida de recubrimiento de zinc en la limpieza química

PLACA	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Diferencia de masa (g)
1	74,1509	74,1424	0,0085
2	74,1562	74,1454	0,0108
PROMEDIO			0,0097

El valor del blanco 0,0097 g fue tomado en cuenta en la pérdida de peso de las placas galvanizadas expuestas a la atmósfera.

2.1.2.4.3.-Limpieza química para el cobre (ASTM G1-90, 2003).

La limpieza química del cobre se realizó por inmersión de la probeta en una solución preparada a partir de 100 ml de ácido sulfúrico de gravedad específica 1.84, aforada a 1000 ml. con agua destilada durante 3 min. a 25 °C.

2.1.2.4.4.-Limpieza química para el aluminio (ASTM G1-90, 2003).

La limpieza química del aluminio se realizó por inmersión de la probeta en una solución preparada de ácido nítrico de gravedad específica 1.42 durante un tiempo 10 minutos a 90°C.

2.1.2.5.- Enjuague y secado

Después del baño químico las probetas de los distintos materiales se lavaron con abundante agua corriente y se secaron usando toallas de papel absorbente y una estufa a 120 °C, para luego cubrir las probetas con otra toalla seca y empacarlas en fundas plásticas de cierre hermético que evitan el contacto de la humedad o demás contaminantes con la superficie metálica hasta el momento de la instalación en los muebles ubicados en las distintas estaciones de ensayo.



Figura 2.5.- Estufa de secado

2.1.2.6.-Identificación de las probetas.

Para su posterior reconocimiento, las probetas son etiquetadas usando un código que indica la estación de ensayo, la ubicación en el mueble, el material y la masa inicial.

2.1.2.6.1.-Código de identificación

2.1.2.6.1.1.-Estación de ensayo.- De acuerdo con la estación de ensayo en la que la probeta fue instalada, se le asignó un código que consta de las iniciales de la estación de acuerdo con la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Códigos de Estación

<i>Material</i>	<i>Código</i>
Instituto Luis Tello	ILT
Estacion Inocar	P
Refineria	R

2.1.2.6.1.2.-Ubicación en el mueble.- Como se explicó anteriormente, el mueble está diseñado para alojar a las probetas en un arreglo de filas y columnas, como se muestra en la Tabla 2.3:

Tabla 2.3: Ubicación de las probetas en el mueble.

Ubicación de las Probetas en el Mueble

11	12	13	14	15	16	17	18	19	110
21	22	23	24	25	26	27	28	29	210
31	32	33	34	35	36	37	38	39	310
41	42	43	44	45	46	47	48	49	410
51	52	53	54	55	56	57	58	59	510
61	62	63	64	65	66	67	68	69	610
71	72	73	74	75	76	77	78	79	710

2.1.2.6.1.3.- Material.- El código asignado de acuerdo al material se especifica en la Tabla 2.4

Tabla 2.4: Código material

Material	Código
Acero	Ac
Aluminio	Al
Cobre	Cu
Acero Galvanizado	Zn

2.1.2.6.1.4.- Masa inicial.- Un ítem adicional incluido en la etiqueta de cada probeta, es la masa inicial de la misma, esta se obtiene pesando la probeta después del lavado químico y secado, haciendo uso de una balanza analítica.

2.1.2.7.-Instalación de los muebles portaprobetas en los lugares previamente seleccionados.- Los muebles porta probetas fueron construidos en la ciudad de Quito de acuerdo con las especificaciones antes descritas. Fueron transportados

a la ciudad de Esmeraldas e instalados en las zonas geográficas designadas de acuerdo con las necesidades del proyecto, una marina y dos industriales.

En el caso de la zona marina, se instaló el mueble en la Estación Metereológica del INOCAR (Instituto Oceanográfico de la Armada), a las orillas mismas del Océano Pacífico, Latitud: $0^{\circ} 58' 30''$ N; Longitud: $79^{\circ} 58' 59''$ O, la misma que se halla ubicada dentro los predios de la Capitanía del Puerto de Esmeraldas, como se muestra en las Figuras 2.6 y 2.7.

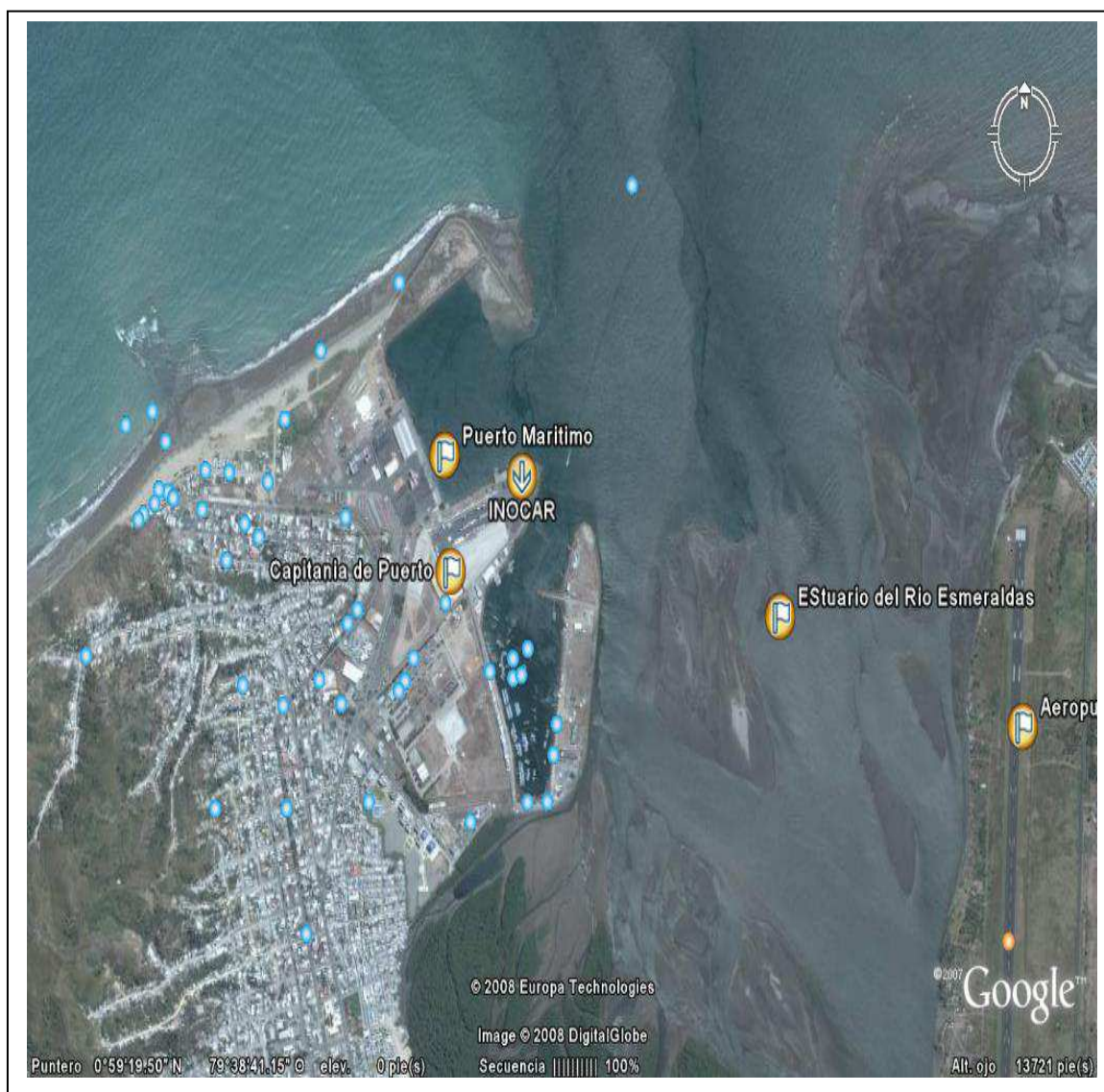


Figura 2.6.- Ubicación de la estación de ensayo INOCAR (Vista Aérea)



Figura 2.7.- Estación de ensayo INOCAR.

En lo que se refiere a la zona industrial, el primer mueble se instaló en la azotea de un edificio de aulas perteneciente al Instituto Tecnológico Luís Tello, ubicado aproximadamente a 1 km. de las instalaciones de la Refinería Estatal Esmeraldas y de Termoesmeraldas, Latitud: 0°55'48" N, Longitud: 79°40'47" O, como se puede observar en las Figuras 2.8 y 2.9. Esto se lo hizo, porque este edificio y los contiguos, muestran severos daños en su estructura metálica ocasionados por la lluvia ácida derivada de las emisiones gaseosas de las instalaciones industriales antes mencionadas.

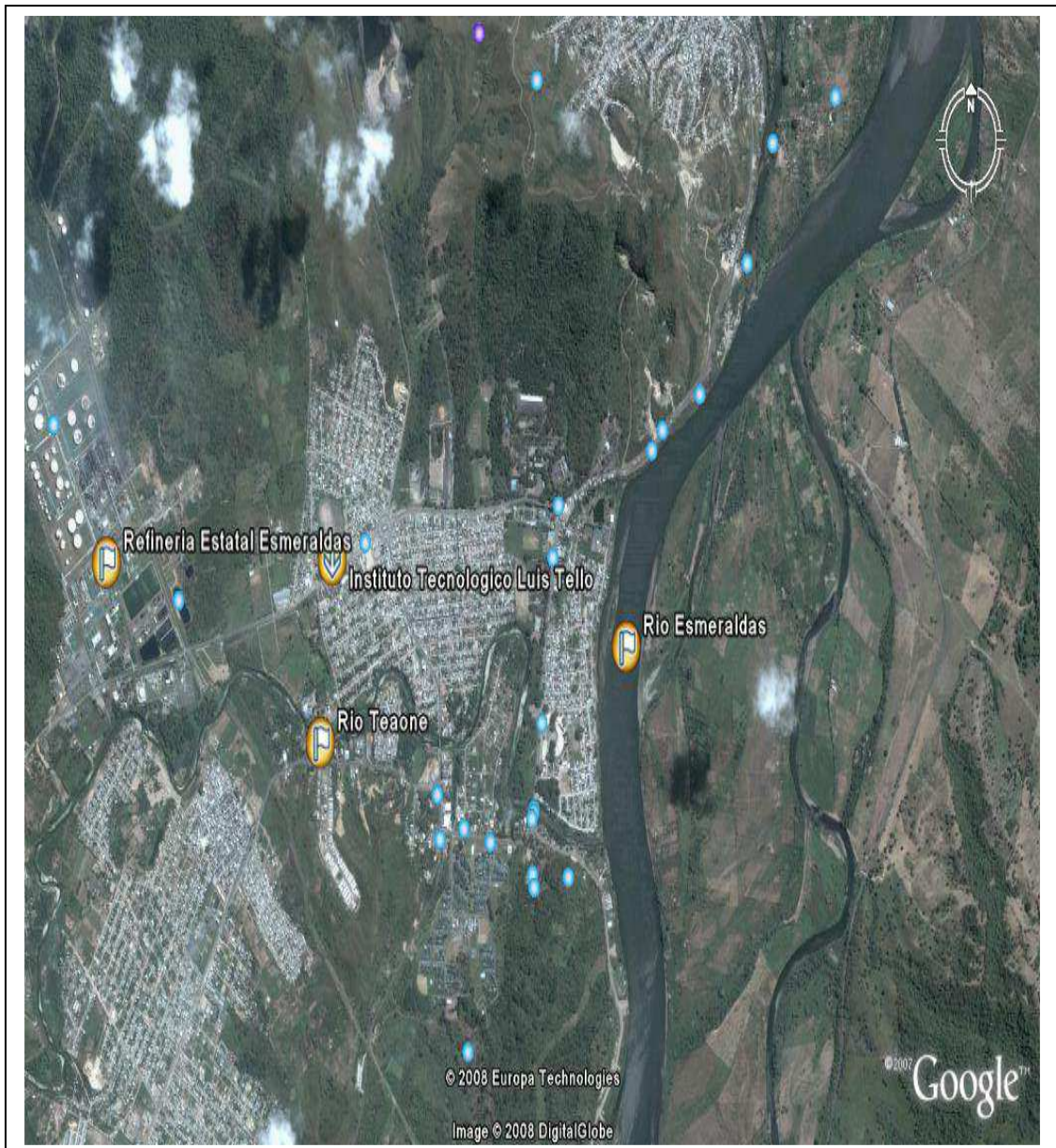


Figura 2.8.- Ubicación de la estación de ensayo I.L.T (Vista Aérea)



Figura 2.9: Estación de ensayo Luís Tello

El segundo mueble está ubicado dentro de las instalaciones de la Refinería, específicamente en la azotea del edificio de Capacitación, Latitud: 0°55'39" N, Longitud: 79°41'23" O, donde está expuesta a la influencia de las emisiones de Termo Esmeraldas y de la Refinería. (Figuras 2.9 y 2.10).



Figura 2.10: Estación de ensayo Refinería



Figura 2.11.- Ubicación de la estación de ensayo Refinería (Vista Aérea)

2.1.2.8.-Instalación de las probetas metálicas en los respectivos muebles.- Una vez instalados los muebles porta probetas en los respectivos lugares, se instalaron las probetas metálicas en los tornillos plásticos, cuidando de no tocar las superficies de exposición para no interferir con el proceso corrosivo. Las probetas metálicas se ubican en el mueble distribuyendo cada material en todos los sectores de la superficie de sujeción. Se debe tener presente que cada placa esté paralela a la superficie del mueble y bien sujeta a los tornillos plásticos, sin tener contacto con ninguna superficie metálica ajena a la probeta.

2.1.2.9.-Retiro periódico de las probetas.- Las probetas fueron retiradas de las respectivas estaciones de ensayo siguiendo el cronograma mostrado en la Tabla 2.5

Las probetas fueron retiradas de cada estación de ensayo con el siguiente procedimiento:

- Aflojar cuidadosamente los 4 tornillos que sujetan la probeta, teniendo sumo cuidado de no contaminar la misma o las probetas vecinas.
- Retirar la probeta del mueble.
- Guardarla en una funda sellada para evitar contaminación; asegurarse de que la probeta y la funda estén correctamente identificadas.
- Transportar las probetas al laboratorio para su análisis.
- Una vez en el laboratorio, las probetas son sometidas a un proceso de limpieza mecánica y posteriormente una limpieza química

Tabla 2.5: Cronograma de Retiros

# Retiro	Tiempo	Estación	Fecha	Acero	Aluminio	Cobre	Zinc
Primer Retiro	3 Meses	Luís Tello	17/05/2007	1 1	4 2	2 10	7 10
				7 5	4 10	1 2	2 2
		INOCAR	17/05/2007	6 10	2 5	1 1	6 5
				1 7	5 10	7 10	2 10
		Refinería	17/08/2007	6 1	7 8	3 7	1 1
				1 9	1 2	6 5	7 10
Segundo Retiro	6 Meses	Luís Tello	17/08/2007	7 1	1 4	3 8	6 3
				6 8	7 8	3 1	3 9
		INOCAR	17/08/2007	1 2	1 3	7 6	2 4
				4 10	4 7	4 8	6 9
		Refinería	17/11/2007	2 1	3 1	4 1	5 7
				3 2	5 8	7 7	5 1
Tercer Retiro	9 Meses	Luís Tello	17/11/2007	4 6	2 1	5 9	5 2
				5 10	2 7	3 4	3 5
		INOCAR	17/11/2007	7 8	5 6	3 6	4 9
				2 1	1 9	1 10	4 4
		Refinería	17/02/2008	4 2	7 5	2 4	2 2
				4 8	4 3	5 9	4 4
Cuarto Retiro	1 Año	Luís Tello	17/02/2008	1 3	5 4	5 3	7 4
				4 1	3 3	6 2	1 7
		INOCAR	17/02/2008	3 9	7 9	5 3	5 7
				5 8	5 2		7 4
		Refinería	17/05/2008	3 4	1 5	2 5	1 3
				6 4	5 6	3 10	7 6
Quinto Retiro	2 Años	Luís Tello	17/02/2009	7 3	4 5	1 6	6 9
				1 5	7 2	5 7	2 4
		INOCAR	17/02/2009	4 3	6 7	5 9	7 7
				4 5	3 10		3 7
		Refinería	17/02/2009	4 7	7 1	7 9	3 3
				1 4	6 2	2 9	3 5
Sexto Retiro	3 Años	Luís Tello	17/02/2010	3 10	2 9	5 1	5 8
				1 10	6 1	7 7	6 5
		INOCAR	17/02/2010	6 2	7 1	5 1	2 6
				1 8	3 1	3 2	4 2
		Refinería	17/02/2010	1 7	1 8	7 2	7 3
				2 3	3 9	1 6	1 10
Séptimo Retiro	4 Años	Luís Tello	17/02/2011	4 3	2 6	1 9	4 4
				1 8	3 8	2 3	4 7
		INOCAR	17/02/2011	1 4	2 8	3 4	2 2
				4 1	6 4	7 3	4 6
		Refinería	17/02/2011	2 10	6 3	5 3	4 10
				4 5	5 4	4 9	2 7

2.1.2.10.- Evaluación de las probetas.- El proceso de evaluación de la corrosión atmosférica de las probetas metálicas está fundamentada en la gravimetría, es decir, se basa en la pérdida de peso.

Primeramente se sometió la probeta a un proceso de limpieza mecánica, haciendo uso de un cepillo de cerdas plásticas para remover todos los productos de corrosión superficiales. Estos productos son recogidos y guardados para analizar los cambios cristalográficos de los mismos en función del tiempo.

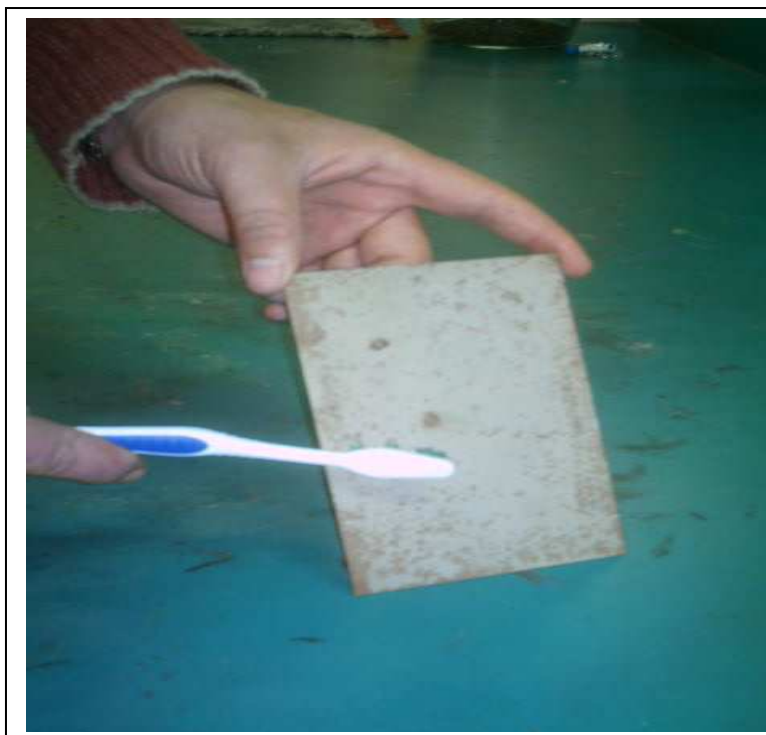


Figura 2.12: Limpieza mecánica

Una vez retirados todos los productos de corrosión y el polvo, se usó el mismo procedimiento de limpieza inicial de las probetas, específico para cada material, según la norma ASTM G1, ítem 2.1.2.4.4.



Figura 2.13: Baño químico de limpieza

Una vez secas las probetas, se pesaron en una balanza analítica para obtener la masa final después del proceso corrosivo.

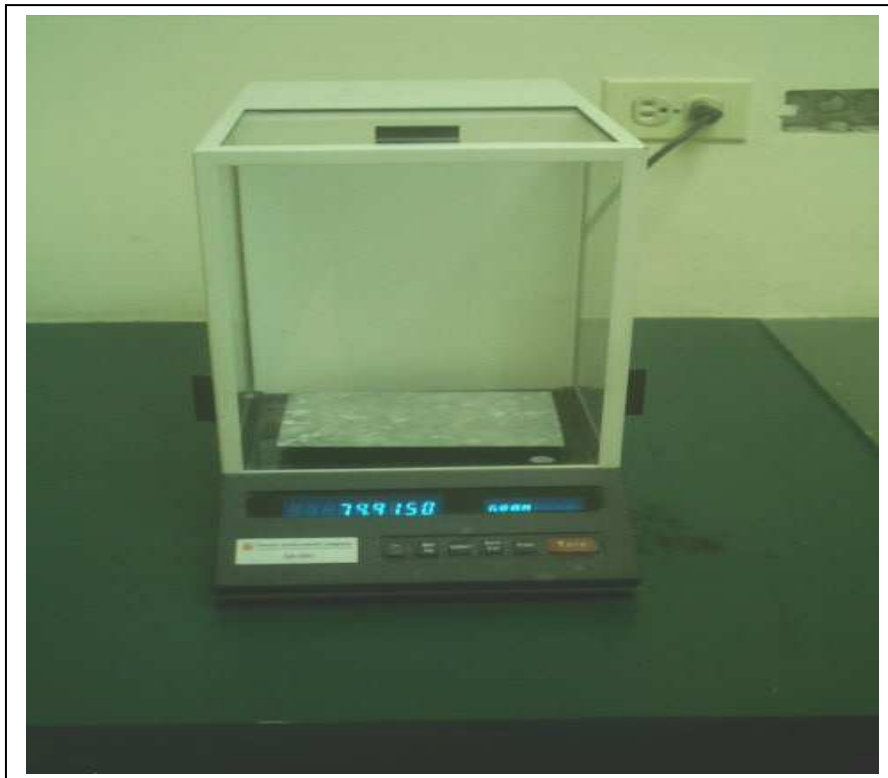


Figura 2.14: Balanza analítica

Este valor se empleó para el cálculo de la velocidad de corrosión promedio, así:

$$V_c = \frac{K * W}{A * t * D} \quad [2.1]$$

En donde :

V_c = Velocidad de corrosión ($\text{gr}/\text{cm}^2 * \text{año}$)

K = Constante del material = $(1 * 10^4) * D$

t = tiempo de exposición (años)

A = área (cm^2)

W = pérdida de masa (g)

D = densidad (g/cm^3)

La velocidad de corrosión también se puede expresar en $\mu\text{m}/\text{año}$. A partir de los datos experimentales de los diferentes retiros, se construyó un gráfico en escala log-log de corrosión vs. tiempo de exposición, para obtener una curva de ajuste con la mejor regresión lineal que represente el fenómeno de corrosión. Esta curva nos permite conocer la corrosión en cualquier periodo de tiempo dado.

2.2.- EVALUACION DE LA CORROSION EN FUNCION DEL TIEMPO

2.2.1.-INTRODUCCION

Diversos estudios han planteado varios métodos para evaluar la corrosión atmosférica de una determinada zona o región, los mismos que están fundamentados en las observaciones y resultados obtenidos de la exposición de probetas metálicas a diferentes tipos de ambientes durante periodos de tiempo determinados.

2.2.2.- EVALUACION D ELA CORROSION EN FUNCION DE LAS VARIABLES METEREOLOGICAS

Se persigue la obtención de una relación matemática a través de regresión múltiple a partir de los datos de las condiciones meteorológicas y de concentración de contaminantes, durante un periodo de tiempo determinado de exposición de la superficie metálica a la atmósfera.

Las condiciones meteorológicas que se toman en cuenta en el desarrollo del modelo son: humedad relativa, precipitación, temperatura, concentración de SO₂ y Cl⁻.

El algoritmo del modelo es el siguiente:

$$C = a1 + a2 (HR) + a3 (P) + a4 (T) + a5 (TDH) + a6 (S) + a7 (Cl) \quad [2.2]$$

Donde:

a1 – a7: constantes.

C: corrosión anual (µm).

HR: humedad relativa media anual

T: temperatura media anual (°C)

P: precipitación anual

TDH: fracción anual del número de horas / año en que HR ≥ 80% y T > 0 °C

S: contaminación por SO₂ (mg de SO₂ / m² día)

Cl: contaminación por cloruros (mg de Cl⁻ / m² día)

A partir de los datos de campo obtenidos a diferentes periodos de exposición, y haciendo uso de la regresión lineal se encuentran los valores de las constantes $a1, \dots, a7$.

Con los valores de las constantes y los valores de las condiciones atmosféricas del sitio de ensayo se puede calcular la corrosión. (Morcillo et al, 1998)

2.2.3.-EVALUACION D ELA CORROSION EN FUNCION DEL TDH Y DE LA CONCENTRACION DE CONTAMINANTES

El comité técnico ISO/TC 156 WG4, organismo encargado de la elaboración de estándares de evaluación y estudio de la corrosión de las normas ISO propuso un modelo que involucra al tiempo de humectación, dióxido de azufre y cloruros, de la siguiente manera:

$$C = a1 + a2 (TDH) + a3 (SO_2) + a4 (Cl) \quad [2.3]$$

Donde:

C: corrosión anual (μm).

TDH: fracción anual del número de horas / año en que $HR \geq 80\%$ y $T > 0^\circ\text{C}$

SO₂: contaminación por SO₂ (mg de SO₂ / m² día)

Cl: contaminación por cloruros (mg de Cl⁻ / m² día). (Morcillo et al, 1998)

2.2.4.-EVALUACION DE LA CORROSION EN FUNCION DEL TIEMPO

Se persigue determinar la corrosión atmosférica en función del tiempo de exposición de la superficie metálica a las condiciones imperantes en la zona de ensayo. Este modelo esta caracterizado por una ecuación exponencial de la siguiente manera:

$$C = a \times t^n \quad [2.4]$$

Donde:

C: corrosión en μm al cabo de t años.

a y n: constantes.

t: tiempo en años.

Los valores de las constantes **a** y **n** se determinan por regresión lineal de datos de campo recolectados en un periodo de tiempo determinado.

Para valores de $n = 0.5$ el sistema alcanza el estado estacionario, es decir, la corrosión es controlada por la difusión de los reactantes en contacto con la superficie del metal sin resistencia variable de la capa de los productos de

corrosión. Cuando el valor del exponente n está por debajo de 0.5 la difusión disminuye con el tiempo por la disminución de la porosidad que causa la capa de productos de corrosión. Si el valor de n excede a 0.5, entonces la capa de productos de corrosión o no existe o lo hace parcialmente ya sea por efectos de lavado, disolución, agrietamiento o erosión. (Morcillo et al, 1998).

2.2.5.- EVALUACION DE LA CORROSION USANDO LAS NORMAS ISO

La norma ISO presenta clasificaciones de las atmósferas de acuerdo con la concentración de los contaminantes SO_2 y Cl^- , como se observa en la Tabla 1.4. También presenta una clasificación de las atmósferas de acuerdo al tiempo de humectación como se aprecia en la Tabla 1.3. La Tabla 1.5 muestra una clasificación de atmósferas de acuerdo a su corrosividad en $\mu\text{m} / \text{año}$ o en $\text{g} / \text{m}^2 \text{ año}$, para el acero al carbono, cobre, aluminio, zinc.

Todas estas clasificaciones permiten estimar la corrosión de una zona realizando estudios en un año de exposición. Adicionalmente, las Tablas 1.6 y 1.7 permiten la clasificación de la corrosión a 10 años o más.

2.3.- DETERMINACION DEL TIEMPO DE VIDA UTIL DE LOS MATERIALES METALICOS

El tiempo de vida útil de los materiales metálicos se puede calcular haciendo uso de la velocidad de corrosión obtenida después de 1 año de exposición a las condiciones ambientales y del espesor inicial del sustrato metálico. En el presente trabajo se va a calcular el tiempo de vida del recubrimiento de zinc del acero galvanizado, debido a que el valor del espesor del recubrimiento de zinc es un valor conocido, haciendo uso del promedio del espesor del recubrimiento y de la velocidad de corrosión expresada en $\mu\text{m}/\text{año}$. También se lo puede hacer haciendo uso de gráficos contruidos a partir de datos experimentales, como el que se muestra en la Figura 2.15, donde a partir del espesor mínimo especificado el peso mínimo especificado se puede del recubrimiento se puede obtener el

tiempo de vida para el primer mantenimiento, de acuerdo a las condiciones atmosféricas de servicio.

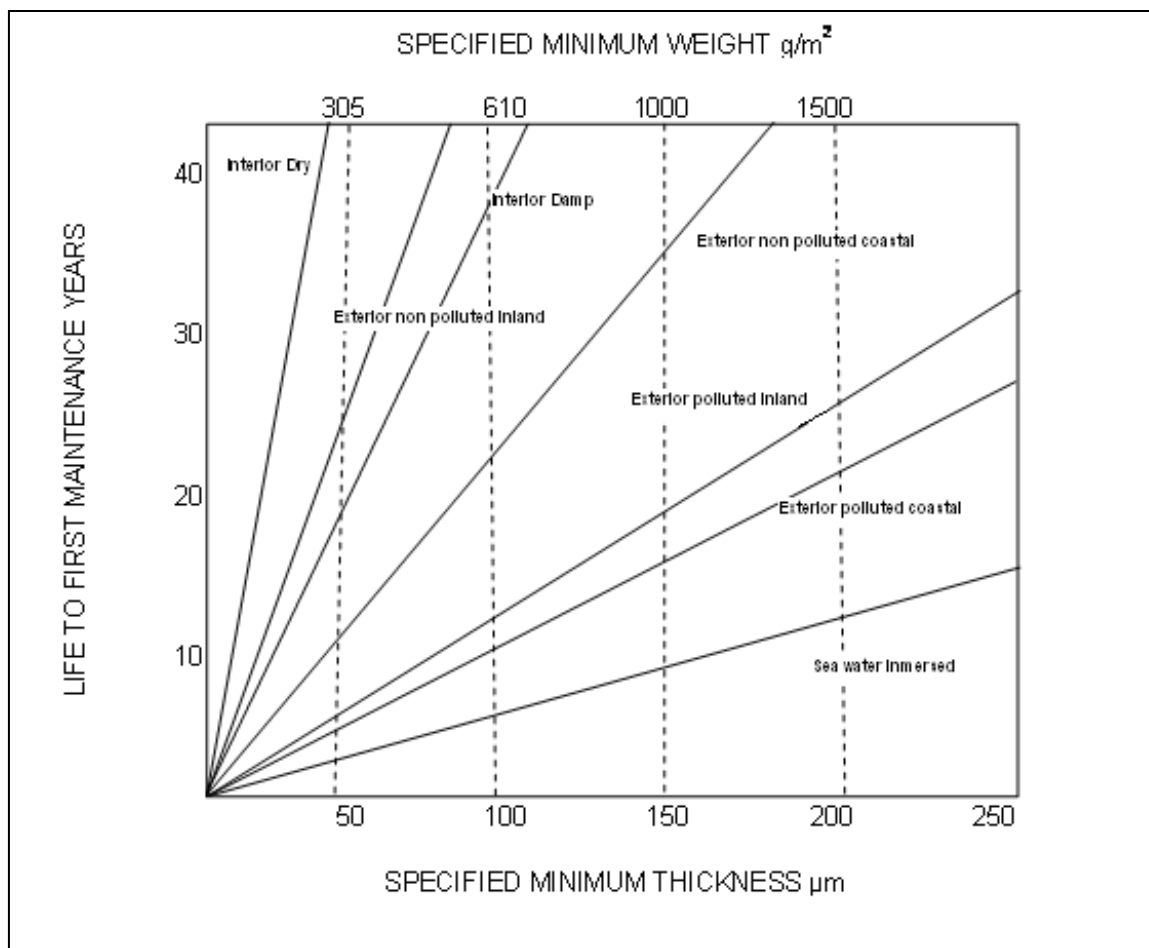


Figura 2.15.- Tiempo de vida típico del recubrimiento de acero galvanizado (Elsevier, Volumen 1)

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.- CONTAMINANTES

Las atmósferas donde fueron realizados los presentes ensayos poseen altas concentraciones de diversos contaminantes, especialmente el SO^{-2} y Cl^{-} . Estos tienen una importante influencia en los procesos corrosivos de los materiales.

El presente proyecto no contempla la determinación y estudio de las concentraciones de los distintos contaminantes, este estudio se realizará en lo posterior y conjuntamente con los resultados obtenidos en esta investigación se podrá tener una idea más precisa de los procesos corrosivos en la ciudad de Esmeraldas.

3.2.-CORROSION DEL ACERO AL CARBONO

3.2.1.-ASPECTO GENERAL

La corrosión del acero se caracteriza por la presencia de puntos de corrosión dispersos sobre toda la superficie metálica que se extienden gradualmente, formando una capa de herrumbre en la superficie de las probetas, como se puede observar en la Figura 3.1:



Figura 3.1: Probeta de acero, cara anterior (0.75 año de exposición, Estación ILT)

Se puede observar en los costados de la probeta una mayor cantidad de productos de corrosión. Esto se debe al patrón de flujo de agua lluvia originado en las cabezas de los tornillos de sujeción. Los productos de corrosión presentan una coloración café-anaranjada, coloración propia de la goethita, lepidocrecita y akaganeita. (CYTED, 1998).



Figura 3.2: Probeta de acero, cara posterior (0.75 año de exposición, Estación ILT).

La cara posterior de la probeta permanece más tiempo húmeda y por lo tanto se corroe más, esto se puede observar en la Figura 3.2. Por otra parte en la cara anterior, la lluvia realiza una función de lavado de los contaminantes y de los productos de corrosión. Microscópicamente se observan similares estructuras y formaciones de productos de corrosión, como se puede ver en las Figuras 3.3 y 3.4.

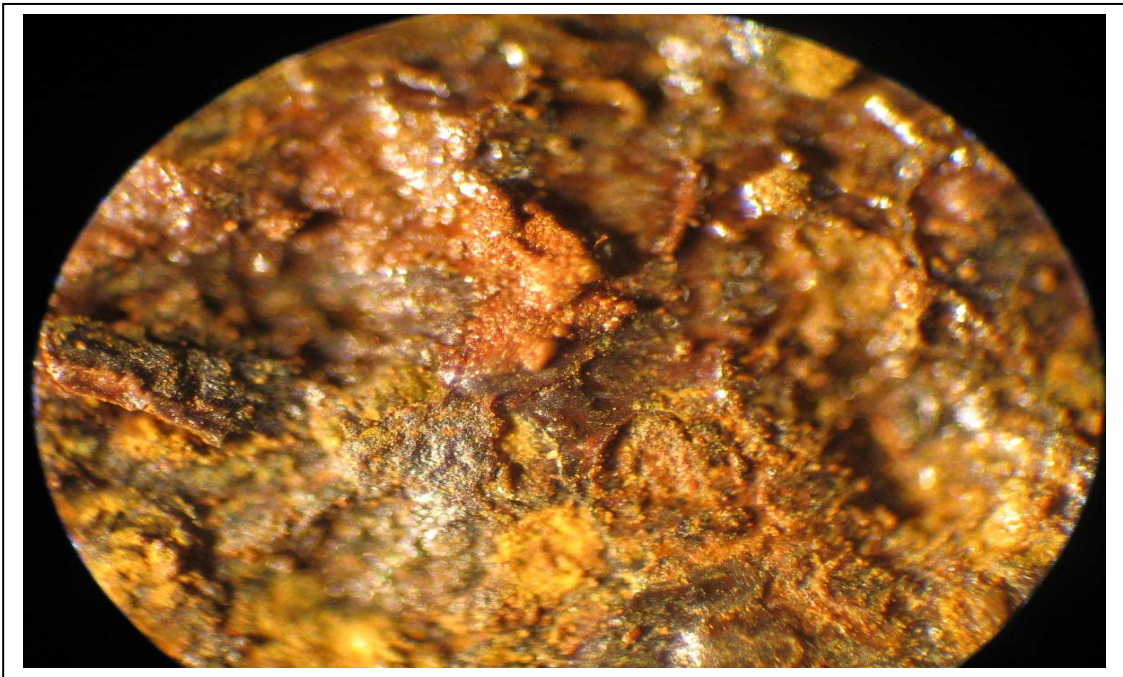


Figura 3.3: Micrografía 40x, superficie corroída del acero, cara anterior (0.75 año de exposición, Estación ILT).



Figura 3.4: Micrografía 40 x, superficie corroída del acero, cara posterior (1 año de exposición, Estación ILT).

3.2.2.-CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION

La velocidad de corrosión, V_c ($\mu\text{m}/\text{año}$) y la penetración (μm), se pueden calcular a partir de los datos experimentales, como son área, tiempo de exposición, masa inicial y masa final. (Ecuación 2.1).

En la Tabla 3.1 se muestran los datos de la penetración y velocidad de corrosión respecto al tiempo. (Anexo III.1).

Tabla 3.1.- Corrosión del acero vs. tiempo.

Estación	Código	Tiempo (años)	Corrosión ($\mu\text{m}/\text{año}$)	C media ($\mu\text{m}/\text{año}$)
I.L.T	ILT Ac 11	0.308	27.45	27.41
	ILT Ac 75		27.38	
	ILT Ac 71	0.558	33.27	33.18
	ILT Ac 68		33.08	
	ILT Ac 46	0.834	35.93	35.83
	ILT Ac 510		35.73	
	ILT Ac 13	1.32	58.67	56.48
	ILT Ac 41		54.29	
INOCAR	P Ac 6 10	0.236	14.73	14.27
	P Ac 17		13.80	
	P Ac 12	0.48	22.97	23.72
	P Ac 410		24.48	
	P Ac 7 8	0.767	27.56	25.94
	P Ac 21		24.32	
	P Ac 39	1	43.73	44.10
	P Ac 58		44.46	
Refinería	R Ac 61	0.25	7.76	7.69
	R Ac 19		7.63	
	R Ac 21	0.53	10.20	10.53
	R Ac 32		10.86	
	R Ac 48	0.76	21.91	21.46
	R Ac 42		21.00	
	R Ac 64	1.26	36.62	29.80
	R Ac 34		22.98	

A partir de estos datos se construyeron gráficos corrosión vs. tiempo para cada estación, (Anexo III.3), los mismos que permiten obtener los valores de corrosión a 0.25, 0.5, 0.75 y 1 año de exposición.

3.2.3.- CINETICA DE LA CORROSION DEL ACERO AL CARBONO

La ecuación que caracteriza el proceso corrosivo es:

$$C = a*t^n \quad [3.1]$$

En donde el valor de “a” indica la reactividad de un material ante el ambiente que lo rodea, y el valor de “n” representa el nivel de difusión de los óxidos formados sobre la superficie metálica. (Morcillo, et al, 1993).

A partir de los datos experimentales recogidos a diferentes intervalos de tiempo y haciendo uso de la regresión lineal, se ha podido definir las siguientes ecuaciones para la corrosión del acero al carbono, en las diferentes estaciones de ensayo, como se muestra en la Tabla 3.2. (Anexo III.4).

Tabla 3.2.- Ecuaciones de corrosión del acero al carbono

Estación	Ecuación
Luís Tello	$C = 44,71 * t^{0,47}$
INOCAR	$C = 38.23 * t^{0,69}$
Refinería	$C = 23,73 * t^{0,88}$

A partir estas ecuaciones se puede determinar la penetración de la corrosión media, expresada en μm y la velocidad media de corrosión expresada en $(\mu\text{m}/\text{año})$ y $(\text{g}/\text{año m}^2)$ para las probetas de acero al carbono, las mismas que se puede observar en la Tabla 3.3:

Tabla 3.3.- Valores de corrosión y velocidad de corrosión para el acero al carbono.

Estación	No. Retiro	Tiempo	Corrosión	Vc	Vc
		(años)	(μm)	($\mu\text{m/año}$)	($\text{g/m}^{2*}\text{ año}$)
I.L.T	1	0.25	23.45	93.80	737.27
	2	0.50	32.38	64.76	509.01
	3	0.75	39.10	52.13	409.77
	4	1.00	44.71	44.71	351.42
INOCAR	1	0.25	14.55	58.20	457.45
	2	0.50	25.58	51.16	402.12
	3	0.75	31.28	41.71	327.81
	4	1.00	38.23	38.23	300.49
Refinería	1	0.25	7.10	28.40	223.22
	2	0.50	12.75	25.50	200.43
	3	0.75	17.95	23.93	188.12
	4	1.00	22.88	22.88	179.84
Municipio	1	1.00	37.78	37.78	297.00

A partir de estos datos se construyeron gráficos en función del tiempo, los mismos que permiten hacer un mejor análisis comparativo entre las tres estaciones de ensayo; estos gráficos se pueden observar en las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7:

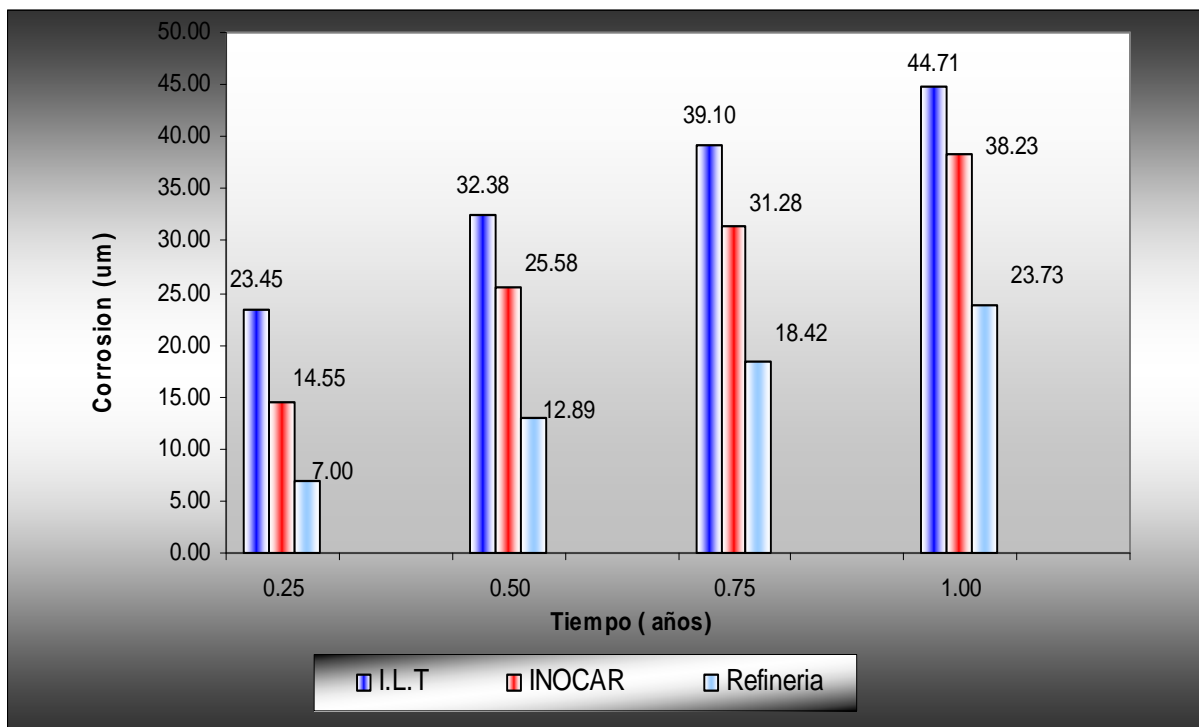


Figura 3.5.- Corrosión del acero al carbono (um) vs. tiempo

En la Figura 3.5, se puede observar que los mayores valores de penetración de la corrosión a diferentes tiempos de exposición, se presentaron en la estación ILT.

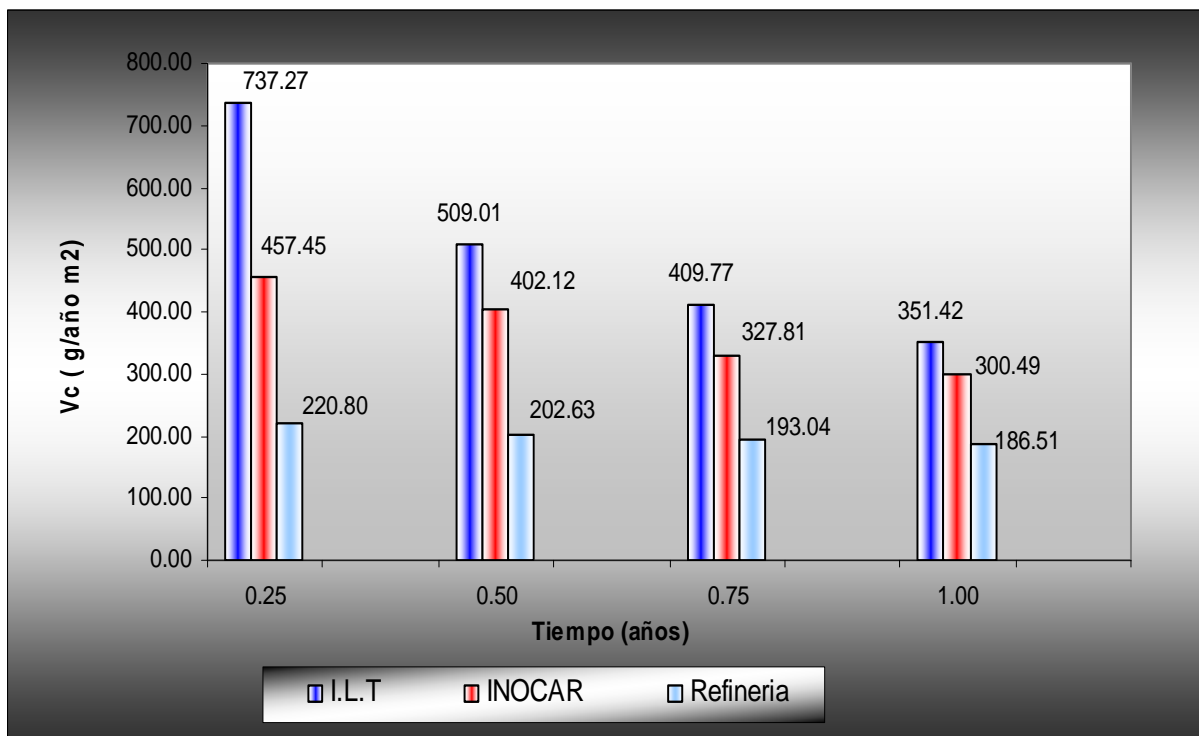


Figura 3.6.- Velocidad de corrosión del acero al carbono (g/año m²) vs. tiempo

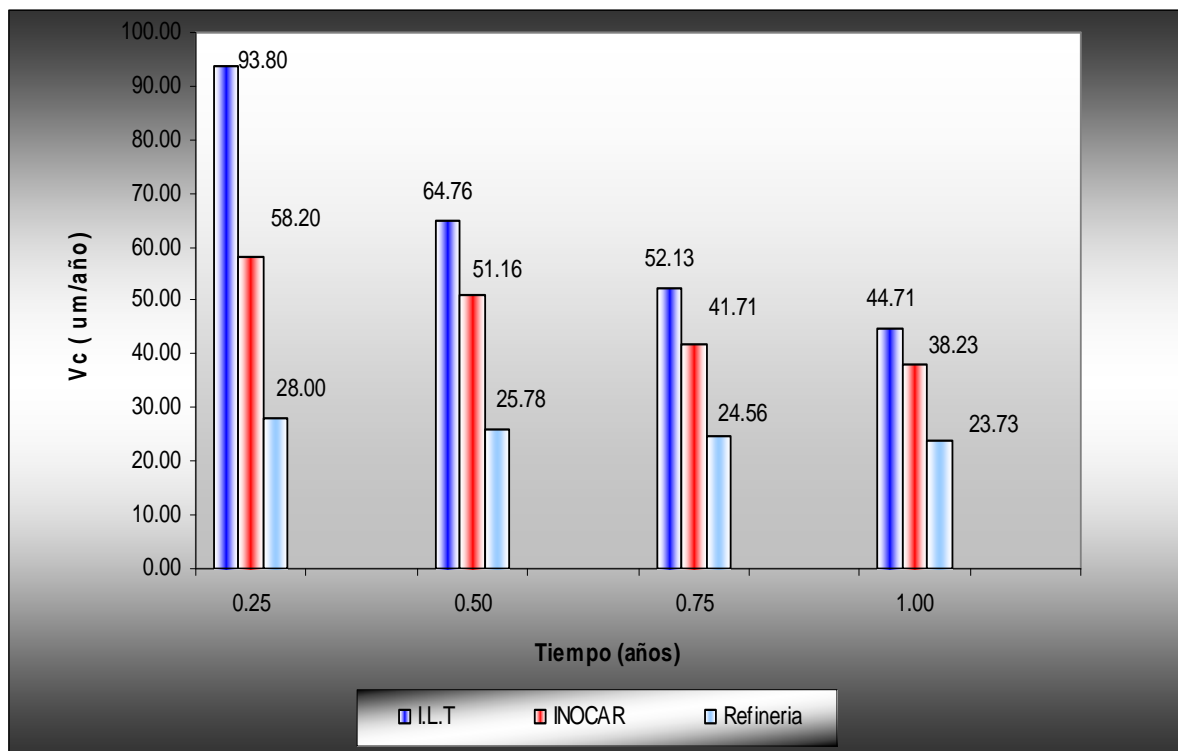


Figura 3.7: Velocidad de corrosión del acero al carbono ($\mu\text{m/año}$) vs. tiempo

De igual manera, para el caso de la velocidad de corrosión, ya sea esta expresada en ($\mu\text{m/año}$) o ($\text{g/año} \cdot \text{m}^2$), se observa (Figuras 3.6 y 3.7) que en la estación ILT se presentaron los mayores valores en los distintos tiempos de exposición. Para la estación INOCAR y Refinería se observa que los valores de V_c tienden a hacerse constantes en función del tiempo de exposición.

3.2.4.-ANÁLISIS DE LA CINÉTICA DE CORROSIÓN DEL ACERO AL CARBONO

Haciendo uso de los datos de corrosión (μm) mostrados en la Tabla 3.1, se construyó un gráfico de la corrosión en función del tiempo para cada estación de ensayo (Figura 3.8, 3.9, 3.10). La Figura 3.8 muestra los valores de corrosión vs. tiempo de exposición para la estación ILT; se ha agregado la línea de tendencia para una función potencial del tipo $y = a \cdot x^n$, la misma que corresponde a la ecuación que caracteriza los procesos corrosivos $C = a \cdot t^n$. Se puede observar

que en el primer año de exposición, todavía nos encontramos en la sección lineal de la curva.

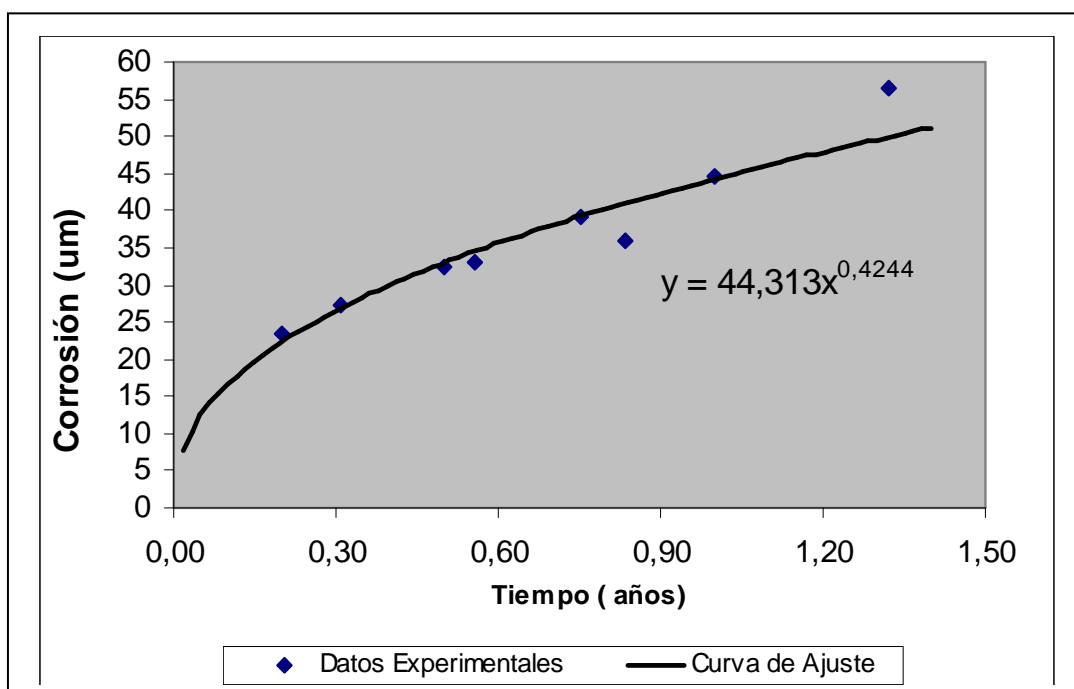


Figura 3.8: Corrosión del acero al carbono (μm) vs. tiempo (Estación ILT)

Este detalle está presente también en la estación INOCAR y Refinería, y hace que todavía no sea posible realizar una discusión sobre los valores de las constantes a y n y su significado.

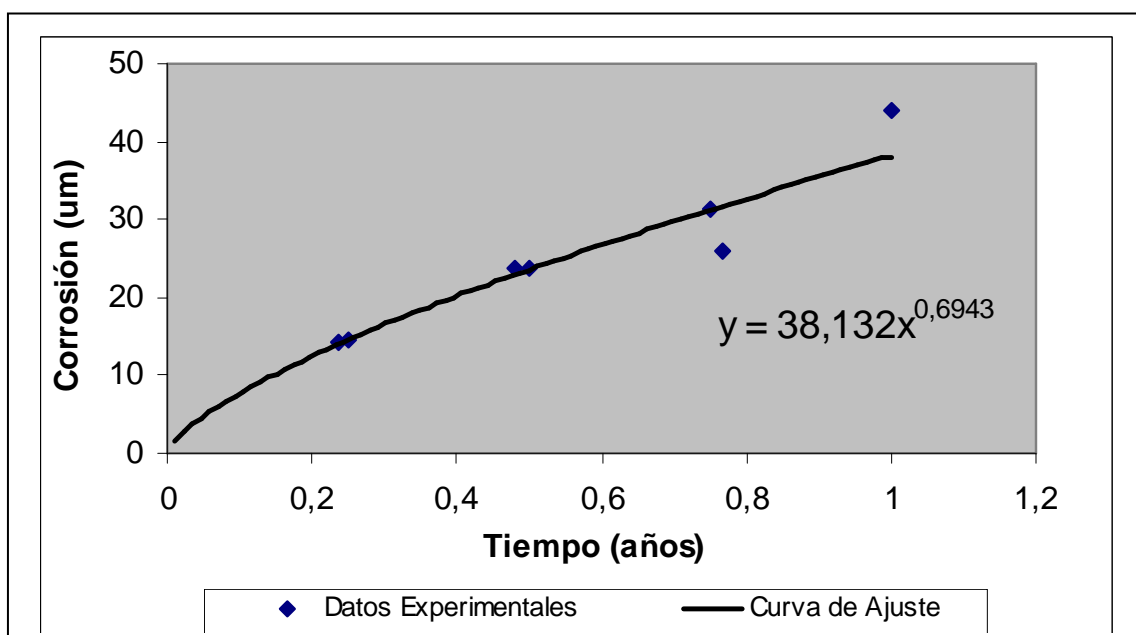


Figura 3.9: Corrosión del Acero al Carbono (μm) vs. Tiempo (Estación INOCAR)

En la tres estaciones se observó que los valores de corrosión en función del tiempo de exposición presentan un valor de coeficiente de determinación múltiple (R^2) alto, esto es ILT: 0.927; INOCAR: 0.935 y Refinería: 0.935; además, una disposición regular en torno a la línea de tendencia que caracteriza el proceso corrosivo, esto da la certeza de un buen ajuste de los datos obtenidos experimentalmente con las ecuaciones matemáticas obtenidas a partir de regresiones lineales. (Anexo III.2).

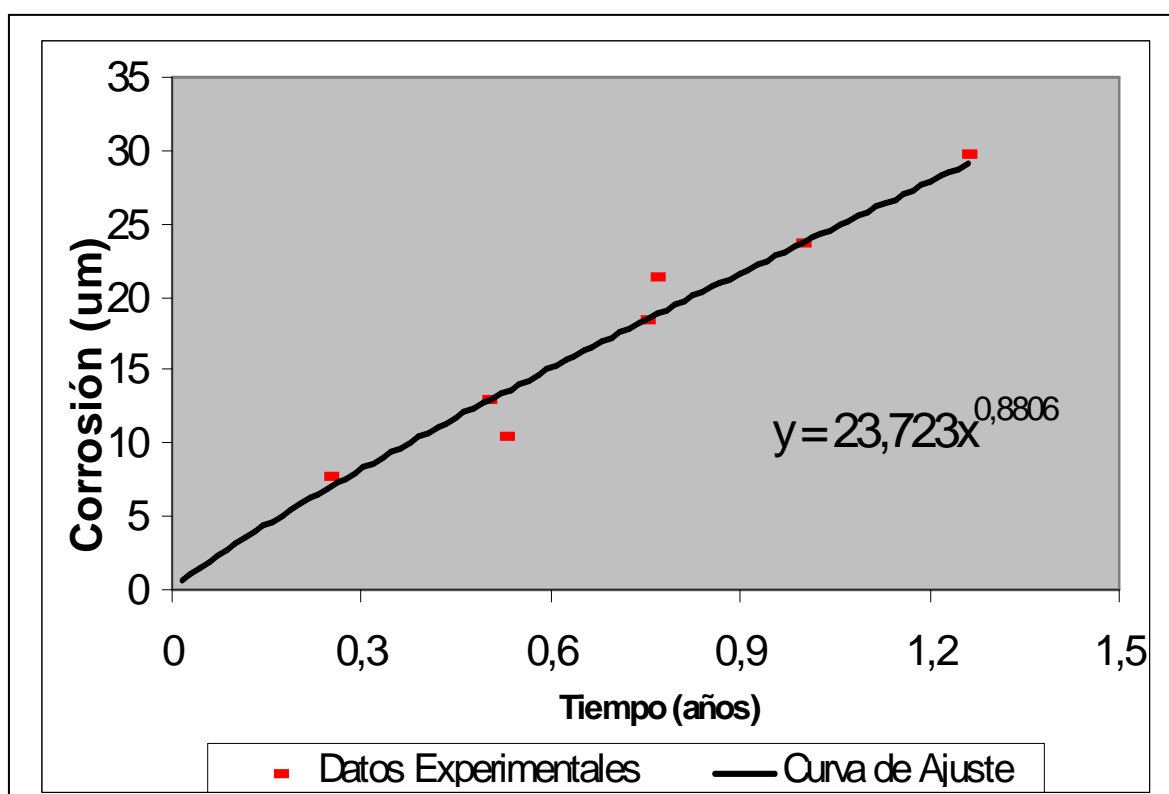


Figura 3.10: Corrosión del acero al carbono (μm) vs. tiempo (Estación Refinería)

De estudios anteriores (Leygraf, Graedel, 2001) se puede inferir que los rangos de V_c para los diferentes tipos de atmósfera son los mostrados en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4.- Valores de V_c para el acero al carbono (Leygraf, Graedel, 2001)

Atmósfera	V_c ($\mu\text{m}/\text{año}$)
Rural	4-65
Urbana	23-71
Industrial	26-175
Marina	26-140

Los valores obtenidos en este estudio, de acuerdo a la Tabla 3.3, se encuentran en el rango de las atmósferas industriales y marina, valores que se ajustan a las condiciones reales de ensayo para las estaciones ILT e INOCAR y que para el caso de la estación Refinería y Municipio los valores obtenidos se ajustan más a una condición de atmósfera urbana. De igual manera, en el proyecto MYCAT, proyecto desarrollado a lo largo de varias estaciones en Latinoamérica, se establece que el valor de V_c para la estación ubicada en la ciudad de Salinas es de 55 ($\mu\text{m}/\text{año}$) el primer año de exposición y de 44($\mu\text{m}/\text{año}$) para el cuarto año de exposición; en la estación INOCAR ubicada a orillas del mar se obtuvo un valor de V_c de 44.09 ($\mu\text{m}/\text{año}$) para el primer año, valor que aún siendo diferente si es comparable y está dentro de los rangos establecidos para este tipo de atmósferas.(CYTED,1998).

Para el caso de las atmósferas mixtas, marina -industriales, que es el caso de la ciudad de Esmeraldas, el proyecto MYCAT obtuvo resultados de V_c en función de las concentraciones de SO_2^- y Cl^- en la atmósfera; se obtuvieron resultados que van desde los 17 hasta los 365 ($\mu\text{m}/\text{año}$). Los valores obtenidos para la estación ILT fue de 44.71 $\mu\text{m}/\text{año}$, estación INOCAR 38,23 $\mu\text{m}/\text{año}$ y estación Refinería: 22.88 $\mu\text{m}/\text{año}$. Debido a que no se dispone de los datos de concentración de SO_2^- y Cl^- para las estaciones de ensayo, no se pudo hacer un análisis comparativo exhaustivo, pero si se puede notar que los valores obtenidos en la presente investigación se encuentran dentro de los rangos establecidos en el proyecto MYCAT, para atmósferas con concentraciones leves de los contaminantes antes mencionados.

3.3.- CORROSION DEL COBRE

3.3.1.- ASPECTO GENERAL

Los productos de corrosión del cobre forman una fina capa uniforme de color marrón, en mayor proporción en la superficie anterior (Figura 3.11). Se observa la formación de pequeños puntos negros distribuidos a lo largo de la superficie de la probeta.

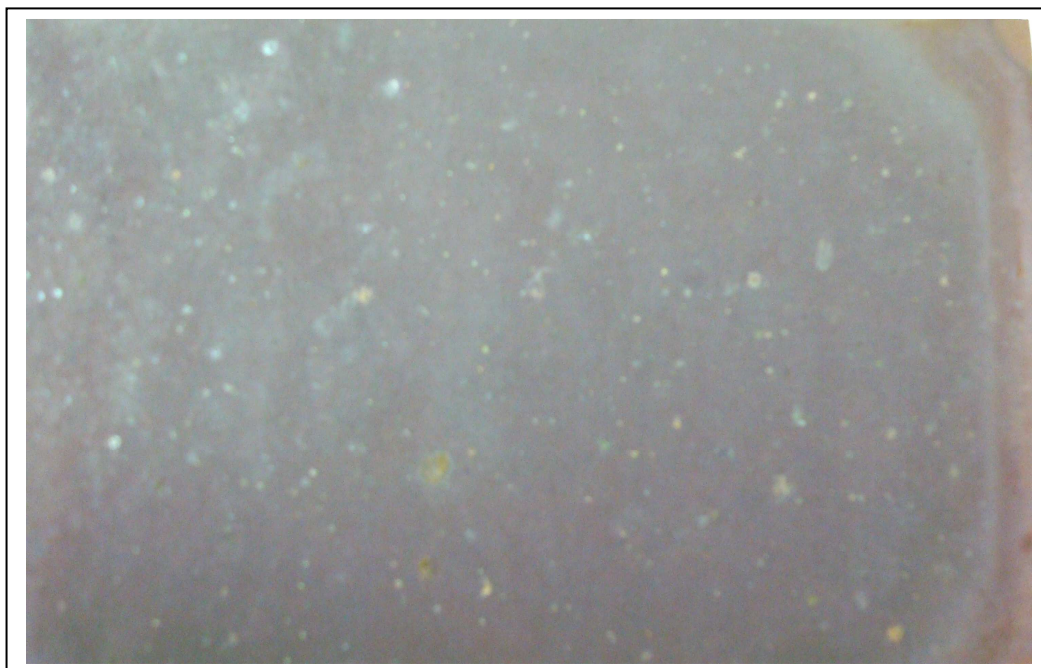


Figura 3.11: Probeta de cobre, cara anterior (1 año de exposición) Estación INOCAR

Como se puede observar en la Figura 3.11 la superficie metálica presenta en los extremos marcas dejadas por el flujo de agua lluvia; este patrón, como ya se dijo anteriormente, es generado por las cabezas de los tornillos de sujeción. También se observa la presencia de contaminantes sólidos depositados sobre la superficie, los mismos que provienen de la atmósfera.

La Figura 3.12 muestra la superficie posterior corroída de una probeta de cobre después de un año de exposición, no se observa la presencia de sólidos depositados sobre la superficie como ocurre en la cara anterior. Los productos de corrosión tienen un color marrón oscuro, se encuentran distribuidos uniformemente sobre la superficie. Cuando el cobre es expuesto a la atmósfera, se forma una capa de productos de corrosión de color café verdoso o verdoso azulado, generalmente de óxido cuproso, esta capa de productos de corrosión

toma el nombre de *patina*; estas patinas de cobre son estructuras química y metalúrgicamente complejas.



Figura 3.12: Probeta de cobre, cara posterior (1 año de exposición) Estación INOCAR

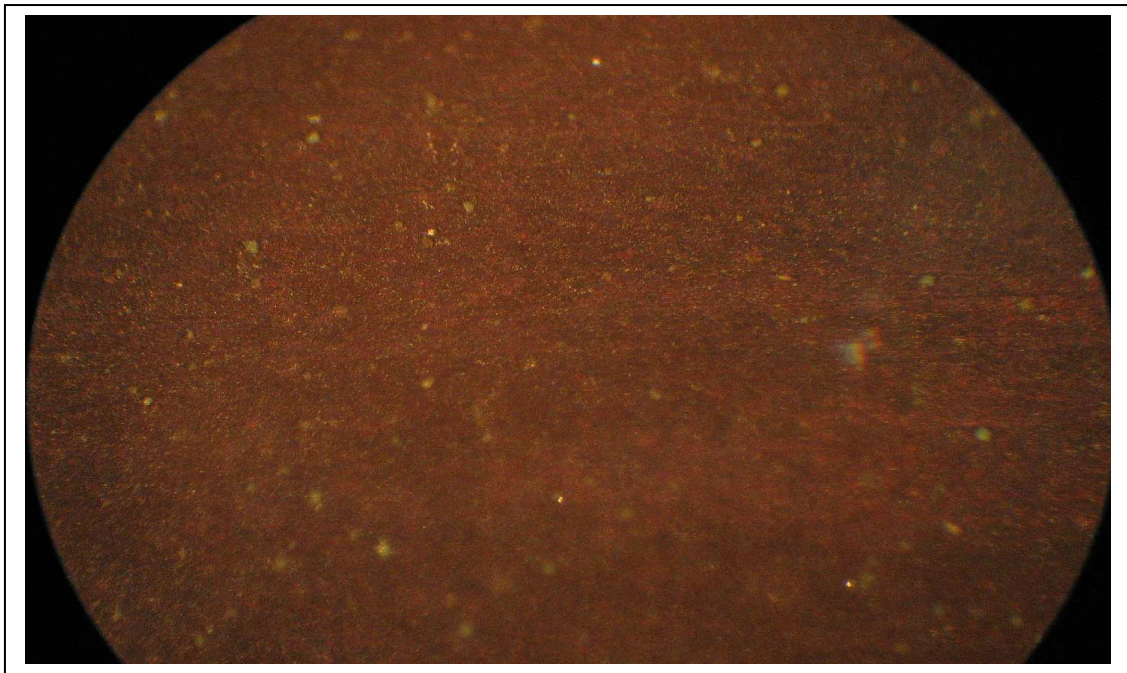


Figura 3.13.- Micrografía 40 x, Superficie Corroída del cobre, cara anterior (1 año de exposición) Estación INOCAR

A nivel del microscopio óptico, no se observan diferencias entre los productos de corrosión de las caras anterior y posterior. (Figuras 3.13 y 3.14).

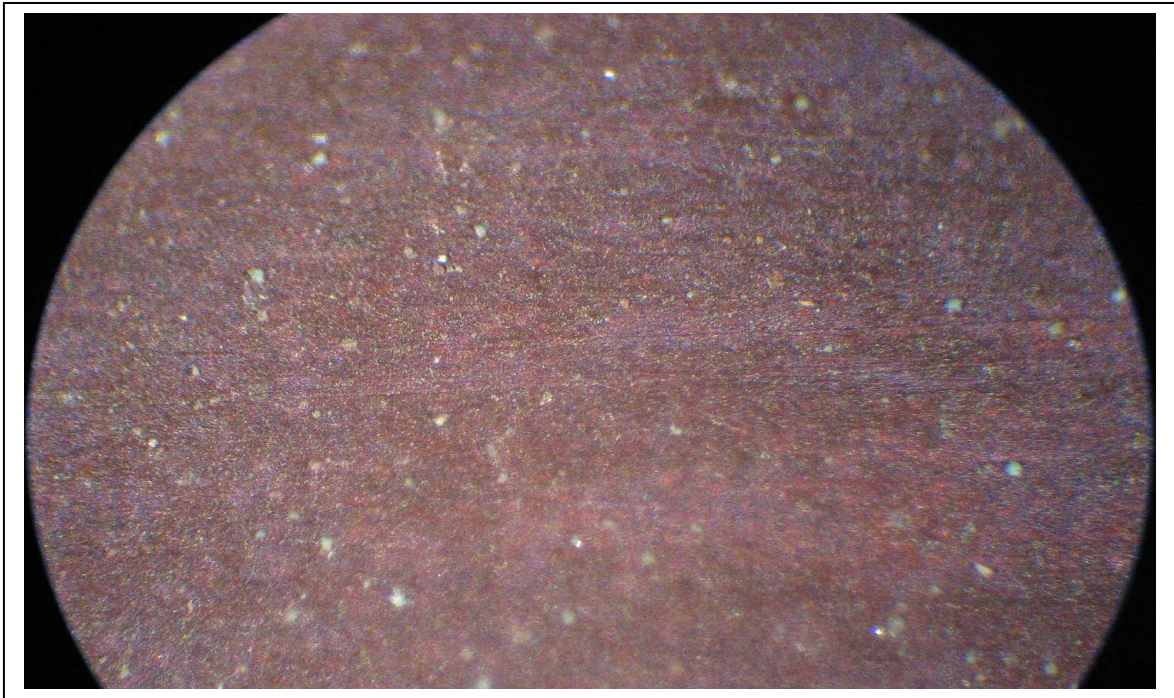


Figura 3.14.- Micrografía 40 x, Superficie Corroída del cobre, cara posterior (1 año de exposición) Estación INOCAR.

3.3.2.- CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION

La velocidad de corrosión, V_c ($\mu\text{m}/\text{año}$) y la penetración (μm), se pueden calcular a partir de los datos experimentales de área, tiempo de exposición, masa inicial y masa final.

En la Tabla 3.5 se muestran los datos de la penetración de corrosión respecto al tiempo.

Tabla 3.5.- Corrosión del cobre vs. tiempo

Estación	Código	Tiempo (años)	Corrosión (μm)	C media(μm)
Luís Tello	ILT Cu 2 10	0.308	0.79	0.76
	ILT Cu 12		0.72	
	ILT Cu 38	0.558	1.18	1.23
	ILT Cu 31		1.27	
	ILT Cu 34	0.834	1.27	1.26
	ILT Cu 59		1.26	
	ILT Cu 53	1.32	1.44	1.51
	ILT Cu 62		1.59	
INOCAR	P Cu 11	0.236	1.76	1.77
	P Cu 7 10		1.78	
	P Cu 48	0.48	2.63	2.71
	P Cu 76		2.80	
	P Cu 36	0.767	3.91	3.87
	P Cu 1 10		3.84	
	P Cu 5 3	1	5.21	5.21
Refinería	R Cu 65	0.25	0.39	0.43
	R Cu 37		0.47	
	R Cu 77	0.53	0.71	0.84
	R Cu 41		0.98	
	R Cu 24	0.76	1.25	1.27
	R Cu 59		1.29	
	R Cu 3 10	1.26	1.76	1.67
	R Cu 25		1.60	

A partir de estos datos se construyeron gráficos de Corrosión vs. Tiempo, los mismos que nos permiten obtener los valores de corrosión a 0.25, 0.5, 0.75 y 1 año de exposición, como se muestra en las Figuras 3.18, 3.19 y 3.20.

3.3.3.- CINÉTICA DE CORROSIÓN DEL COBRE

A partir de los datos experimentales recogidos a diferentes intervalos de tiempo y haciendo uso de la regresión lineal, hemos podido definir las siguientes ecuaciones para la corrosión del Cobre, en las diferentes estaciones de ensayo, como se muestra en la Tabla 3.6. Los cálculos se presentan en el Anexo IV.

Tabla 3.6.- Ecuaciones de corrosión del cobre

Estación	Ecuación
Luis Tello	$C = 1,39 * t^{0,46}$
INOCAR	$C = 4,89 * t^{0,73}$
Refinería	$C = 1,63 * t^{0,98}$

A partir estas ecuaciones podemos determinar la penetración de la corrosión media, y la velocidad media de corrosión expresada en ($\mu\text{m/año}$) y (g/año m^2) para las probetas de cobre, las mismas que podemos observar en la Tabla 3.7:

Tabla 3.7.- Valores de corrosión y velocidad de corrosión para el cobre.

Estación	No. Retiro	Tiempo (años)	Corrosión (μm)	Vc ($\mu\text{m/año}$)	Vc ($\text{g/m}^2\text{*año}$)
I.L.T	1	0.25	0.74	2.96	26.40
	2	0.5	1.01	2.02	18.02
	3	0.75	1.22	1.63	14.51
	4	1	1.39	1.39	12.40
INOCAR	1	0.25	1.88	7.52	67.08
	2	0.5	3.03	6.06	54.06
	3	0.75	4.01	5.35	47.69
	4	1	5.21	5.21	46.38
Refinería	1	0.25	0.42	1.68	15.06
	2	0.5	0.83	1.66	14.85
	3	0.75	1.23	1.64	14.71
	4	1	1.64	1.64	14.62
Municipio	4	1	5.53	5.53	43.5

A partir de estos datos se construyeron gráficos en función del tiempo, los mismos que permiten hacer un mejor análisis comparativo entre las tres

estaciones de ensayo; estos gráficos se pueden observar en las Figuras 3.15, 3.16 y 3.17.

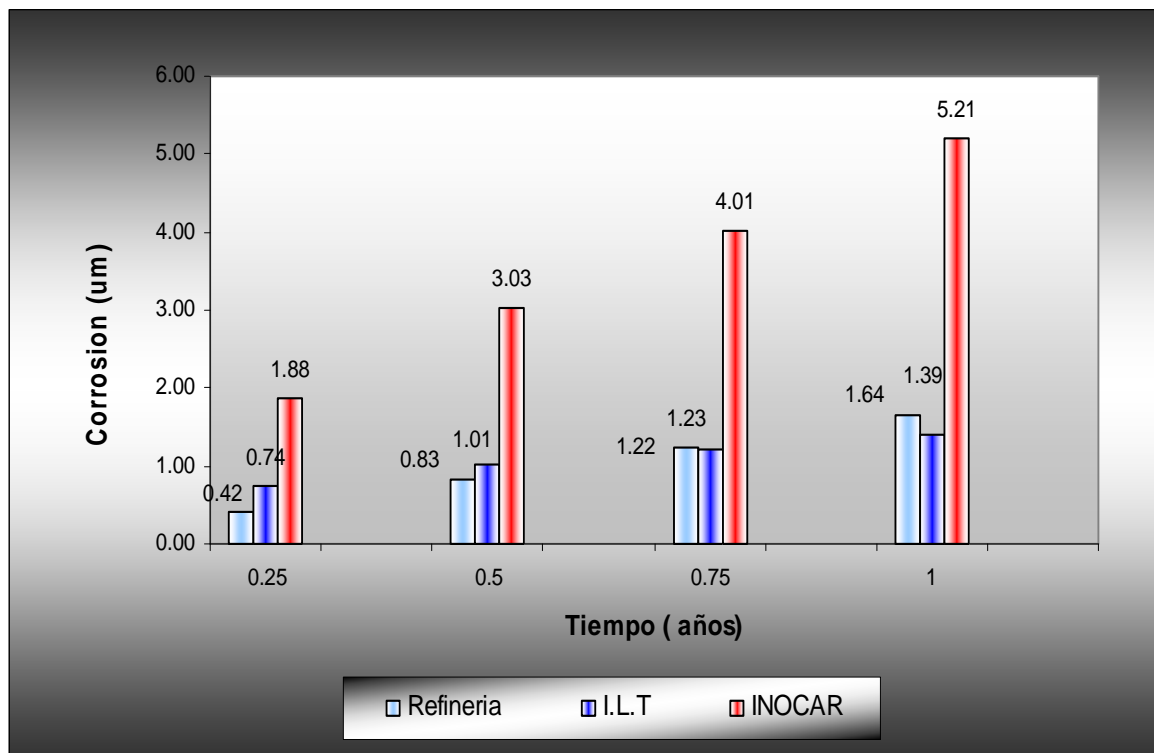


Figura 3.15.- Corrosión del cobre (μm) vs. tiempo

En la Figura 3.15, se puede observar que los mayores valores de penetración de la corrosión a diferentes tiempos de exposición son muy marcados y se presentaron en la estación INOCAR.

De igual manera, para el caso de la velocidad de corrosión, ya sea esta expresada en ($\mu\text{m}/\text{año}$) o ($\text{g}/\text{año} \cdot \text{m}^2$), (Figura 3.16 y Figura 3.17) se observa que en la estación INOCAR se presentaron los mayores valores en los distintos tiempos de exposición.

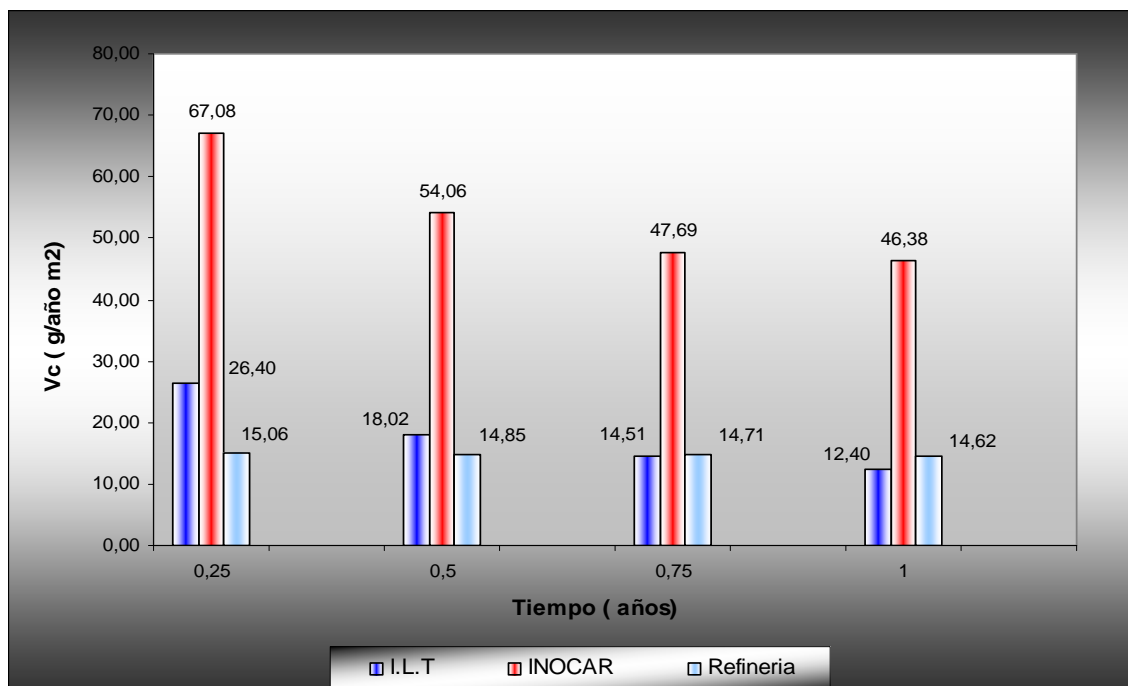


Figura 3.16.- Velocidad de corrosión del cobre (g/año m^2) vs. tiempo

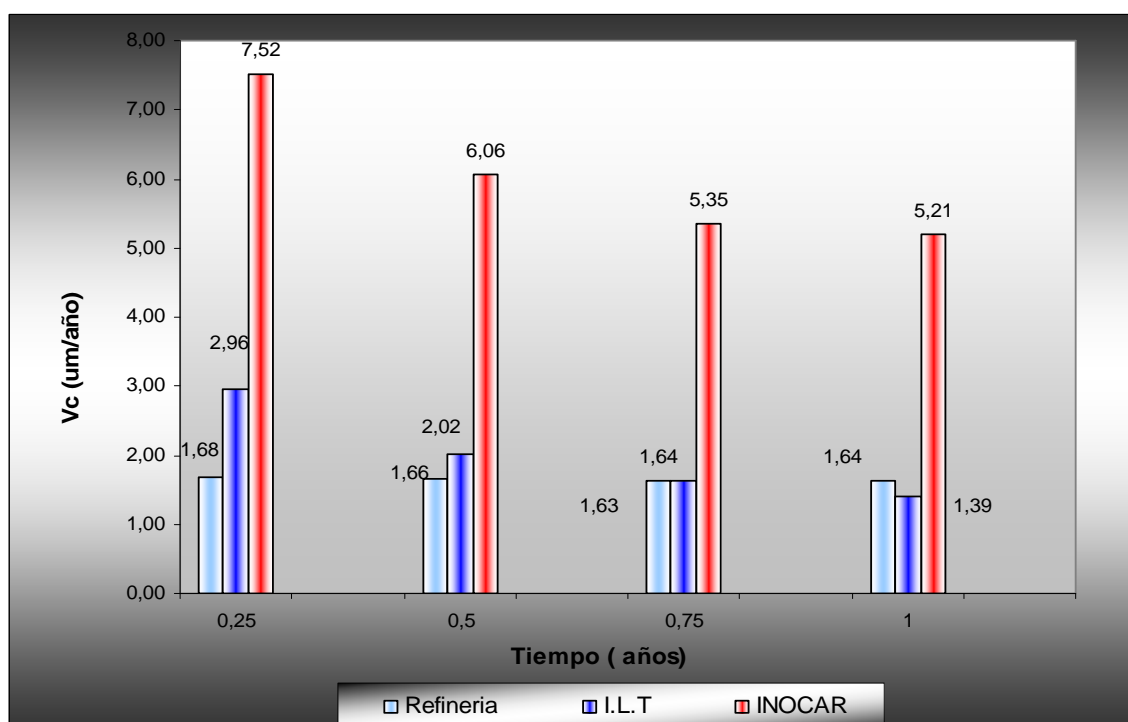


Figura 3.17: Velocidad de corrosión del cobre ($\mu\text{m/año}$) vs. tiempo

Los valores de corrosión y velocidad de corrosión para las estaciones ILT y Refinería presentados durante el tiempo de exposición son similares, siendo

mayores en la estación ILT. De estas observaciones podemos inferir la sensibilidad del cobre a las altas concentraciones de iones cloruro en la atmósfera.

3.3.4.-ANÁLISIS DE LA CINÉTICA DE CORROSIÓN DEL COBRE

Haciendo uso de los datos de corrosión (μm), se construyeron gráficos en función del tiempo para cada estación de ensayo (Figuras 3.18, 3.19, 3.20). La Figura 3.18 muestra los valores de Corrosión vs. Tiempo de exposición para la estación INOCAR, se ha agregado la línea de tendencia para una función potencial del tipo $y = a \cdot x^n$, la misma que corresponde a la ecuación que caracteriza los procesos corrosivos $C = a \cdot t^n$. Se puede observar que en el primer año de exposición, todavía nos encontramos en la sección lineal de la curva.

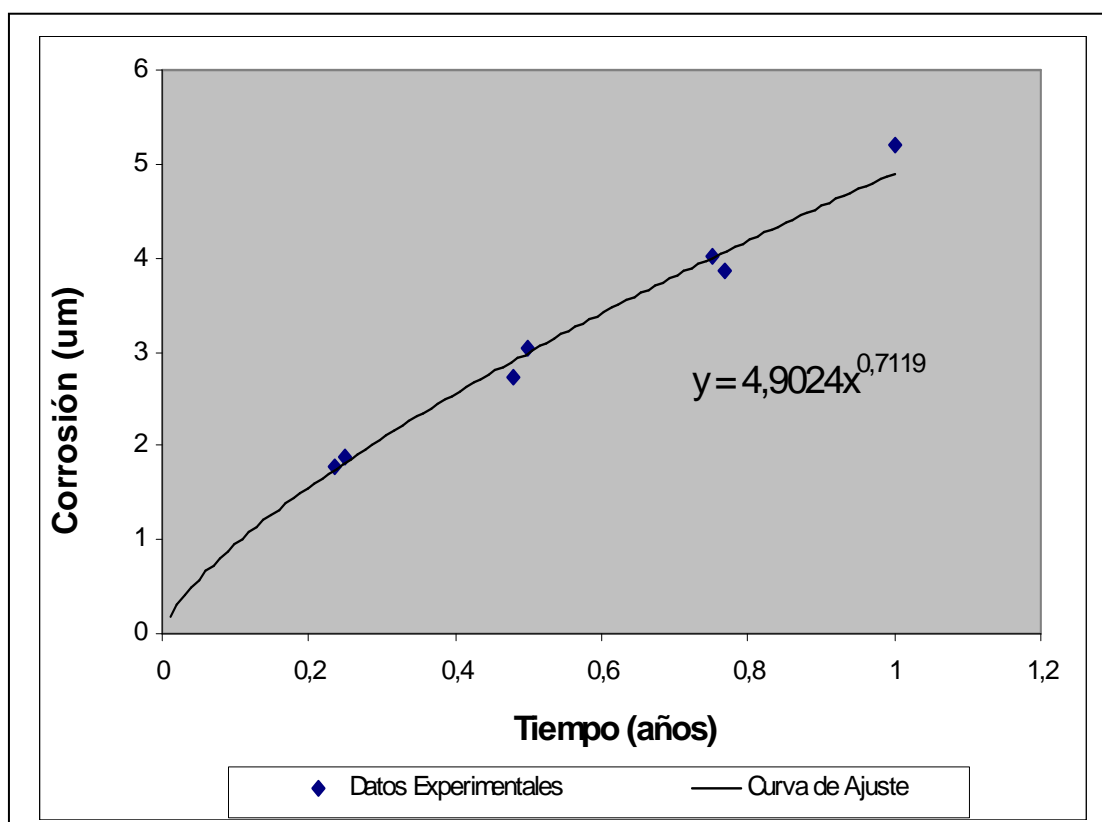


Figura 3.18: Corrosión del cobre (μm) vs. tiempo (Estación INOCAR)

Para el caso de la estación ILT, aún cuando la curva de ajuste no se presenta totalmente lineal, se puede observar en la Figura 3.19, que los datos experimentales, todavía no se ajustan por completo al modelo exponencial

planteado para la corrosión en función del tiempo. (Ecuación 2.4). En el caso de la estación Refinería (Figura 3.20) este fenómeno es aún más apreciable, los datos experimentales presentan un ajuste lineal a la curva, por lo tanto, se considera prematuro realizar un análisis de los valores de las constantes de a y n (Ecuación 2.4).

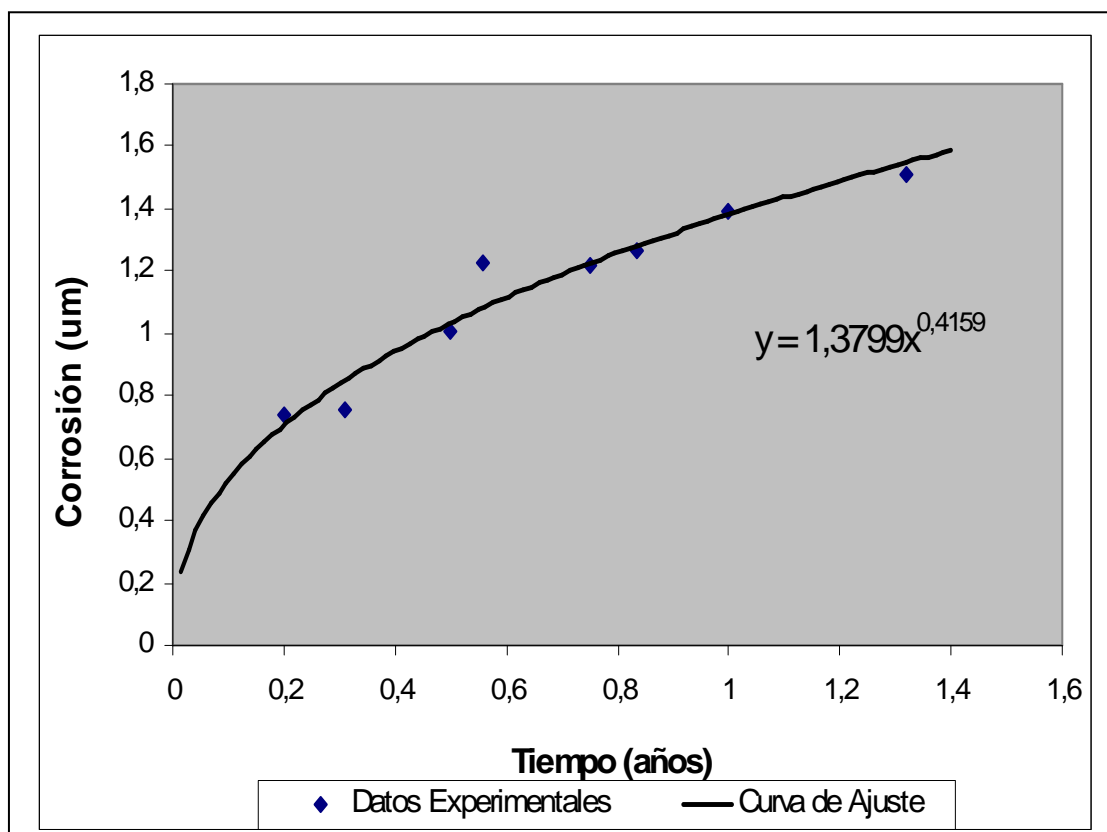


Figura 3.19: Corrosión del cobre (μm) vs. tiempo (Estación ILT)

En las tres estaciones se observó que los valores de corrosión respecto al tiempo de exposición presentan un valor de coeficiente de determinación múltiple (R^2) bastante aceptable, esto es ILT: 0.99; INOCAR: 0.94 y Refinería: 0.99; además existe una disposición regular de los puntos correspondientes a los datos experimentales en torno a la línea de tendencia que caracteriza el proceso corrosivo. Esto nos da la certeza de la correlación de los datos obtenidos experimentalmente con las ecuaciones matemáticas obtenidas a partir de regresiones lineales.

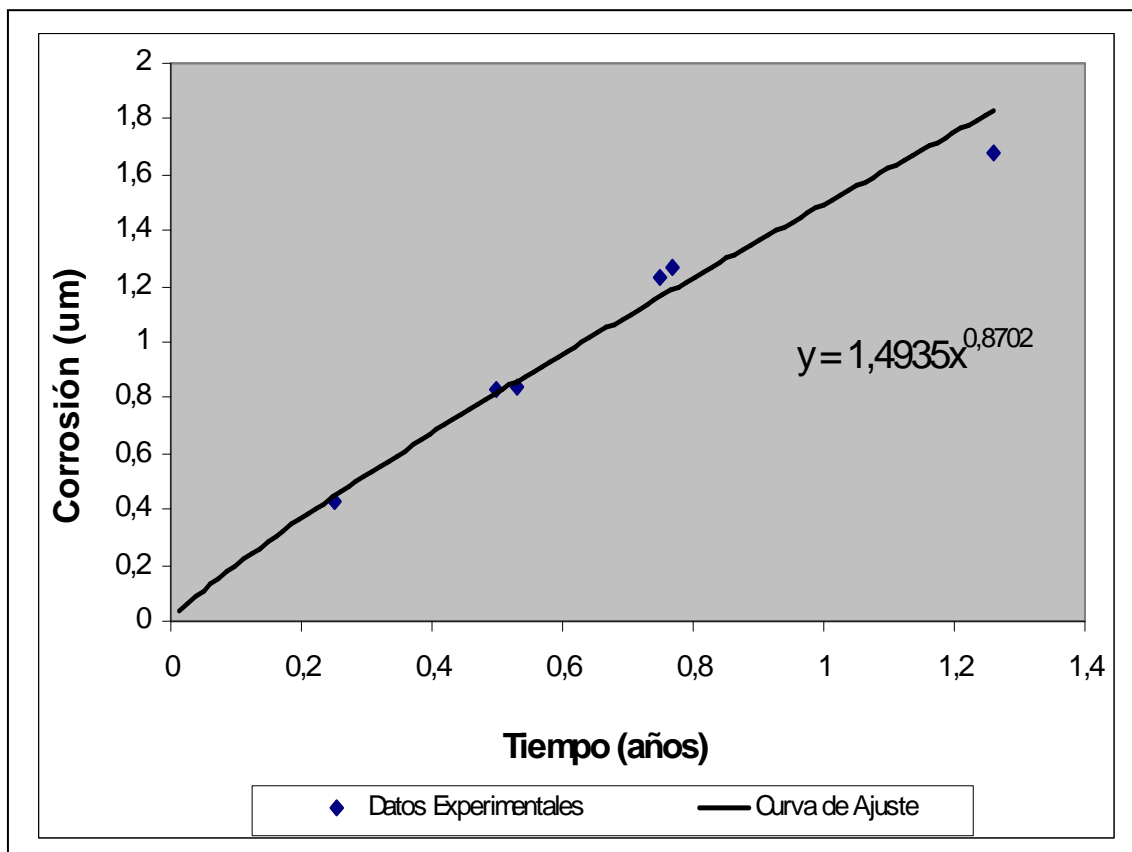


Figura 3.20: Corrosión del cobre (μm) vs. tiempo (Estación Refinería)

De estudios anteriores (Leygraf, Graedel, 2001) se concluye que los rangos de V_c para los diferentes tipos de atmósfera son los mostrados en la Tabla 3.8:

Tabla 3.8.- Valores de V_c para el cobre (Leygraf, Graedel, 2001)

Atmósfera	V_c ($\mu\text{m}/\text{año}$)
Rural	0-5
Urbana	1-2
Industrial	≤ 2.5
Marina	≈ 1

Comparando los valores de la Tabla 3.8 y los resultados de V_c obtenidos en el presente trabajo, Tabla 3.7, se concluye que las atmósferas de la estación ILT y Refinería corresponden a una zona industrial, conclusión apegada a la realidad que muestra la veracidad de los resultados obtenidos. Para atmósferas marinas,

con una concentración de cloruros (Cl^-) comprendida entre $60 - 300 \text{ mg Cl/m}^2$ día, el proyecto MYCAT obtuvo valores de V_c entre 3.29 y 5.8 um/año y para atmósferas con concentraciones de Cl^- menores a $60 \text{ mg Cl}^- / \text{día m}^2$, los valores varían entre 0.8 y 3.19 um/año ; siendo el valor de V_c para la estación ubicada en la ciudad de Salinas igual a 2.33 um/año . Al no disponer de valores de concentración de Cl^- es complicado hacer un análisis comparativo de los resultados obtenidos, pero si podemos presumir que las concentraciones de estos contaminantes en la ciudad de Esmeraldas, específicamente en las estaciones de ensayo, alcanzan los $60 - 300 \text{ mg Cl/m}^2$ día, lo cual se verificará con otros proyectos de titulación relacionados con el Proyecto de investigación del cual forma parte este trabajo. (CYTED, 1998).

Por otra parte, las estaciones INOCAR y Municipio presentaron valores de V_c mucho más altos, alrededor de 5 um/año , valores fuera de los rangos establecidos en la Tabla 3.8, pero a su vez valores estos similares a los resultados obtenidos en el proyecto MYCAT para atmósferas con una concentración de Cl^- de $60-300 \text{ mg Cl}^- / \text{día m}^2$, valores que muestran la sensibilidad del proceso corrosivo del cobre en presencia de iones Cl^- .

3.4.-CORROSION DEL ALUMINIO

3.4.1.- ASPECTO GENERAL

Al entrar en contacto con el aire, el aluminio se recubre de una delgada e inerte película de alúmina (Al_2O_3) la misma que se comporta como agente protector del metal. (CYTED, 1998).

La corrosión del aluminio se manifiesta primeramente por el deslustrado, es decir, pérdida del característico brillo metálico y una consiguiente corrosión por picadura. A diferencia de metales como Acero, Cobre o Zinc, donde el proceso corrosivo se presenta sobre toda a superficie expuesta, la corrosión del aluminio se caracteriza por la formación de múltiples picaduras repartidas por toda la superficie metálica, dejando entre ellas áreas de metal intacto, también se puede observar la presencia de puntos de corrosión de color negro. (Figura 3.21).



Figura 3.21.- Probeta de aluminio, cara anterior (1 año de exposición). Estación Refinería

La cara anterior de las probetas de aluminio después de un año de exposición muestra la presencia de productos de corrosión acumulados en determinados puntos de la superficie, principalmente en los bordes de la misma. Estos productos de corrosión no presentan una distribución uniforme a lo largo de la superficie. Adicionalmente, se observa la presencia de contaminantes sólidos, como polvo y otros, sobre la superficie.

La cara posterior presenta productos de corrosión pero en menor cantidad, no se observa la presencia de polvo depositado sobre la superficie (Figura 3.22). La Figura 3.23 muestra una vista al microscopio de la superficie corroída de una probeta de aluminio, se pueden observar la concentración de los productos de corrosión y la presencia de contaminantes sólidos sobre la superficie.



Figura 3.22.- Probeta de aluminio, cara posterior (1 año de exposición) Estación Refinería

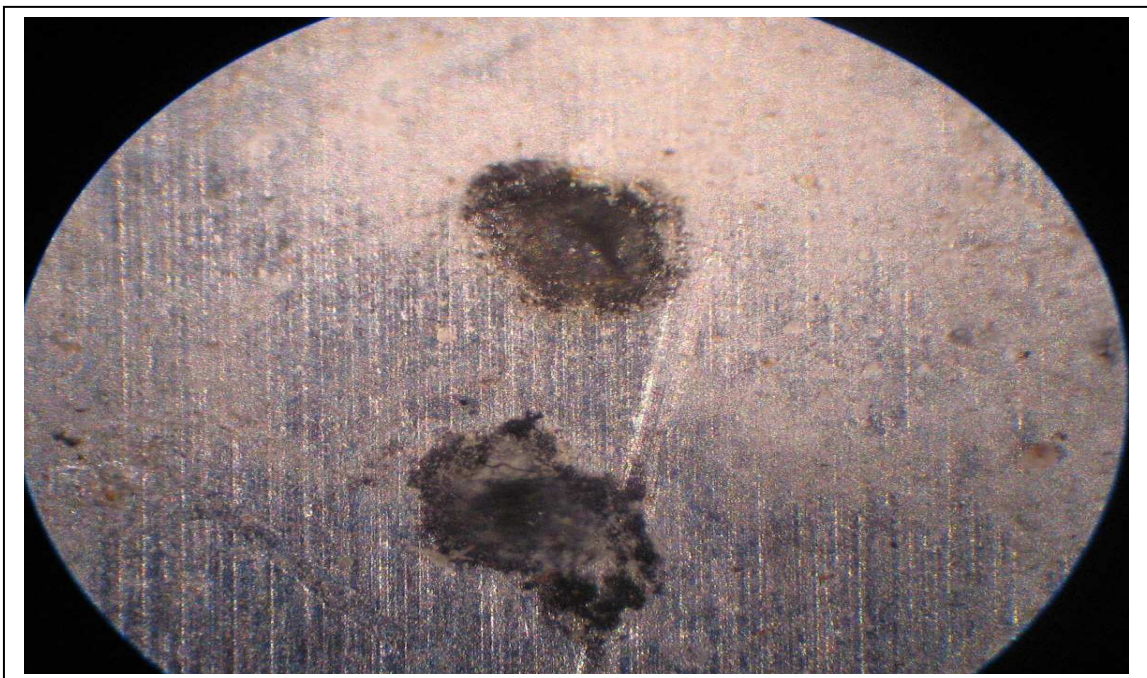


Figura 3.23.- Micrografía 40 x, Probeta de aluminio, cara anterior (1 año de exposición) Estación Refinería.

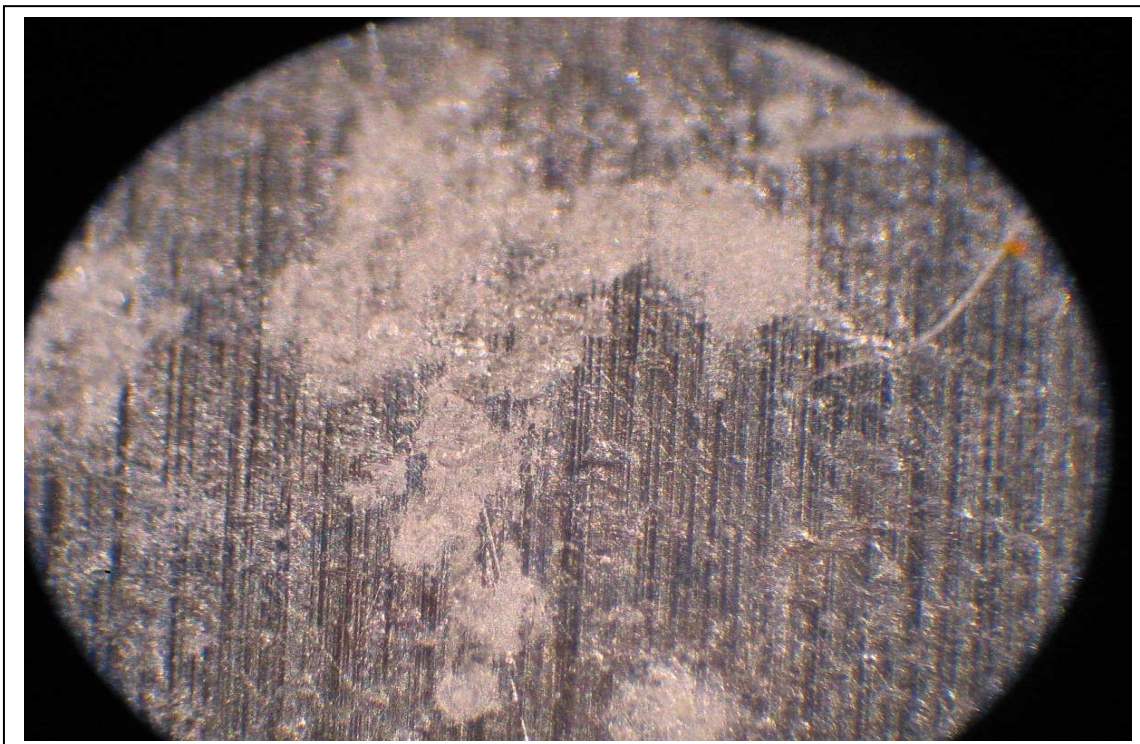


Figura 3.24.- Micrografía 40x, Probeta de aluminio, cara anterior (1 año de exposición) Estación Refinería.

En la Figura 3.23, se observa el depósito de contaminantes sobre la superficie metálica, la Figura 3.24 muestra la cara anterior de la misma probeta de aluminio. Se puede observar la corrosión localizada y la acumulación de los productos de corrosión sobre la superficie, también se puede observar que existen áreas intactas que no han sufrido ataque corrosivo, por este motivo, resulta muy subjetivo expresar la corrosión del aluminio haciendo uso de la penetración media. Se hace más útil el criterio de pérdida de masa por unidad de área.

3.4.2.-CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION

En la Tabla 3.9 se muestran los resultados de velocidad de corrosión del Aluminio respecto al tiempo, calculados en base a los datos experimentales que se presentan en el Anexo I.

Tabla 3.9.- Velocidad corrosión del aluminio vs. tiempo

Estación	Código	t (años)	Vc(g/m²*año)
Luis Tello	ILT AI 4 10	0,308	0.13
	ILT AI 4 2		0.15
	ILT AI 1 4	0,558	0.13
	ILT AI 7 8		0.12
	ILT AI 2 1	0,834	0.12
	ILT AI 2 7		0.10
	ILT AI 5 4	1,32	0.39
	ILT AI 3 3		0.48
INOCAR	P AL 5 10	0,236	0.39
	P AI 2 5		0.36
	P AI 4 7	0,48	0.32
	P AI 1 3		0.27
	P AI 5 6	0,767	0.31
	P AI 1 9		0.20
	P AI 5 2	1	0.49
Refinería	R AI 1 2	0,25	0.10
	R AI 7 8		0.12
	R AI 3 1	0,53	0.12
	R AI 5 8		0.10
	R AI 7 5	0,76	0.21
	R AI 4 3		0.18
	R AI 1 5	1,01	0.25
	R AI 5 6		0.35

3.4.3.- CINÉTICA DE CORROSIÓN

A partir de los datos experimentales recogidos a diferentes intervalos de tiempo y haciendo uso de la regresión lineal, se ha podido definir las siguientes ecuaciones para la corrosión del aluminio, en las diferentes estaciones de ensayo (Anexo V.3), como se muestra en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10.- Ecuaciones de corrosión del aluminio

Estación	Ecuación
Luis Tello	$C = 0,070 * t^{1,47}$
INOCAR	$C = 0,092 * t^{0,73}$
Refinería	$C = 0,091 * t^{1,69}$

A partir de estas ecuaciones podemos determinar la velocidad media de corrosión expresada en (g/año m²) para las probetas de aluminio, las mismas que podemos observar en la Tabla 3.11:

Tabla 3.11.- Valores de velocidad de Corrosión para el aluminio.

Estación	No. Retiro	Tiempo (años)	V_c (g/año*m²)
I.L.T	1	0,25	0,1
	2	0,5	0,14
	3	0,75	0,17
	4	1	0,19
INOCAR	1	0,25	0,36
	2	0,5	0,3
	3	0,75	0,27
	4	1	0,25
Refinería	1	0,25	0,09
	2	0,5	0,15
	3	0,75	0,2
	4	1	0,25
Municipio	4	1	1,1

A partir de estos datos se construyó un gráfico V_c vs. tiempo, el mismo que permiten hacer un mejor análisis comparativo entre las tres estaciones de ensayo; este gráfico lo podemos observar en la Figura 3.25. No se construyeron gráficos de penetración (μm) vs. tiempo ni de V_c ($\mu\text{m}/\text{año}$) vs. tiempo, debido a que su análisis carece de sentido en un proceso corrosivo localizado el que se presenta en la superficie del aluminio.

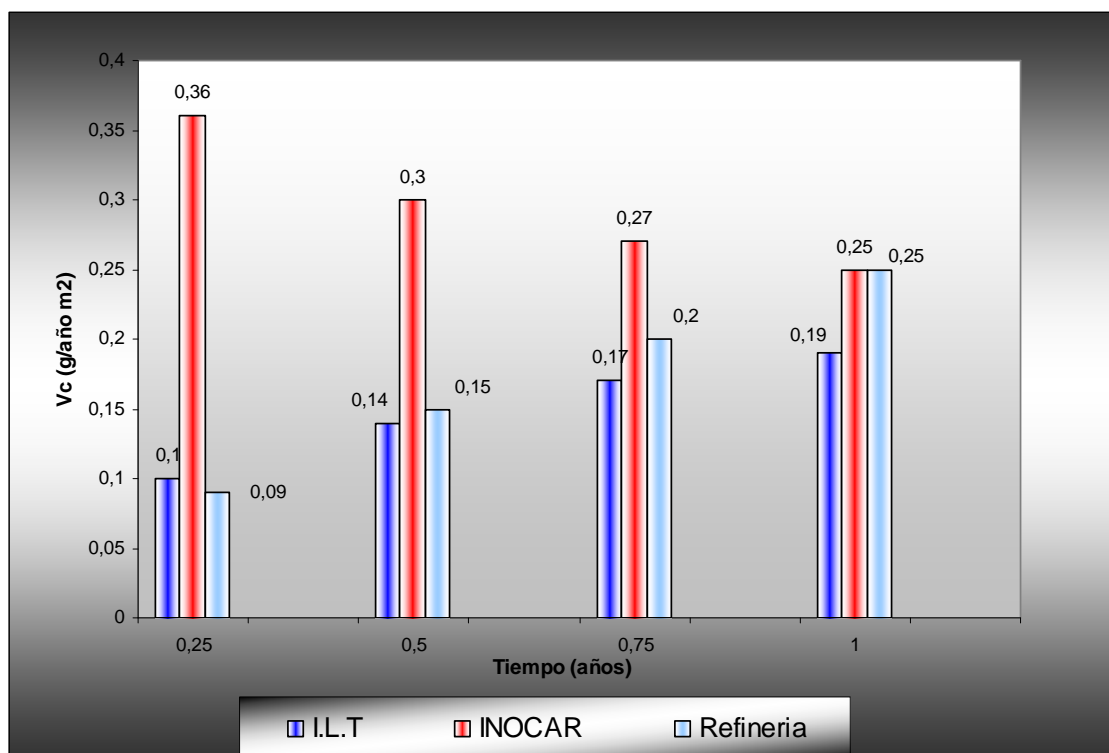


Figura 3.25.- Velocidad de corrosión del aluminio (g/año m^2) vs. tiempo

En la Figura 3.25 se puede observar que los valores de V_c son muy bajos y que los mayores valores a diferentes tiempos de exposición se presentaron en la estación INOCAR. El aluminio presenta una gran resistencia a la corrosión atmosférica, al exponerse a las condiciones ambientales se degrada formando una gran cantidad de productos de corrosión en los que se identifica una estructura de tres capas, el sustrato metálico, su óxido natural y una capa superficial de contaminantes. Se ha encontrado que los mayores constituyentes de esta capa de corrosión son los sulfatos y los cloruros. (CYTED, 1998; ASTM Handbook, 1987). La corrosión del aluminio se da en la atmósfera y en presencia de soluciones acuosas mediante la formación de óxidos muy estables sobre la

superficie metálica, lo que hace que el metal se encuentre en estado pasivo debido a la formación de la alúmina. Por esta razón el aluminio no presenta un deterioro uniforme de la superficie metálica y solamente en medios neutros en presencia de haluros, especialmente cloruros, se afecta la capa pasivante atacando al metal en zonas localizadas. (CYTED, 1988).

La Tabla 3.12 muestra valores de corrosión para el Aluminio obtenidos de bibliografía expresado en $\mu\text{m}/\text{año}$:

Tabla 3.12.- Valores de V_c para el aluminio (Leygraf, Graedel, 2001)

Atmósfera	V_c ($\mu\text{m}/\text{año}$)
Rural	0.0 - 0.1
Urbana	≈ 1
Marina	0.4 – 0.6

Los valores de V_c mostrados en la Tabla 3.12 no son los más adecuados, puesto que, como se explicó anteriormente, la corrosión del aluminio es localizada y la V_c debe estar expresada en $\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{año}$. En el proyecto MYCAT se obtuvieron valores de V_c ($\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{año}$) que van desde los 0.06 hasta los 4 ($\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{año}$), dependiendo de las condiciones atmosféricas y las concentraciones de Cl^- y SO_2 . (CYTED, 1998).

Para la estación ubicada en la ciudad de Salinas se obtuvo un valor de V_c de $1.12 \text{ g}/\text{m}^2\cdot\text{año}$. Comparando con los valores obtenidos en la estación INOCAR, los mismos que alcanzaron un valor de V_c de $0.25 \text{ g}/\text{m}^2\cdot\text{año}$, podemos observar que tan solo corresponde al 25% del valor de la estación Salinas. De igual manera, los valores obtenidos en la estación ILT y Refinería, 0.19 y $0.25 \text{ g}/\text{m}^2\cdot\text{año}$ respectivamente, son mucho menores. Caso aparte constituye la estación Municipio, donde el valor de V_c obtenido luego de un año de exposición alcanzó $1.1 \text{ g}/\text{m}^2\cdot\text{año}$, lo que muestra que el mayor ataque de la superficie metálica del aluminio se da en atmósferas urbanas, donde la concentración de contaminantes es alta, especialmente de material particulado, el mismo que al depositarse sobre la superficie favorece la formación de puntos localizados de corrosión.

Un referente importante para poder hacer un análisis comparativo de los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación, es el determinar la concentración de Cl^- y SO_2 en la atmósfera circundante a las estaciones de ensayo, esto nos va a permitir tener una idea más exacta del proceso corrosivo y poder descartar posibles errores en el proceso experimental.

De acuerdo a los valores de corrosión obtenidos en el proyecto MYCAT, los resultados obtenidos en la ciudad de Esmeraldas corresponderían a una atmósfera con una concentración de Cl^- de $10.8 \text{ mg/m}^2\cdot\text{día}$ y de $12.1 \text{ mg/m}^2\cdot\text{día}$ de SO_2 (CYTED, 1998).

3.4.4.-ANALISIS DE LA CINETICA DE CORROSION DEL ALUMINIO

Haciendo uso de los datos de corrosión (μm), se construyó un gráfico de la velocidad de corrosión en función del tiempo para cada estación de ensayo (Figuras 3.26, 3.27, 3.28).(Anexo V).

La Figura 3.26 muestra los valores de Corrosión vs. Tiempo de exposición para la estación INOCAR, se ha agregado la línea de tendencia para una función potencial del tipo $y = a \cdot x^n$, la misma que corresponde a la ecuación que caracteriza los procesos corrosivos $C = a \cdot t^n$. Se puede observar que en el primer año de exposición, todavía nos encontramos en la sección lineal de la curva. Este detalle esta presente también en la estación ILT y Refinería, y hace que todavía no sea posible realizar una discusión sobre los valores de las constantes a y n y su significado.

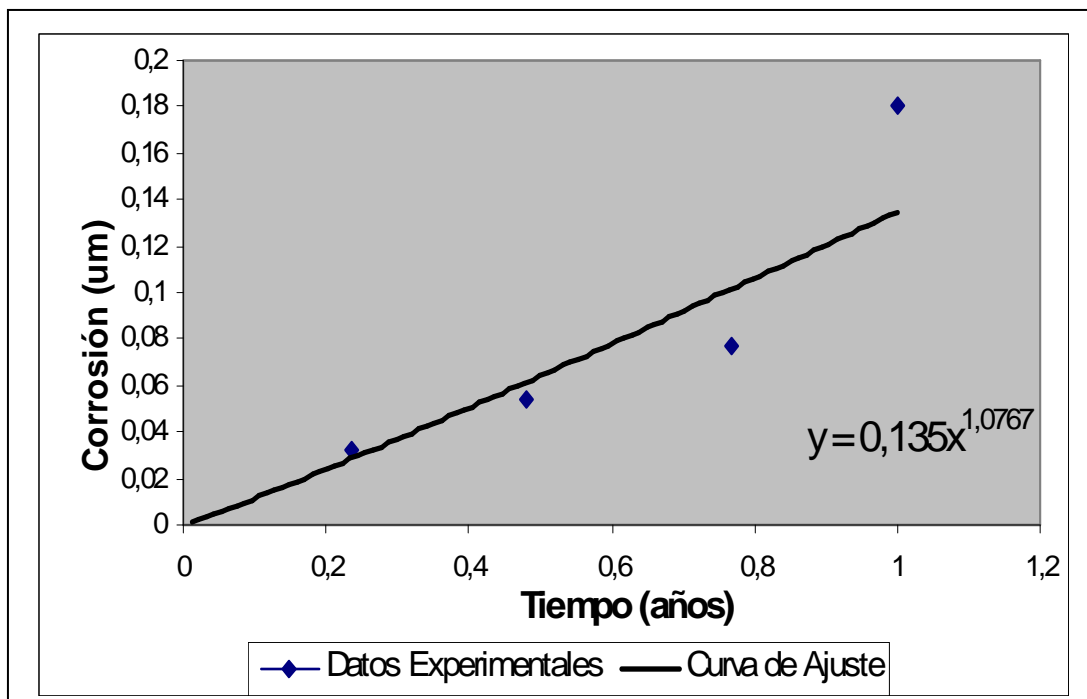


Figura 3.26: Corrosión del aluminio (μm) vs. tiempo (Estación INOCAR)

En las tres estaciones, se observó que los valores de corrosión respecto al tiempo de exposición presentan un valor de coeficiente de determinación múltiple (R^2) bajo, esto es ILT: 0.82; INOCAR: 0.88 y Refinería: 0.96.

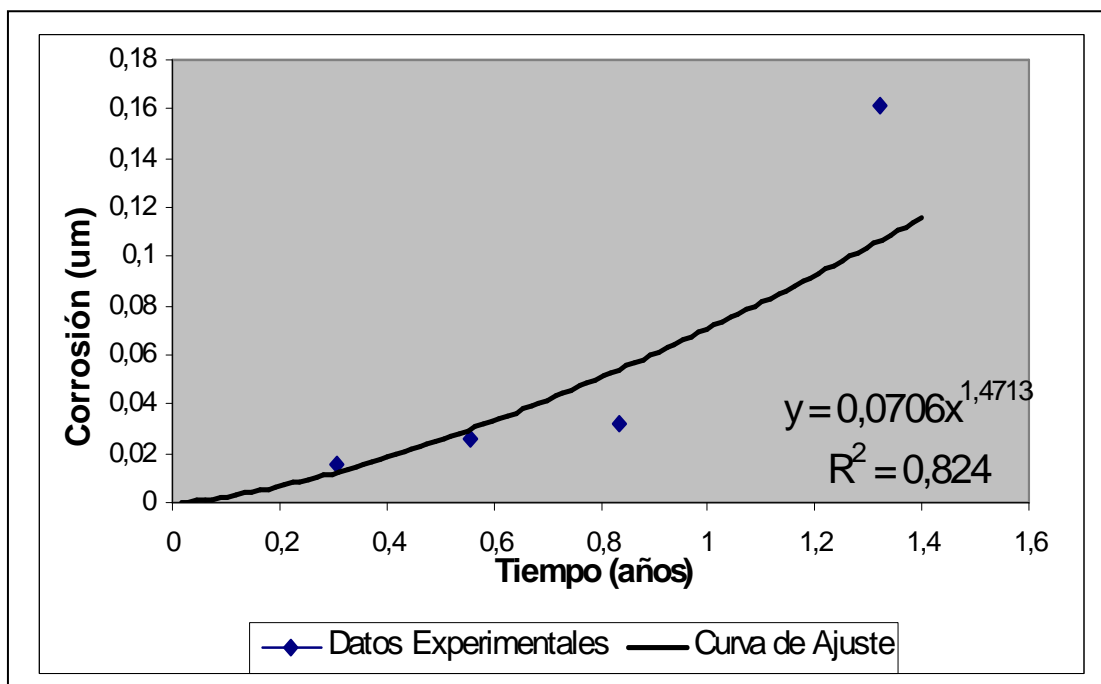


Figura 3.27: Corrosión del aluminio (μm) vs. tiempo (Estación ILT)

En las estaciones INOCAR e ILT, podemos observar que el dato obtenido en el cuarto retiro es alto, lo que hace que no tengamos un buen ajuste de la ecuación. No se puede precisar con exactitud la causa de este fenómeno, pero se presume que se debe a las condiciones atmosféricas imperantes en el periodo de exposición de la superficie, que son variables de acuerdo a la época del año.

Para el caso de la estación Refinería, se observa un muy buen ajuste de los datos obtenidos experimentalmente con la tendencia exponencial de la ecuación de corrosión.

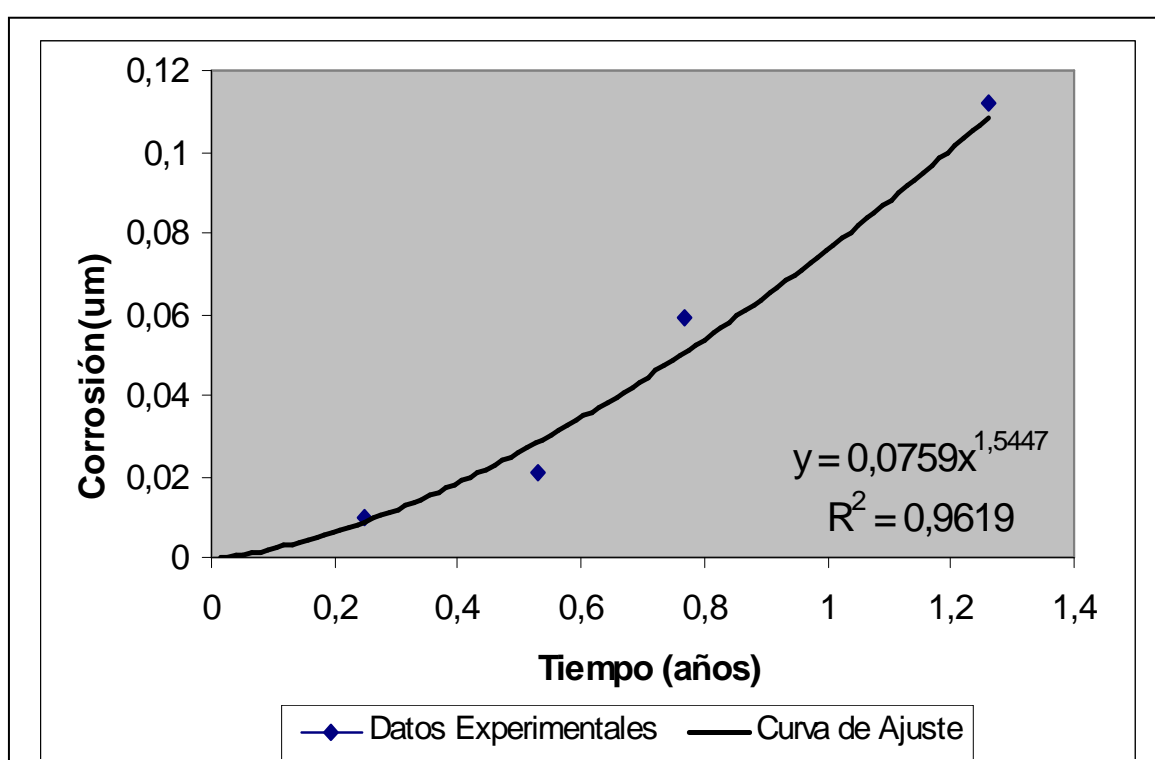


Figura 3.28: Corrosión del aluminio (μm) vs. tiempo (Estación Refinería)

3.5.- CORROSION DEL ZINC

3.5.1.- ASPECTO GENERAL

El zinc, en este caso el acero galvanizado, es una de las superficies metálicas que regularmente más se exponen a las condiciones medioambientales en un sin número de servicios, debido a sus excelentes propiedades anticorrosivas y bajo precio. Históricamente el estudio de la corrosión del zinc se ha concentrado en el

estudio del acero galvanizado, es decir, acero al carbono con un recubrimiento de Zinc. (Leygraf, Graedel, 2001).

El zinc, al ser expuesto a condiciones medio ambientales, desarrolla sobre su superficie una estructura compleja de productos de corrosión compuesta de una delgada película de óxido de zinc y otra, gruesa y porosa, de hidróxido y carbonatos de zinc. Esta película superficial, inhibe las reacciones de corrosión del metal y, dependiendo de las condiciones ambientales, la velocidad de corrosión puede modificarse debido a la continua formación y lavado de la película de productos de corrosión.

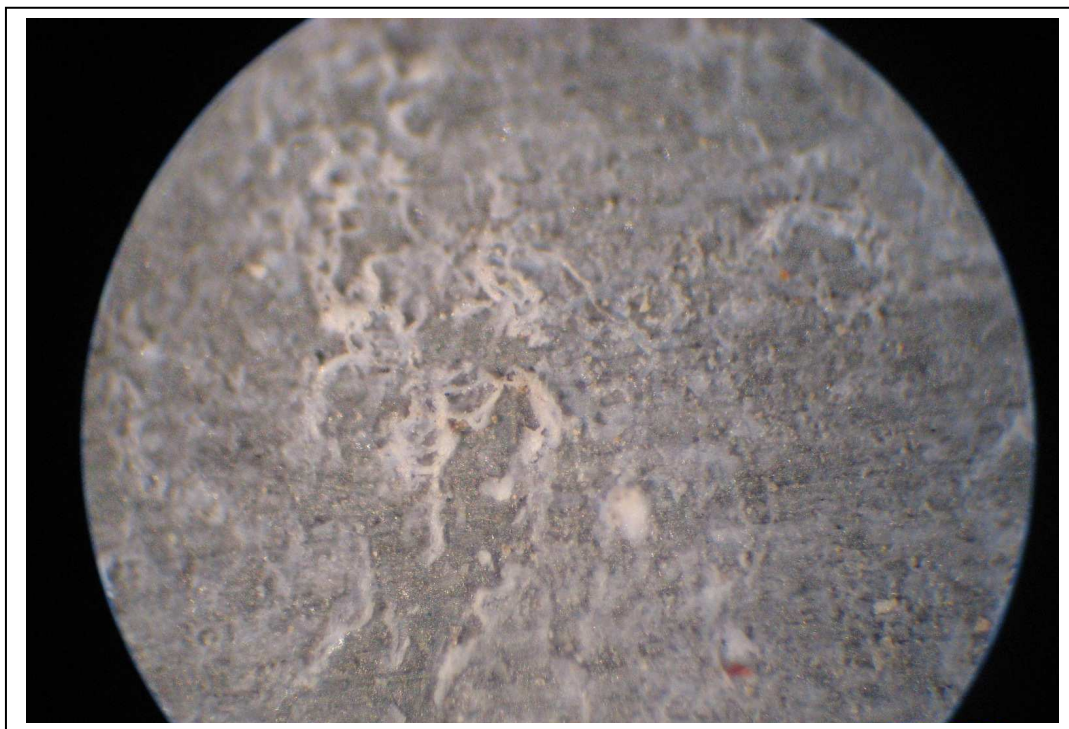


Figura 3.29.- Micrografía 40 x, superficie corroída del zinc, cara anterior, Estación ILT, (1 año de exposición).

La Figura 3.29 muestra la superficie metálica corroída de la cara anterior de la probeta de acero galvanizado, se puede observar la formación y depósito de los productos de corrosión uniformemente sobre la superficie metálica. Según varios autores, (CYTED, 1998), sobre un valor de $H_R = 70\%$ el SO_2 controla la velocidad del proceso corrosivo; atmósferas con valores de TDH elevados presentan condiciones propicias para la formación de la zincita, hidrozincita y carbonato de

zinc hidratado ($\text{ZnO}\cdot\text{CO}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Al ser estas condiciones coincidentes con las imperantes en la Estación ILT, en donde el valor de la H_R es alto por la ubicación geográfica de la zona y la concentración de el SO_2 es alta por las emisiones industriales, podemos concluir que los productos de corrosión que muestra la Figura 3.29 corresponden a la zincita, hidrozincita y carbonato de zinc hidratado. Para atmósferas marinas analizadas en el proyecto MYCAT, se pudo observar la presencia de hidrocloruro de zinc, $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$, llamada comúnmente simonkoleita, que se presenta en forma de cristales diminutos. (CYTED, 1998).



Figura 3.30.- Micrografía 40 x, nido de corrosión del zinc, cara anterior, Estación INOCAR, (1 año de exposición).

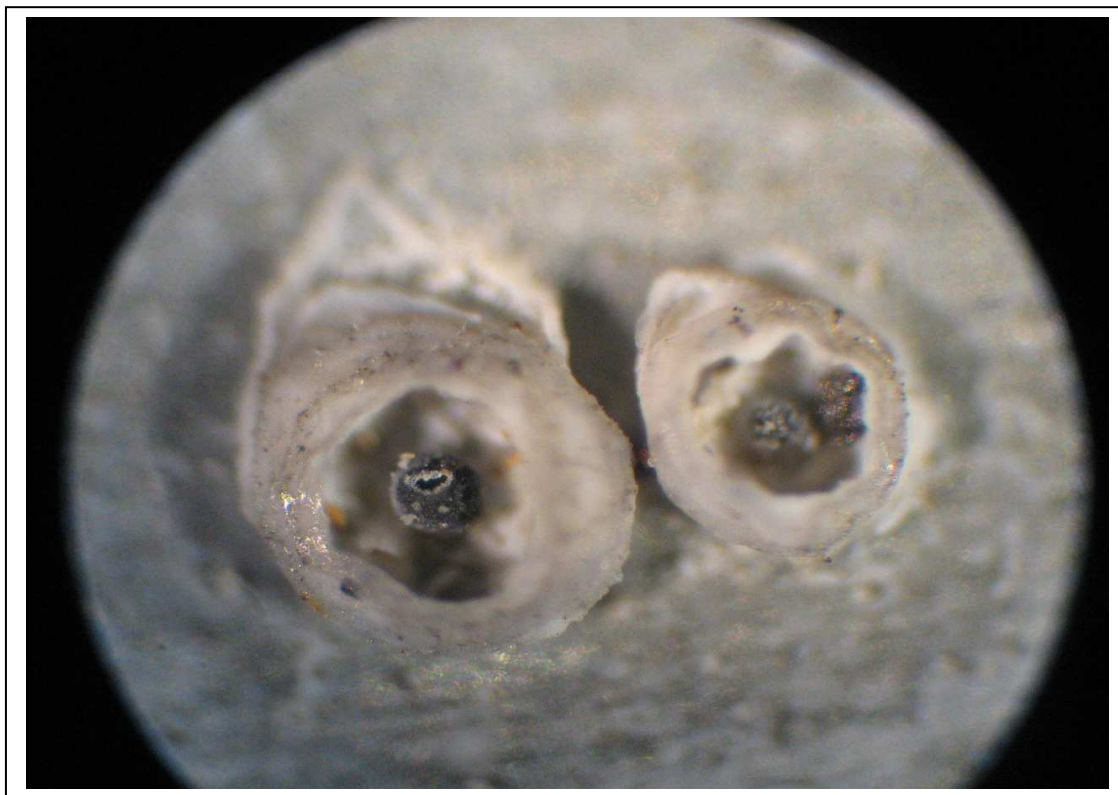


Figura 3.31.- Micrografía 40 x, nido de corrosión del zinc, cara anterior, Est. INOCAR, (1 año de exposición).

Las Figuras 3.30 y 3.31 muestran un acercamiento de una formación característica de productos de corrosión encontrada en las probetas expuestas en condiciones ambientales marinas. Los productos de corrosión del Zinc forman nidos de concentración de óxido, con formas características, especialmente en la estación INOCAR. También se pueden observar formaciones de óxido distribuidas en toda la superficie metálica.

3.5.2.- CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION

En la Tabla 3.13 se muestran los resultados de la penetración por corrosión del Zinc respecto al tiempo, de acuerdo con los cálculos presentados en el Anexo VI.

Tabla 3.13.- Corrosión del zinc vs. tiempo

Estación	Código	Tiempo(años)	Corrosión (μm)	C media (μm)
ILT	ILT Zn 2 2	0,308	0.95	1.06
	ILT Zn7 10		1.17	
	ILT Zn 6 3	0,558	1.36	1.36
	ILT Zn 3 9		1.36	
	ILT Zn 5 2	0,834	1.67	1.64
	ILT Zn 3 5		1.60	
	ILT Zn 7 4	1,32	1.84	1.96
	ILT Zn 1 7		2.07	
INOCAR	P Zn 2 4	0,48	0.61	0.61
	P Zn 6 9		0.61	
	P Zn 4 4	0,767	0.77	0.72
	P Zn 4 9		0.67	
	P Zn 5 7	1	1.36	1.36
Refinería	R Zn 11	0,25	0.38	0.35
	R Zn 51		0.33	
	R Zn 57	0,53	0.53	0.56
	R Zn 22		0.60	
	R Zn 44	0,76	0.62	0.80
	R Zn 13		0.98	
	R Zn 76	1,01	1.56	1.27
	R Al 5 6		0.98	

A partir de estos datos se construyeron gráficos corrosión vs. tiempo, los mismos que nos permite obtener los valores de corrosión a 0.25, 0.5, 0.75 y 1 año de exposición (Figuras 3.35, 3.36 y 3.37). Estos valores se muestran en la Tabla 3.14. (Anexo VI.1).

Tabla 3.14.- Velocidad corrosión del zinc vs. tiempo

Estación	Código	Tiempo (años)	Corrosión (μm)	Vc ($\mu\text{m/año}$)	Vc ($\text{g/m}^2\cdot\text{año}$)
I.L.T	ILT Zn 2 2	0,25	0,970	3,88	27,7
	ILT Zn7 10				
	ILT Zn 6 3	0,5	1,300	2,60	18,56
	ILT Zn 3 9				
	ILT Zn 5 2	0,75	1,540	2,05	14,66
	ILT Zn 3 5				
	ILT Zn 7 4	1	1,740	1,74	12,48
	ILT Zn 1 7				
INOCAR	P Zn 2 10	0,25	0,290	1,16	8,51
	P Zn 6 5				
	P Zn 2 4	0,5	0,590	1,18	8,54
	P Zn 6 9				
	P Zn 4 4	0,75	0,890	1,19	8,55
	P Zn 4 9				
	P Zn 5 7	1	1,19	1,19	8,5
Refinería	R Zn 7 10	0,25	0,270	1,08	7,71
	R Zn 11				
	R Zn 51	0,5	0,490	0,98	7
	R ZN 57				
	R Zn 22	0,75	0,706	0,94	6,72
	R Zn 44				
	R Zn 13	1	1,219	1,22	6,49
	R Zn 76				

3.5.3.- CINÉTICA DE LA CORROSIÓN DEL ZINC

A partir de los datos experimentales recogidos a diferentes intervalos de tiempo y haciendo uso de la regresión lineal, hemos podido definir las siguientes

ecuaciones para la corrosión del acero galvanizado (zinc), en las diferentes estaciones de ensayo, como se muestra en la Tabla 3.15. (Anexo VI.3).

Tabla 3.15.- Ecuaciones de corrosión del acero galvanizado

Estación	Ecuación
Luis Tello	$C = 1,75 * t^{0,42}$
INOCAR	$C = 1.20 * t^{1,00}$
Refinería	$C = 0,91 * t^{0,87}$

A partir estas ecuaciones podemos determinar la penetración de la corrosión media, expresada en μm y la velocidad media de corrosión expresada en $\mu\text{m}/\text{año}$ para las probetas de acero galvanizado (zinc); las mismas que podemos observar en las Figuras 3.32 y 3.33:

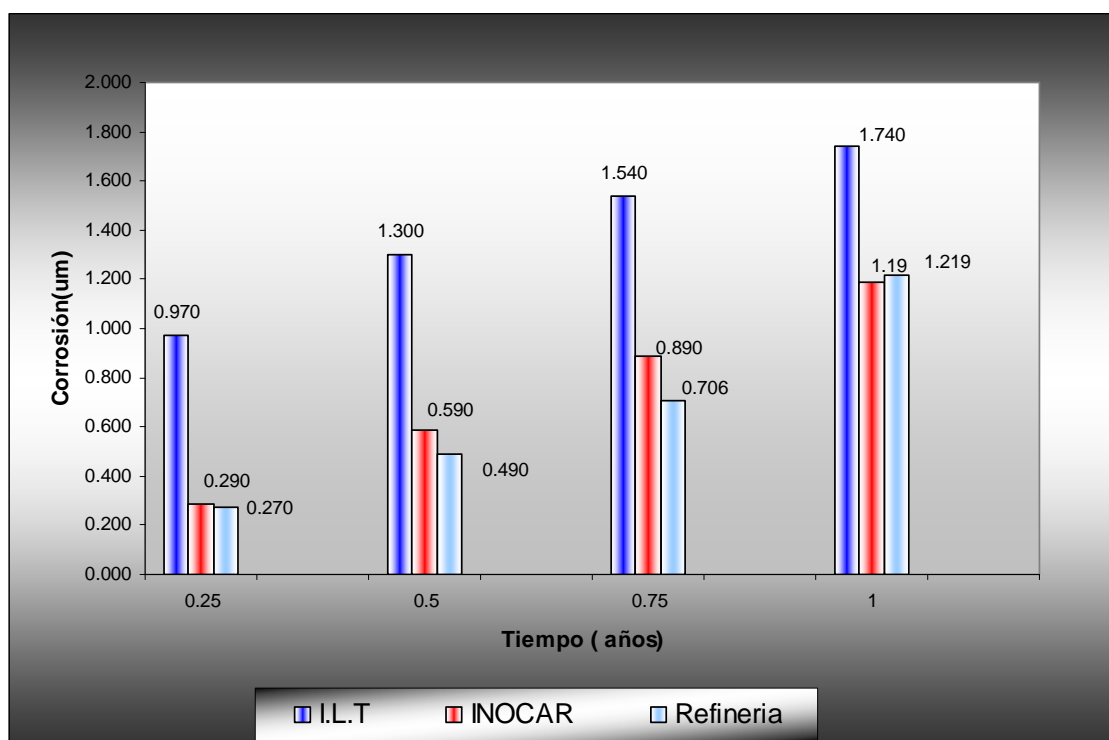


Figura 3.32.- Corrosión del zinc (μm) vs. tiempo

La Figura 3.32 muestra que los mayores valores de corrosión se presentaron en la estación I.L.T, mientras que en las estaciones INOCAR y Refinería los valores son similares.

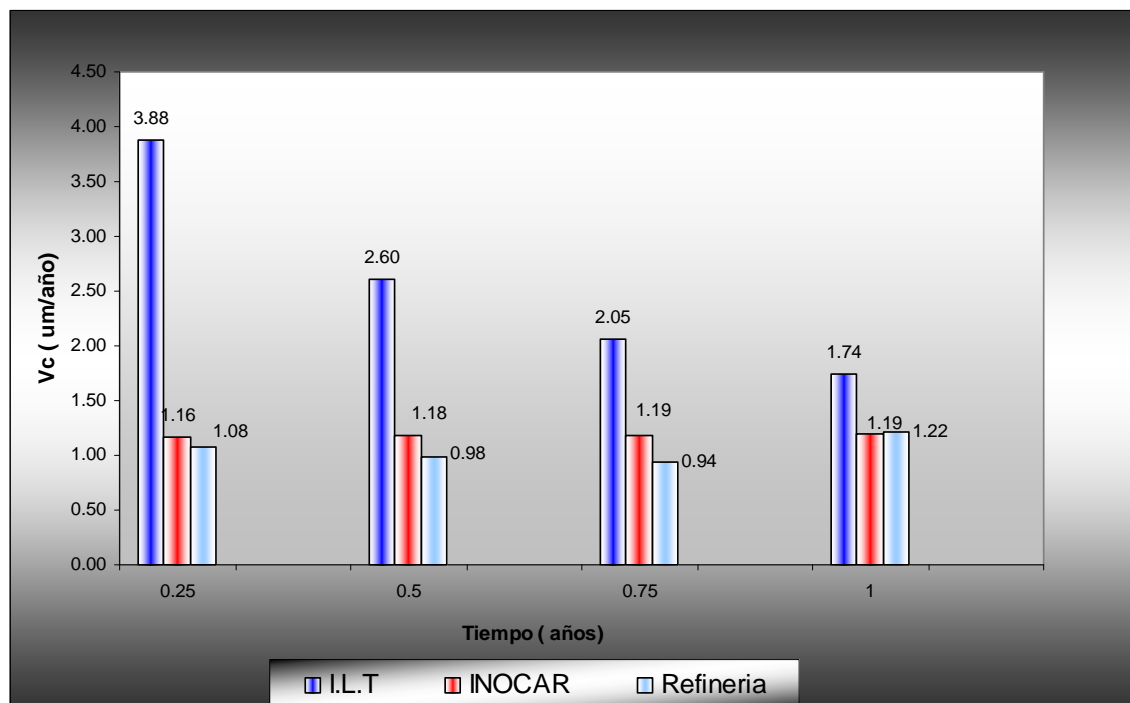


Figura 3.33.- Velocidad de corrosión del zinc (um/ año) vs. tiempo

La velocidad de corrosión del acero galvanizado es generalmente mayor que la del cobre y menor que la de otros metales para exposición a condiciones ambientales externas, los resultados obtenidos en este trabajo se discutirán con mayor profundidad en la sección 3.6. La Tabla 3.16 muestra rangos de valores de V_c para diversas condiciones ambientales:

Tabla 3.16.- Valores de V_c para el zinc (Leygraf, Graedel, 2001)

Atmósfera	V_c ($\mu\text{m}/\text{año}$)
Rural	0.2 - 3
Urbana	2 - 16
Industrial	2 - 16
Marina	0.5 - 8

Comparando con los valores obtenidos en el presente trabajo, observamos que para la estación ILT, la que está considerada como una atmósfera industrial, los valores obtenidos son menores a los que se muestran en la Tabla 3.16. Para la estación Refinería, los valores obtenidos en la presente investigación corresponden a una atmósfera rural-marina, mientras que para la estación INOCAR, los valores de V_c obtenidos corresponden a una atmósfera marina.

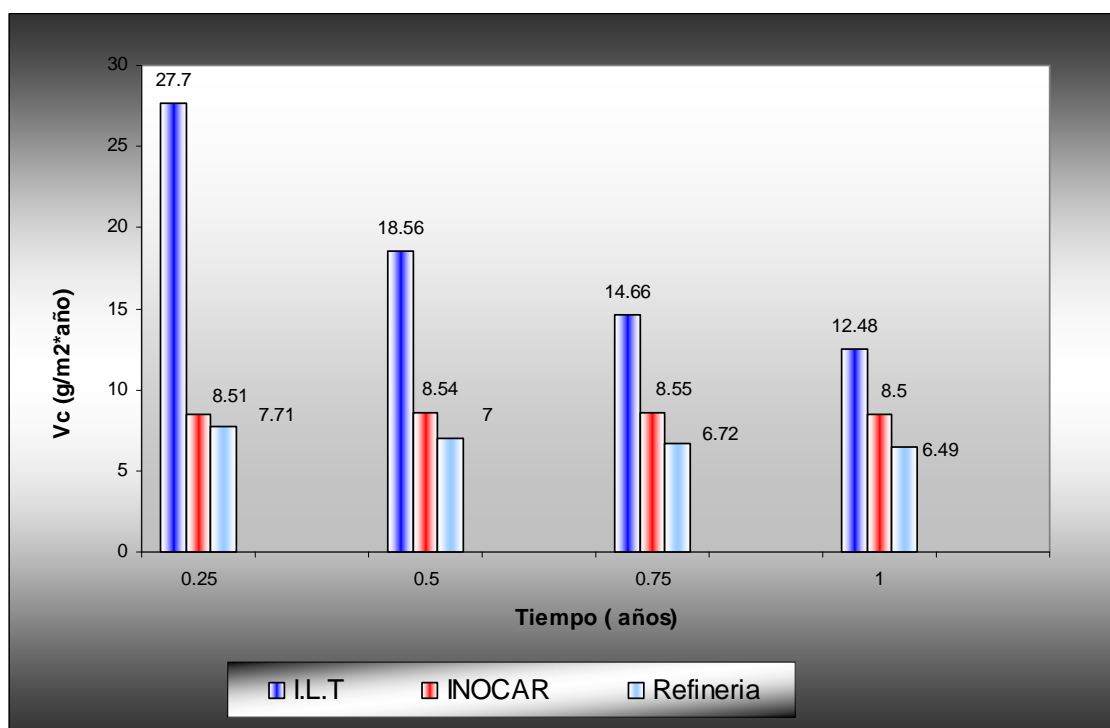


Figura 3.34.- Velocidad de corrosión del zinc (g/año m^2) vs. tiempo

3.5.4.-ANÁLISIS DE LA CINÉTICA DE CORROSIÓN DEL ZINC

Haciendo uso de los datos de corrosión (μm), se construyó un gráfico en función del tiempo para cada estación de ensayo (Figura 3.35, 3.36, 3.37). La Figura 3.35 muestra los valores de Corrosión vs. Tiempo de exposición para la estación ILT, se ha agregado la línea de tendencia para una función potencial del tipo $y = a \cdot x^n$, la misma que corresponde a la ecuación que caracteriza los procesos corrosivos $C = a \cdot t^n$. Se puede observar que en el primer año de exposición, todavía nos encontramos en la sección lineal de la curva. Este detalle está presente también en las estaciones INOCAR y Refinería, y hace que todavía no

sea posible realizar una discusión sobre los valores de las constantes a y n y su significado.

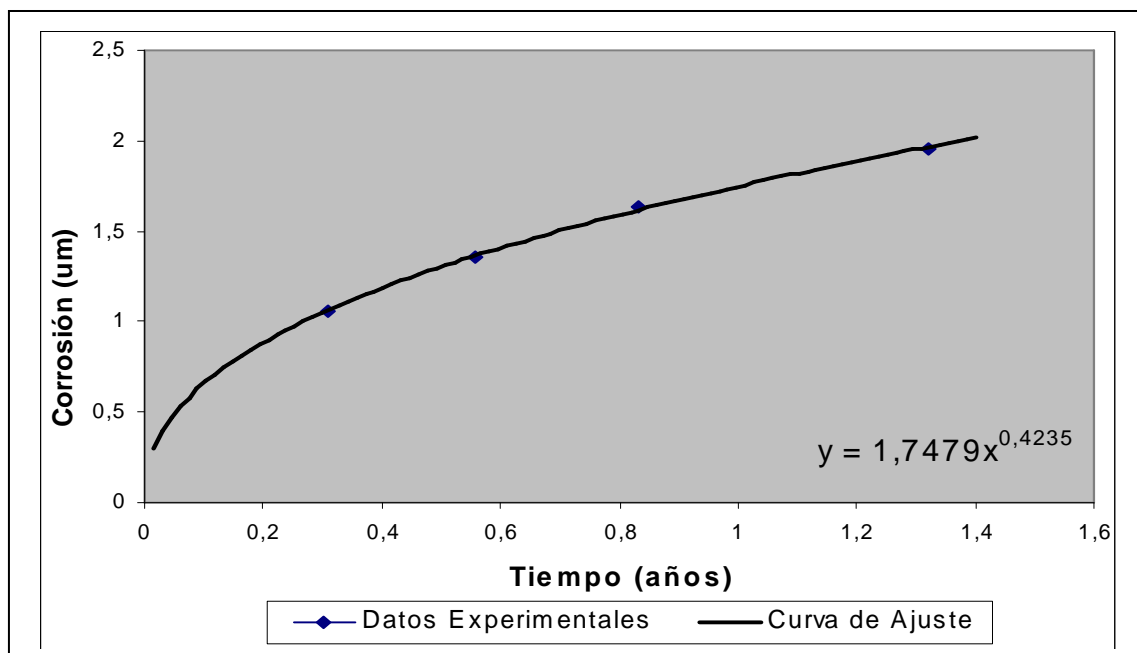


Figura 3.35: Corrosión del acero galvanizado (μm) vs. tiempo, (Estación ILT)

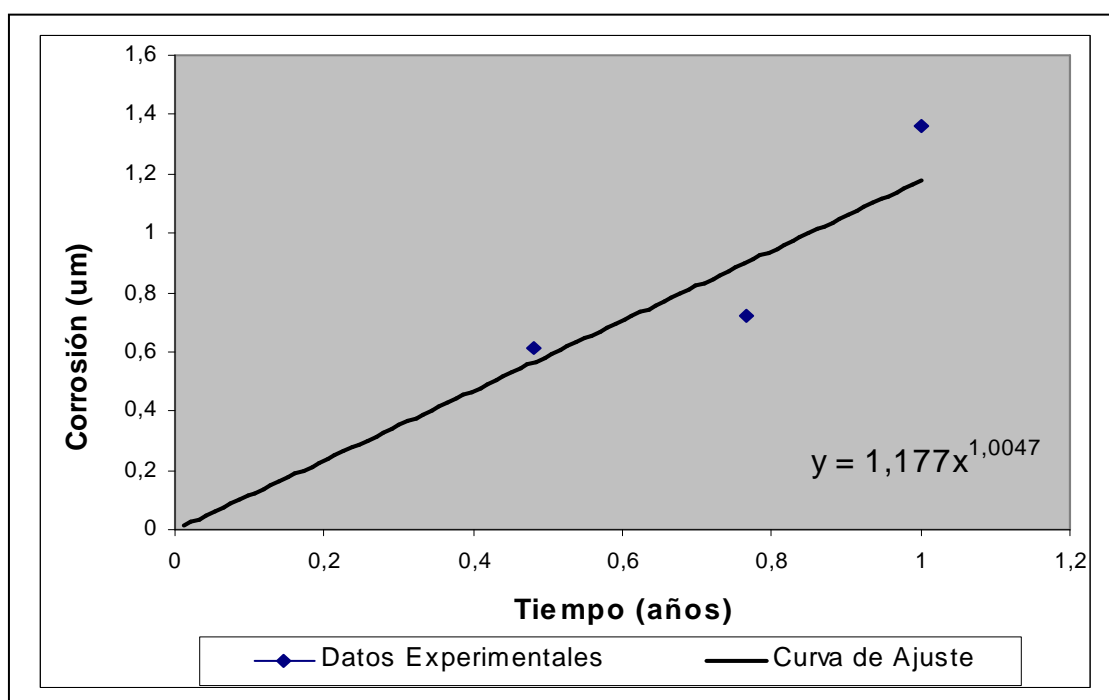


Figura 3.36: Corrosión del acero galvanizado (μm) vs. tiempo, (Estación INOCAR)

La Figura 3.36 tiene un coeficiente de determinación múltiple muy bajo, $R: 0.77$, debido en parte a que se construyó en base a solo tres puntos, por tal motivo no se puede hacer ningún tipo de análisis, pero se lo presenta como referencia. Este detalle se puede explicar por los pocos datos usados en la construcción de dicho gráfico, en vista del daño sufrido por las probetas correspondientes al primer retiro durante el lavado químico, en el que se desprendió la capa de zinc, quedando el sustrato de acero expuesto.

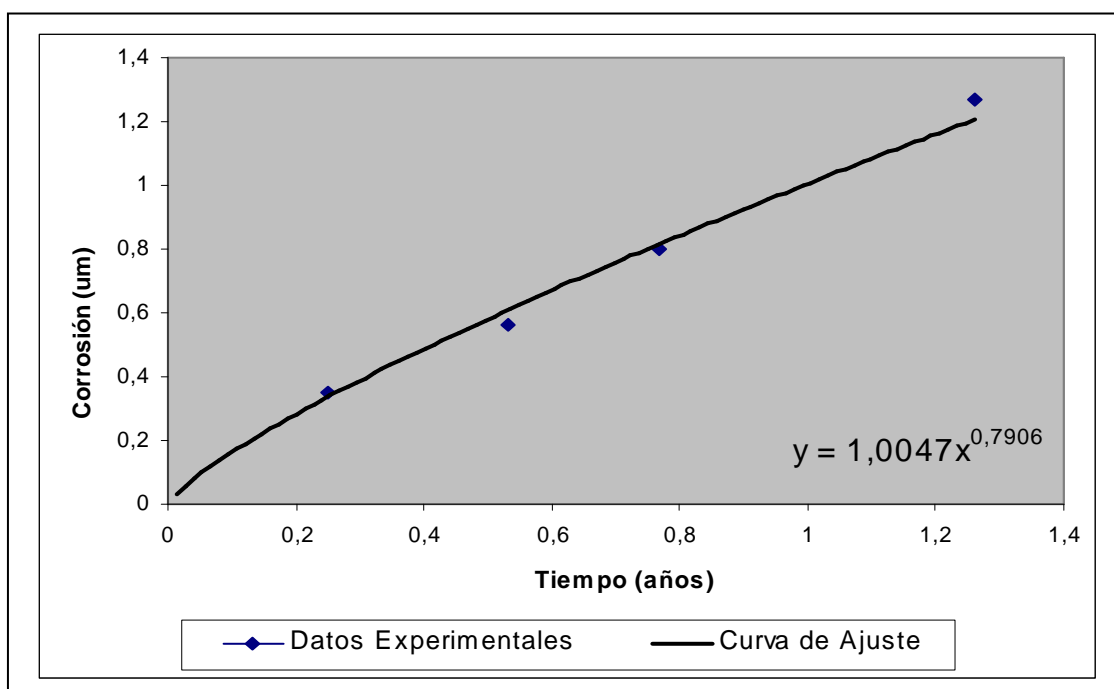


Figura 3.37: Corrosión del acero galvanizado (μm) vs. tiempo, (Estación Refinería)

Por el contrario, en las estaciones ILT y Refinería se obtuvieron un valores de R^2 : 0.99 y 0.98 respectivamente.

Como se había mencionado anteriormente, realizar una comparación de los valores obtenidos en el presente trabajo con los valores obtenidos en estudios anteriores es algo difícil, puesto que en estos trabajos se considera una clasificación de las atmósferas en función de la concentración de Cl^- y SO_2 , datos que por el momento no están disponibles. Pero se debe destacar que si se puede obtener una presunción de las concentraciones de contaminantes en la atmósfera de las estaciones de ensayo, al relacionar los resultados obtenidos con los de estudios anteriores.

El proyecto MYCAT (CYTED, 1998), muestra que para la estación ubicada en la ciudad de Guayaquil, con una concentración de Cl^- : $1.5 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{día}$ y para SO_2 : $3 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{día}$, se obtuvo un valor de V_c : $0.21 \text{ }\mu\text{m/año}$, de acuerdo a la Tabla 3.16 este valor de V_c correspondería a una atmósfera rural, cosa que no es cierta, siendo la estación Guayaquil una estación urbano-industrial, por tal motivo podemos inferir la intervención de otros factores en el proceso corrosivo, entre los que podemos citar: temperatura, vientos, radiación solar, etc.

Los valores de V_c obtenidos en el presente trabajo para las estaciones ILT y Refinería son de $1.74 \text{ }\mu\text{m/año}$ y $1.22 \text{ }\mu\text{m/año}$ respectivamente, estos valores también se encuentran por debajo del rango mostrado en la establecidos en la Tabla 3.16, pero se aproximan más que el resultado obtenido en Guayaquil.

El proyecto MYCAT obtuvo valores similares de V_c a los de la estación ILT en la estación Ciq, ubicada en Cuba, con un valor de concentración de Cl^- de $4.5 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{día}$ y para el SO_2 de $20 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{día}$, en tanto que para la estación Refinería los valores de V_c similares se alcanzaron con valores de concentración de Cl^- de $6.4 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{día}$ y para el SO_2 de $16.4 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{día}$, igualmente en Cuba. (CYTED, 1998).

En el caso de las atmósferas marinas, la estación INOCAR presentó un valor de V_c : $1.19 \text{ }\mu\text{m/año}$, el mismo que se encuentra dentro del rango estimado según la Tabla 3.16 para este tipo de atmósferas, mientras que el proyecto MYCAT presenta valores de V_c que van desde $0.69 \text{ }\mu\text{m/año}$ a $8 \text{ }\mu\text{m/año}$; valores similares de V_c se alcanzaron con concentraciones de Cl^- de $6 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{día}$ y para el SO_2 de $7.9 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{día}$.

De este análisis se puede estimar que la concentración de Cl^- y SO_2 promedio esperados para la ciudad de Esmeraldas sea de $6 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{día}$ y $15 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{día}$ respectivamente.

3.6.- ANALISIS COMPARATIVO

Usando todos los datos de corrosión recopilados, se ha realizado un estudio comparativo para cada material en las tres diferentes estaciones de ensayo de este estudio. También se ha incluido los datos recopilados en la estación Municipio, esto nos permitirá tener una idea global del comportamiento corrosivo

de la atmósfera de la ciudad de Esmeraldas. Adicionalmente se han incluido los datos de corrosión obtenidos en estudios anteriores en la ciudad de Quito, “Determinación de la Corrosividad Atmosférica en la ciudad de Quito, parte III”, Narváez Billy, 2005, donde se ha tomado un promedio de todas las estaciones de ensayo y los datos obtenidos en la estación de ensayo ubicada en la ciudad de Santo Domingo de los Colorados. (Salgado O, Navarrete E, 2007).

3.6.1.- ACERO AL CARBONO

Los datos obtenidos del proceso experimental se han ordenado en la Tabla 3.17:

Tabla 3.17.- Valores de velocidad de corrosión para 1 año de exposición

Estación	Vc (g/m² *año)
I.L.T.	351,42
INOCAR	300,49
Refinería	186,51
Municipio	297
Quito *	120,41
Sto. Domingo **	317,98

* (Narváez Billy, 2005)

** (Salgado O, Navarrete E, 2007)

En la Tabla 3.17 se observa que la mayor velocidad de corrosión del acero al carbono se presentó en la ciudad de Esmeraldas, específicamente en la estación Luís Tello seguida de la estación Sto. Domingo. Esto se puede observar más claramente en la Figura 3.38:

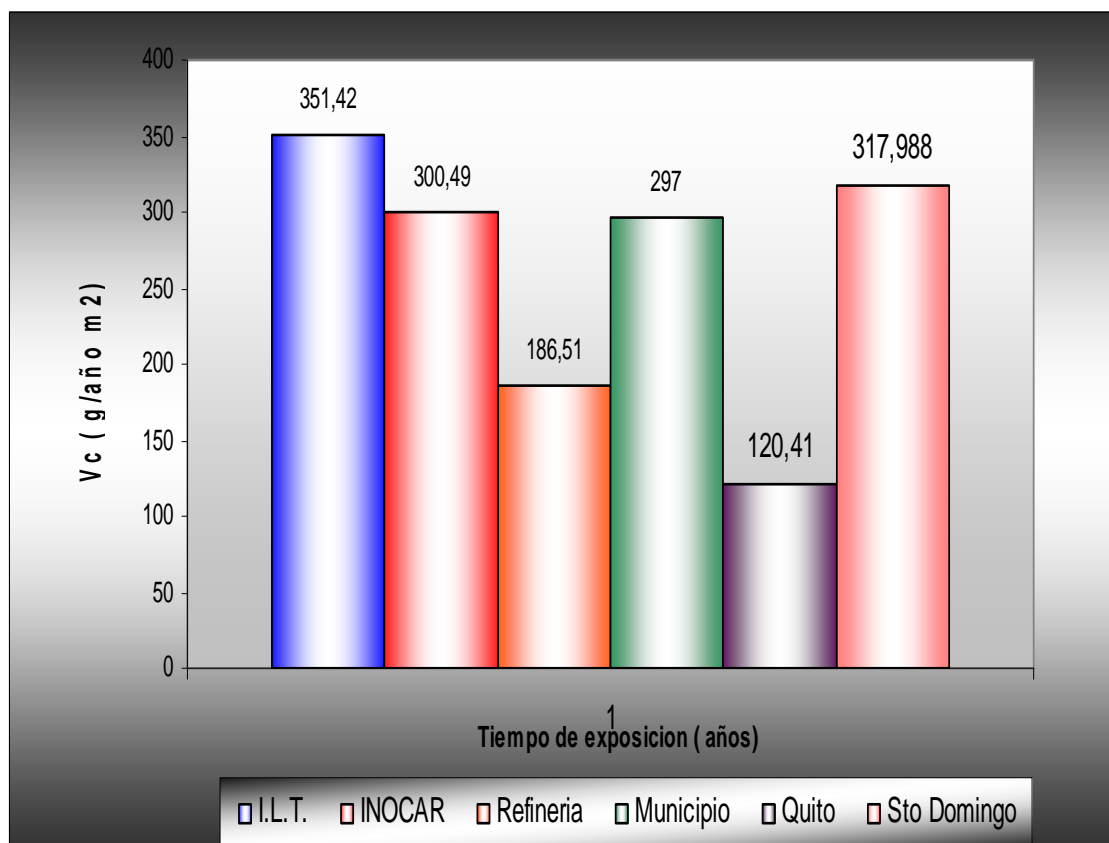


Figura 3.38.- Velocidad de corrosión de acero al carbono ($\text{g/m}^2 \text{ año}$) vs. Tiempo

Se puede observar también que la corrosión promedio presentada en la ciudad de Quito es aproximadamente del 42 % del promedio presentado en Esmeraldas. Claramente se observa una mayor velocidad de corrosión en la estación Luís Tello, esto se puede explicar por la alta concentración de contaminantes presentes en la atmósfera circundante, los mismos que se originan en la Refinería Estatal Esmeraldas y se depositan allí por la influencia de los vientos imperantes en la zona. La estación Municipio presenta valores similares, pero menores a los presentados en la estación Luís Tello, mientras que, la estación Refinería presenta valores de V_c mucho menores. La estación INOCAR presentó valores ligeramente más altos de V_c que las dos estaciones anteriores, Refinería y Municipio, esto se puede explicar debido a la alta concentración de iones Cl^- por su ubicación a orillas del mar. Cabe destacar el elevado valor que se presentó en la estación Santo Domingo, el mismo que se debe a los altos valores de TDH de la zona derivados de su ubicación geográfica, donde la pluviosidad es alta.

3.6.2.-ALUMINIO

Los datos obtenidos del proceso experimental se han ordenado en la Tabla 3.18:

Tabla 3.18.- Valores de corrosión de aluminio para 1 año de exposición

Estación	Vc (g/m²año)
I.L.T.	0,19
INOCAR	0,25
Refinería	0,25
Municipio	1,1
Quito*	1,27

* (Narváez Billy, 2005)

En la Tabla 3.18 se observa que la mayor velocidad de corrosión para el Aluminio en la ciudad de Esmeraldas se presentó en la estación Municipio de Esmeraldas, este valor corresponde a un estudio anterior (Salgado O, Navarrete E, 2007); de las estaciones que fueron estudiadas en el presente trabajo, la estación INOCAR presentó el mayor valor de Vc conjuntamente con la estación Refinería. También se observa que el valor promedio de Vc en la ciudad de Quito es similar al que se presentó en la ciudad de Esmeraldas. Este fenómeno se puede explicar por el ataque que sufre la superficie metálica del Aluminio es potenciado cuando sobre ella se deposita material particulado, producto de la contaminación ambiental que posee la atmósfera, de ahí que los mayores valores de Vc se hayan presentado en zonas urbanas con alto grado de contaminación por material particulado. (MYCAT, 1998).

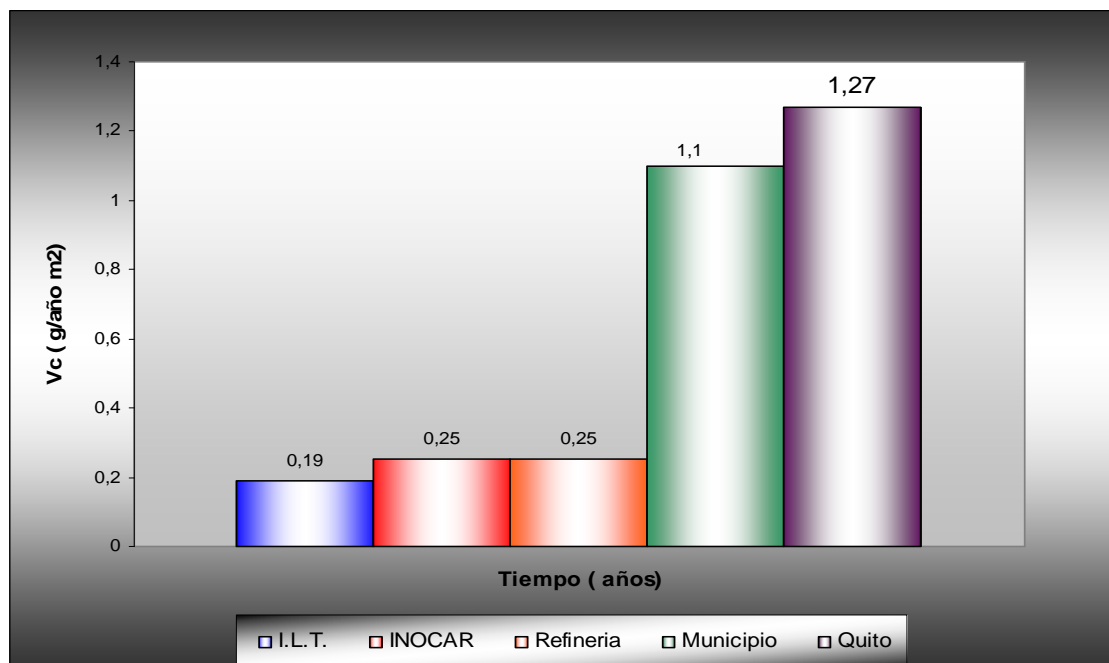


Figura 3.39.- Velocidad de corrosión de aluminio ($\text{g/m}^2 \text{ año}$) vs. Tiempo

Para este material no se disponen datos de la estación Sto. Domingo, también es claramente visible que los valores de V_c para Quito y para la estación Municipio son mucho más altos que para las otras tres estaciones de la ciudad de Esmeraldas.

3.6.3.-ACERO GALVANIZADO

Los datos experimentales se han ordenado en la siguiente Tabla:

Tabla 3.19.- Valores de Corrosión de acero galvanizado para 1 año de exposición

Estación	Vc ($\text{g/m}^2 \text{ año}$)
I.L.T.	12,48
INOCAR	8,5
Refinería	6,49
Municipio	5,66
Quito*	3,29
Sto. Domingo**	26,3

- * (Narvárez Billy, 2005),
- ** (Salgado O, Navarrete E, 2007)

En la Tabla 3.19 se observa que en la ciudad de Esmeraldas el mayor valor de velocidad de corrosión para el acero Galvanizado se presentó en la estación Luís Tello. Como se mencionó anteriormente para el caso del acero al carbono, la alta concentración de contaminantes en la atmósfera de esta estación deriva en los altos valores de Vc. Hay que destacar el alto valor de Vc presentado en la estación Sto. Domingo, debido a los altos valores de TDH, como ya se explicó en la sección 1.2.9.

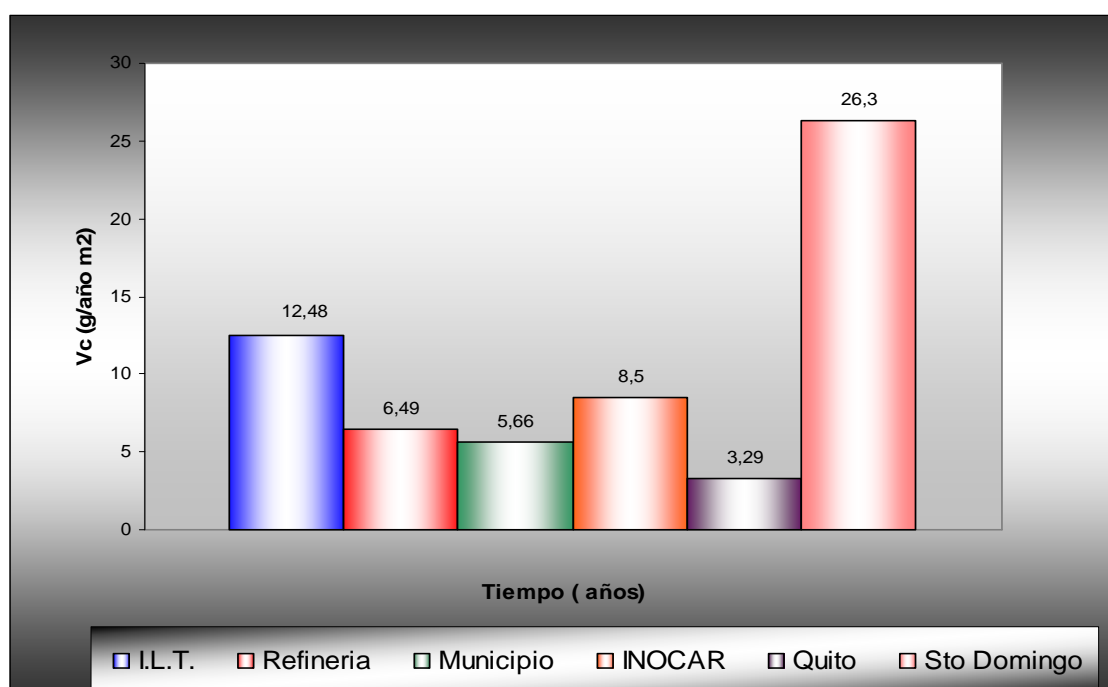


Figura 3.40.- Velocidad de corrosión de acero galvanizado ($\text{g/m}^2 \text{ año}$) vs. Tiempo

Los valores de Vc presentados en la ciudad de Quito son muy inferiores a los presentados tanto en Esmeraldas como en Sto. Domingo debido a que la concentración de contaminantes presente en la atmósfera quiteña no causa mucho efecto sobre el recubrimiento de zinc del acero galvanizado.

3.6.4.- COBRE

Los datos obtenidos del proceso experimental se han ordenado en la Tabla 3.20:

Tabla 3.20.- Valores de corrosión de cobre para 1 año de exposición

Estación	Vc (g/m ² año)
I.L.T.	12,4
INOCAR	43,62
Refinería	14,85
Municipio	43,5
Quito*	7,16
Sto. Domingo**	10,07

* (Narvález Billy, 2005)

** (Salgado O, Navarrete E, 2007)

En la Tabla 3.20 se observa que en la ciudad de Esmeraldas los mayores valores de velocidad de corrosión para el cobre se presentaron en la estación INOCAR y Municipio, las mismas que tienen influencia marina por su situación geográfica.

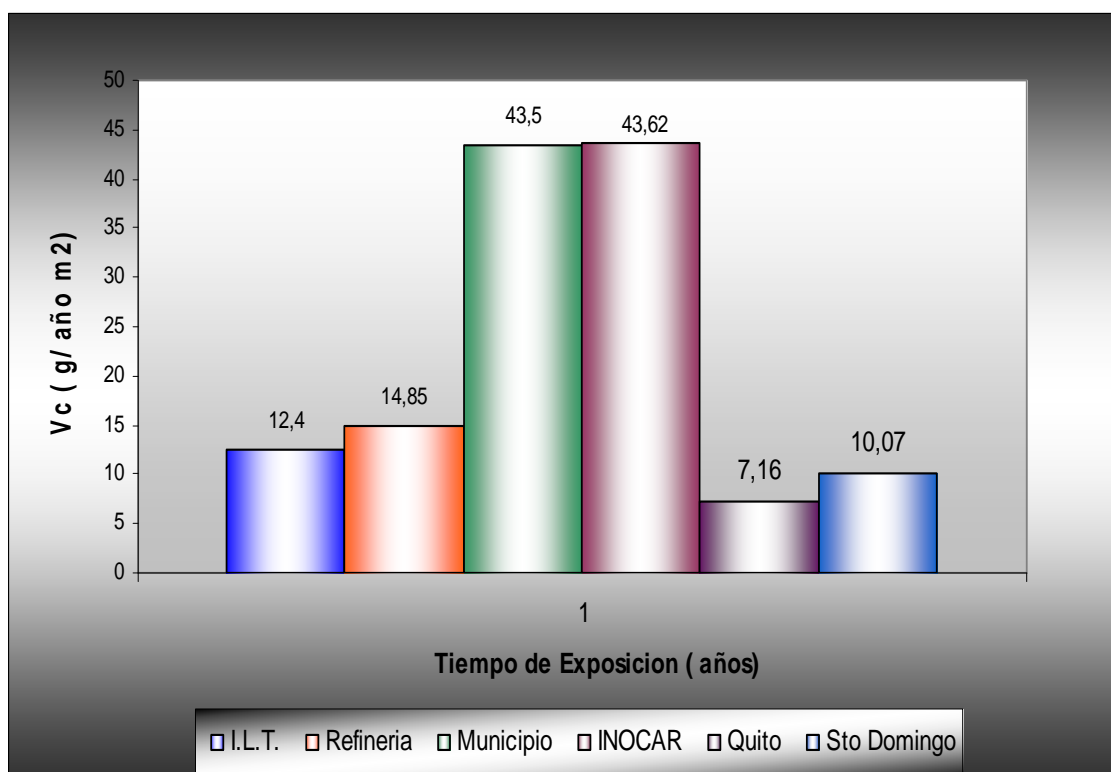


Figura 3.41.- Velocidad de corrosión de cobre (g/m² año) vs. Tiempo

En las otras estaciones, ILT, Refinería y Sto. Domingo los valores de Vc son aproximadamente un 60% menos; mientras tanto que el valor de Vc para Quito es aun mucho menor. En base a estos resultados, se puede inferir una influencia marcada de los iones cloruro en el proceso corrosivo del cobre.

3.7.-CLACIFICACION DE LAS ATMOSFERAS SEGÚN LA NORMA ISO 9223

Como se explicó en la sección 2.2.5, la norma ISO 9223 clasifica la agresividad corrosiva de una atmósfera de acuerdo con diversos criterios. Para este proyecto de investigación es de fundamental importancia la clasificación de la agresividad atmosférica de acuerdo con la penetración por corrosión (μm) y con la velocidad de corrosión ($\mu\text{m}/\text{año}$).

La Tabla 3.21 se construyó a partir de los valores de Vc ($\mu\text{m}/\text{año}$) y muestra la clasificación y categorización de las atmósferas de las estaciones de ensayo en función de la Norma ISO 9223,2003.

Tabla 3.21.- Categorización de las atmósferas, Norma ISO 9223

ESTACIÓN	MATERIAL	ECUACIÓN	Vc ($\mu\text{m}/\text{año}$)	CATEGORÍA	CORROSIVIDAD
Luis Tello	Acero	$C = 44,71 * t^{0,47}$	44,71	C3	MEDIA
	Cobre	$C = 1,39 * t^{0,46}$	1,39	C4	ALTA
	Aluminio	$C = 0,07 * t^{1,47}$	0,07	C2	BAJA
	Zinc	$C = 1,75 * t^{0,42}$	1,75	C3	MEDIA
INOCAR	Acero	$C = 38,23 * t^{0,69}$	38,23	C3	MEDIA
	Cobre	$C = 4,89 * t^{0,73}$	4,89	C5	MUY ALTA
	Aluminio	$C = 0,09 * t^{0,73}$	0,09	C2	BAJA
	Zinc	$C = 1,20 * t^1$	1,19	C3	MEDIA
Refinería	Acero	$C = 23,73 * t^{0,88}$	23,73	C2	BAJA
	Cobre	$C = 1,64 * t^{0,98}$	1,64	C4	ALTA
	Aluminio	$C = 0,09 * t^{1,69}$	0,09	C2	BAJA
	Zinc	$C = 0,91 * t^{0,87}$	0,91	C3	MEDIA

Como podemos ver, según la Norma ISO 9223, para el acero al carbono se obtienen valores de corrosión **media**, para el aluminio valores de corrosión **baja**, para el acero galvanizado, es decir zinc, los valores de corrosión la categorizan en **media**. El cobre, es el material que presenta los valores de corrosión más elevados, resultando de esto una categorización de **alta**, incluso para la estación INOCAR, una categoría de **muy alta**.

3.8.- COMPARACION CON ESTUDIOS ANTERIORES

No se tienen valores de estudios anteriores en la ciudad de Esmeraldas, específicamente en las zonas donde están instaladas las estaciones de ensayo de donde se ha obtenido los datos de campo para desarrollar las ecuaciones de corrosión, Tan solo se dispone de un dato general de corrosión de la ciudad. También se dispone de datos de estudios en otras ciudades con los que podemos comparar los valores obtenidos en este trabajo de investigación. Entre estos estudios tenemos al proyecto MICAT, desarrollado dentro del proyecto CYTED, el mismo que ha obtenido valores de velocidad de corrosión para las ciudades de Guayaquil, Riobamba, Salinas, Esmeraldas y San Cristóbal, estos valores se pueden observar en la Tabla 3.22.

Tabla 3.22.- Velocidades de corrosión según el proyecto MICAT

Ciudad	Cobre ($\mu\text{m}/\text{año}$)	Aluminio ($\mu\text{m}/\text{año}$)
Guayaquil	0.71	0.03
Riobamba	0.43	---
Salinas	2.33	1.12
Esmeraldas	2.61	1.01
San Cristóbal	1.52	0.52

Para el cobre en la estación INOCAR el valor de V_c fue de $5.21 \mu\text{m}/\text{año}$, ILT de $1.39 \mu\text{m}/\text{año}$ y en la Refinería de $1.64 \mu\text{m}/\text{año}$. Se puede observar que en la estación INOCAR se presentó el valor de V_c más alto, casi del 100% mayor,

mientras que las estaciones ILT y refinería presentan valores dentro los rangos establecidos en la Tabla 3.22 para ciudades costeras. Para el aluminio en la estación INOCAR el valor de V_c fue de $0.09 \mu\text{m/año}$, ILT de $0.07 \mu\text{m/año}$ y en la Refinería de $0.07 \mu\text{m/año}$. Se puede observar que estos valores son similares a los obtenidos en la ciudad de Guayaquil, mientras que son mucho menores que los obtenidos en las otras ciudades. No se tienen los suficientes argumentos para discutir esta diferencia de valores de V_c .

Otros proyectos desarrollados son: "Determinación de la Corrosividad Atmosférica en la ciudad de Quito, parte III", Narváez Billy, 2005. Los valores encontrados para la Ciudad de Quito son de $0.76 \mu\text{m/año}$ para el cobre, y de $0.47 \mu\text{m/año}$ para el aluminio; estos valores son menores que los encontrados en las ciudades con atmósferas marinas de Salinas, Esmeraldas y San Cristóbal, pero mayores que los correspondientes a Guayaquil y Riobamba.

3.9.- CALCULO DEL TIEMPO DE VIDA UTIL DEL RECUBRIMIENTO METALICO DE LOS MATERIALES

3.9.1 CALCULO DEL TIEMPO DE VIDA UTIL DEL RECUBRIMIENTO DEL ACERO GALVANIZADO

Alrededor del 40% de la producción mundial de zinc se consume en procesos de galvanizado. La temperatura normal del baño de zinc va desde los 440°C a los 470°C y al sacar el material metálico del baño, una capa delgada de zinc queda adherida a la superficie metálica con un espesor que generalmente alcanza los $20 \mu\text{m}$. (CYTED, parte II, 1998)

Haciendo uso de este dato y de la velocidad de corrosión, podemos calcular un aproximado de la vida útil del material para cada estación de ensayo como muestra la ecuación 3.2 (Elsevier C, 1990)

$$t_{vR} = \frac{\Delta e}{V_c} \quad [3.2]$$

Donde:

Δe : Variación del espesor

V_c : velocidad de corrosión

A partir de esta ecuación y tomando como espesor medio de la capa de zinc 20 μm , se ha calculado el tiempo de vida útil para el acero galvanizado en cada una de las estaciones de ensayo como se muestra en la Tabla 3.23

Tabla 3.23.- Tiempo de vida del recubrimiento del acero galvanizado

Estación	V_c (um/año)	Espesor(um)	t_{vR} (años)
ILT	1,74	20	11,49
INOCAR	1,19		16,80
Refinería	1,22		16,39

Haciendo uso de material bibliográfico, como el que se muestra en el libro Material Selector de Elsevier C, para las condiciones de la ciudad de Esmeraldas el recubrimiento de Zinc debe recibir mantenimiento a los 4 años de exposición.

3.10.- SISTEMAS ANTICORROSIVOS SUGERIDOS DEACUERDO A LA ATMOSFERA DE SERVICIO

Los materiales de los sistemas de protección anticorrosiva pueden ser metálicos, no metálicos, orgánicos e inorgánicos. Su variedad, así como sus métodos de obtención y aplicación, es virtualmente ilimitada, además su vida de servicio depende de las propiedades anticorrosivas propias del material del recubrimiento y del grado de agresividad del medio.

(CYTED, 1998).

3.10.1.- Recubrimientos metálicos

Las razones principales para usar un recubrimiento metálico como sistema de protección anticorrosiva es mejorar su resistencia a las condiciones ambientales, suministrar resistencia a la oxidación a altas temperaturas y suministrar una base para la aplicación de recubrimientos de pintura; existe una gran cantidad de recubrimientos metálicos, no solo en función del elemento metálico que lo constituye sino también del proceso de obtención del recubrimiento, entre estos tenemos:

- Depósito electrolítico
- Inmersión en baño de metal fundido.
- Pulverización del metal fundido
- Chapado.
- Recubrimiento mecánico
- Recubrimiento de difusión
- Depósito físico en fase vapor
- Depósito químico en fase vapor.

De igual manera, los metales de recubrimiento pueden ser muy variados, pero por razones de costos se reducen a unos cuantos como el plomo, zinc, aluminio, cobre, cadmio, magnesio, cromo, estaño; siendo los más utilizados los de aluminio y zinc. (CYTED, 1998)

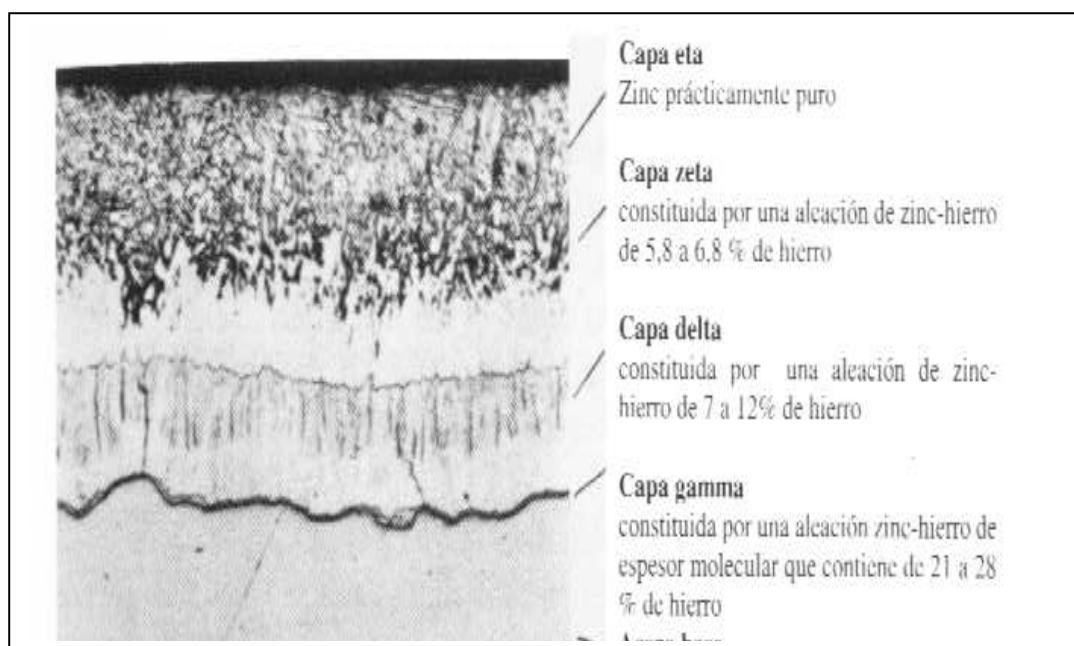


Figura 3.42.- Esquema de una sección de recubrimiento metálico típico (CYTED, Parte II, 1998)

3.10.2.- Recubrimientos no-metálicos

Muchos metales tienen la tendencia a formar películas de óxidos relativamente estables sobre su superficie; esta situación es la manifestación de la pasividad, que en términos generales puede definirse como la capacidad de un metal de adsorber químicamente inhibidores de corrosión. Estos inhibidores pueden ser oxígeno, óxidos metálicos, productos de corrosión, adsorbentes orgánicos, etc. Entre estos procesos tenemos el anodizado, cromatado, fosfatado. (CYTED, 1998)

3.10.3.- Recubrimientos orgánicos

Como recubrimientos orgánicos anticorrosivos se dispone fundamentalmente de las pinturas, las cuales por su gran variedad poseen diferentes características y resistencias, sencilla aplicación, costo bajo y posibilidad de aplicación en conjunto con recubrimientos metálicos inducen al uso de este tipo de recubrimiento. (CYTED, 1998)

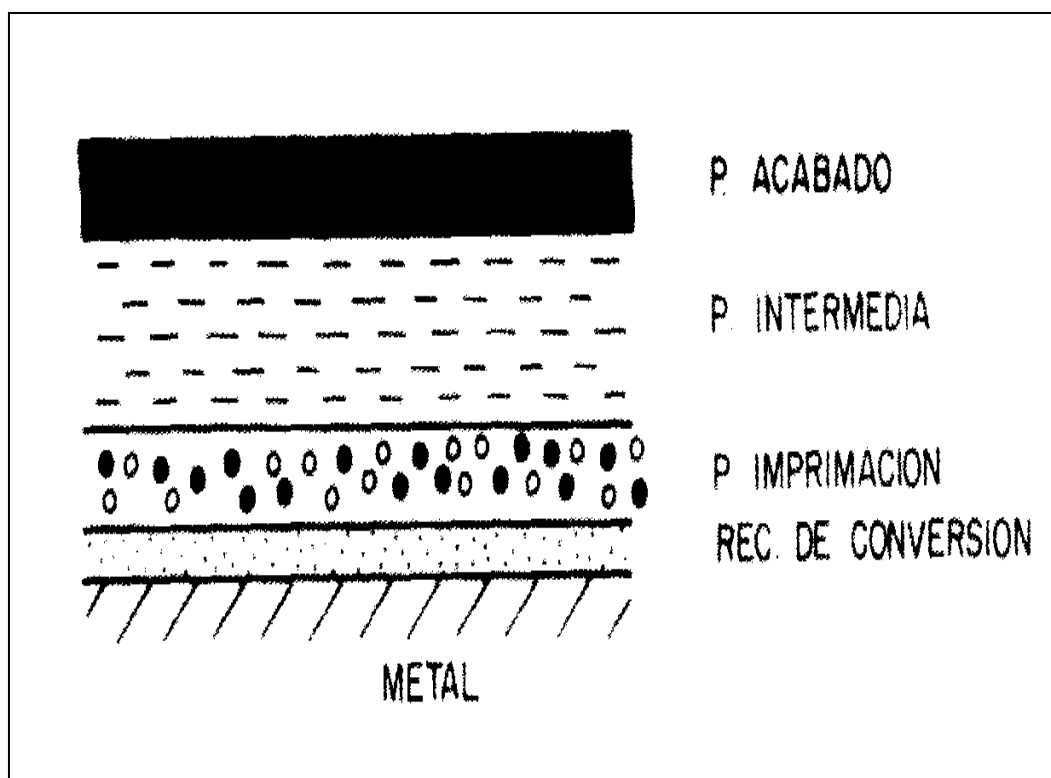


Figura 3.43.- Esquema de un sistema de pintura. (CYTED, Parte II, 1998)

Las pinturas están normalmente compuestas por tres componentes: resina, pigmentos y aditivos y solventes. Sin embargo, no todas las pinturas tienen estos tres componentes, existen pinturas libres de solventes “solvent-less” en respuesta a las restricciones medioambientales del uso de solventes. Estas pinturas permiten alcanzar espesores de recubrimiento anticorrosivo de alrededor de 13 mm., espesor que no se podría alcanzar con pinturas en base solvente, porque el alto espesor impediría la evaporación del solvente. Las pinturas tienen la siguiente secuencia de aplicación:

3.10.3.1.-Primers.- Los primers son por mucho la capa más importante en la protección de un sustrato metálico, contiene inhibidores que protegen al sustrato metálico del ataque de óxidos y sales, entre estos inhibidores tenemos a los pigmentos de plomo y cromatos, pero se están dejando de usar debido a las regulaciones ambientales. El uso de primers con alto porcentaje de zinc metálico, es uno de los más grandes desarrollos en el campo de los primers en los últimos

30 años; este zinc se encuentra como agregado en recubrimientos orgánicos e inorgánicos y es sumamente eficaz en la prevención de la corrosión. (CYTED, 1998).

3.10.3.2.-Topcoats.- Se usan para recubrir el primer y dar apariencia y color al sustrato metálico; para esto estos recubrimientos deben ser capaces de:

- Evitar el paso de la humedad, iones, solventes que produzcan o estimulen procesos corrosivos.
- Resistencia al daño mecánico.
- Retención de color y brillo.

Los principales tipos de resinas usadas en los recubrimientos topcoat son:

3.10.3.2.1.- Resinas alquídicas.- Son las más comunes y versátiles, pero raramente se usan en condiciones marinas severas por su pobre rendimiento sobre sustrato de acero. Este pobre rendimiento se debe a que son pinturas en base aceite, el mismo que es saponificado por los iones OH^- liberados durante el proceso corrosivo, resultando en la falla del recubrimiento.

3.10.3.2.2.- Resinas vinílicas.- Son producto de la polimerización del PVC (Policloruro de Vinilo) y del PVA (Polivinil Acetato). Son pinturas en base solvente que producen recubrimientos con espesores homogéneos sobre el sustrato, son de fácil aplicación con brocha, rodillo o con spray y tienen excelente adherencia a la interface de los recubrimientos, no se oxidan con el tiempo, son inertes a los bases, ácidos, agua y alcoholes pero son sensibles a los aceites crudos; secan rápidos y pueden ser repintados en pocos minutos dependiendo del solvente usado, el espesor de aplicación generalmente alcanza los 50 μm .

Fueron ampliamente usados sobre barcos y plataformas off-shore, pero han cedido su espacio a los recubrimientos epóxidos debido a que el espesor de película es muy delgado y no tiene resistencia mecánica, además que no es eficiente sobre superficies ásperas.

3.10.3.2.3.-Caucho clorinado.- Están basados en el caucho natural que ha reaccionado con el cloro para dar una resina de gran resina de alta calidad

soluble en varios solventes. El caucho clorinado ha sido usado durante años en pinturas industriales por su baja permeabilidad a la humedad, resistencia mecánica, resistencia a la degradación UV y facilidad de aplicación. Sus principales usos han sido en barcos, contenedores, ferrocarriles y pinturas de tráfico en los caminos. Su uso en barcos se debe a su facilidad de aplicación y reparación, tolerancia a la pobre preparación de la superficie y resistencia a la abrasión.

3.10.3.2.4.- Resinas epóxicas.- La combinación de una excelente adherencia, que incluso permite aplicación bajo el agua con una gran resistencia al impacto y a la abrasión, formación de altos espesores (6.4 mm en una superficie mojada vertical), relativo bajo costo, excelente resistencia química, hacen de los recubrimientos epóxicos los caballos de batalla de los recubrimientos marinos modernos, permitiendo tiempos de servicio que van desde los 7 hasta los 12 años. Muchas de sus propiedades dependen del peso molecular de la resina y del curado de la misma.

Una vez expuestos los criterios sobre sistemas anticorrosivos, se puede sugerir el sistema de protección más adecuado para un sustrato metálico, de acuerdo con la categoría atmosférica ISO 9223 del lugar de servicio. Todo esto fundamentado en las experiencias y resultados obtenidos en el proyecto MYCAT para atmósferas marino-industriales. (CYTED, 1998).

3.10.4.- Sistema sugerido para atmósferas categoría C1-C2

Se recomienda el uso de sistemas de pintura alquídico / alquídico o epóxi/poliuretano. Los dos sistemas antes mencionados presentan una buena resistencia a la radiación solar y retención de brillo, además buenas propiedades de resistencia mecánica (dureza, abrasión, impacto, etc.) La selección de uno u otro de los sistemas se deberá hacer en función de las condiciones de servicio del equipo a ser pintado, además se debe considerar la relación costo-beneficio. (CYTED, parte II, 1998).

3.10.5.- Sistema sugerido para atmósferas categoría C3-C4

Al igual que para las atmósferas rurales, para atmósferas de categoría C3 y C4 se recomienda sistemas de pintura alquídico/alquídico y epóxi/poliuretano alifático; la diferencia básica está en el espesor del revestimiento de acuerdo a la agresividad de la atmósfera. (CYTED, parte II, 1998).

3.10.6.- Sistema sugerido para atmósferas categoría C4-C5

Como se explicó anteriormente, en condiciones atmosféricas agresivas los sistemas anticorrosivos más eficientes son aquellos que son ricos en zinc. El rendimiento del sistema anticorrosivo es función del espesor total del mismo y de las características y servicio de las estructuras a ser protegidas. (CYTED, parte II, 1998).

4.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- La velocidad de corrosión V_c ($\text{g}/\text{m}^2\text{año}$) para el acero al carbono en Esmeraldas fue mayor en la estación Luís Tello, seguida de la estación Municipio, INOCAR y Refinería. Comparando con los valores obtenidos en estudios anteriores en la ciudad de Quito los valores son aproximadamente 300% más altos que el promedio de las 8 estaciones de ensayo instaladas en esta ciudad, mientras que la estación Santo Domingo presentó valores altos, comparables con los obtenidos en Esmeraldas.
- A pesar de que, a primera vista, se podría pensar en que se presentaría una mayor corrosión en la estación Refinería, los datos de campo demuestran que esto no es así. La influencia de los vientos imperantes en la zona hacen que todos los gases contaminantes, producto de los procesos de combustión que se desarrollan en las instalaciones de la Refinería se trasladen hacia las inmediaciones del Instituto Luis Tello, produciendo un mayor valor de corrosión y de velocidad corrosión para el Acero al Carbono, Aluminio y Acero Galvanizado.
- No se pudo hacer un análisis de los valores obtenidos para las constantes a y n , debido a que, como se mostró en las gráficas corrosión vs tiempo, en un tiempo de exposición de un año la corrosión está en la sección lineal de la curva construida a partir de la ecuación de corrosión.
- Para el caso del Cobre, se observó que se tiene una alta corrosión, específicamente en la estación de ensayo ubicada en la estación meteorológica del INOCAR, dentro de las instalaciones de la Capitanía de Puerto de la ciudad de Esmeraldas, a orillas mismo del mar. Este valor alto, nos muestra la sensibilidad del cobre a los iones Cl^- . La clasificación según la Norma ISO 9223 dio una categorización de muy alta, para las otras dos estaciones la categoría es alta.
- Para la estación Municipio se presentó un valor de V_c muy alto (37.63 g/año m^2), comparable con el valor obtenido en la estación INOCAR, esta estación se encuentra a poca distancia del mar y en la azotea del edificio del Municipio de Esmeraldas, donde el efecto del viento que arrastra los iones cloruro es mal

alta, además de la alta concentración de gases contaminantes por el alto tráfico de autos en el sector.

- El valor de V_c para el cobre obtenido para la ciudad de Quito es menor que los obtenidos en la ciudad de Esmeraldas, la estación Santo Domingo presenta valores similares a la estación Luís Tello y Refinería.
- La incidencia de la atmósfera corrosiva sobre las probetas de Aluminio, en las tres estaciones, fue mínima. La categoría según la Norma ISO 9223 es baja, los valores de n (> 0.75) dan la idea de la no formación de capas de productos de corrosión sobre la superficie metálica, característica que se observó fácilmente en las probetas hasta ahora analizadas.
- La estación Municipio presentó un valor de corrosión del aluminio mucho más alto que las otras estaciones. Como mencionamos anteriormente, este fenómeno es explicable por la peculiar ubicación de la estación. El valor obtenido en la ciudad de Quito como el valor obtenido en la estación Santo Domingo son similares al obtenido en la estación Municipio, esto nos hace pensar que la corrosión sobre el Aluminio está influenciada por el smog debido a los gases de escape de los autos, ya que estas estaciones se encuentran en zonas urbanas.
- En el caso del Acero Galvanizado la corrosión tuvo una categoría media en todas las estaciones dentro de la ciudad de Esmeraldas, la mayor afectación se observó en la estación del Instituto Luís Tello, seguida de la estación INOCAR y la estación Refinería.
- El valor de V_c del zinc más alto es el que se obtuvo en la estación Luís Tello, el mismo que es tan solo la mitad del obtenido en la estación Santo Domingo. Se presume que este fenómeno se debe a la mayor H_R y TDH de la zona la zona de Santo Domingo.
- Generalizando, para el caso de todos los metales estudiados, la atmósfera más corrosiva fue la del Instituto Luis Tello, debido quizá a que está ubicada en una zona industrial. En segundo lugar tenemos la estación INOCAR, la misma que tiene influencia directa del mar. En tercer lugar está la estación

ubicada dentro de las instalaciones de la Refinería, la misma que no presenta valores altos de corrosión debido quizá a que la influencia del viento arrastra los contaminantes aliviando la carga corrosiva del lugar.

- Los datos experimentales obtenidos para los cuatro materiales en las tres estaciones de ensayo presentan un buen ajuste al modelo exponencial de las ecuaciones que caracterizan el proceso corrosivo.

4.2.- RECOMENDACIONES

Luego del análisis de los resultados del presente trabajo de investigación se proponen las siguientes recomendaciones:

- Para tener datos con un mayor grado de exactitud, se deben hacer las regresiones lineales con datos de corrosión a mayor tiempo de exposición
- Durante los lavados químicos se debe tener sumo cuidado en los tiempos de lavado, temperatura y concentración del baño para evitar pérdidas de material que no se deban al proceso corrosivo, especialmente en el Acero Galvanizado, donde se pueden producir pérdidas de la capa de Zinc en el proceso de lavado.
- Durante el lavado de preparación, previo a la instalación de las probetas en las estaciones de ensayo, se debe verificar el completo secado del agua sobre las mismas, para garantizar que algún proceso corrosivo no ha empezado antes de la exposición a las condiciones ambientales.
- El ajuste de las probetas al mueble haciendo uso de los pernos plásticos debe ser lo menos invasivo posible para tener un proceso corrosivo uniforme sobre toda la superficie, y evitar interferencias debidas al flujo de agua producido por la cabezas de los pernos.
- Para estudios posteriores, la ecuación de corrosión se debe formular en función de las demás variables atmosféricas como el TDH, precipitación pluvial, concentración de SO_2^- y Cl^- .
- Para poder realizar comparación de los resultados obtenidos con otros estudios ya realizados, se debe tener a disposición los datos de concentración de contaminantes presentes en la atmósfera.

- Realizar estudios de los productos de corrosión para determinar la composición de los mismos.

BIBLIOGRAFÍA

- Askeland D. R., 2007, "*La Ciencia e Ingeniería de los Materiales*", Grupo Editorial Iberoamericano: México, pp (711).
- ASTM G1-90, "*Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*".
- ASTM G 50-76 (2003), "*Standard Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Test on Metals*".
- ASTM International Handbook Committee, Vol 13, 1987 "*ASTM Handbook*"(pp16-122,174-311,1220-1285,1427-1507,1507-1663,1981-2019).
- Babor J., Ibarz J, 1959, "*Química General Moderna*", Marín Ediciones, Sexta Edición. (pp 479-513).
- Breck W, Brown R.1986, "*Química para la Ciencia e Ingeniería*", 1º Edición, 1986, Mc. Graw Hill.(pp 117, 702,703).
- Cazco P, Recalde P., 2002, "*Determinación de la Corrosividad Atmosférica en la Ciudad de Quito*", EPN, Quito, Ecuador. (pp 1-53).
- CYTED., 1998, "*Corrosión y Protección de Metales en las Atmósferas de Iberoamérica*", FMJ International Publications Ltd Redhill. (pp 10-120, 220-400 501,910).
- CYTED, Parte II, 1998, "*Protección Anticorrosiva de Metales en las Atmósferas de Iberoamérica*", FMJ International Publications Ltd Redhill.(pp 60-115, 317-327, 581-632).
- Elsevier C, "*Material Selector*", Norman Waterman and Michael Ashby, Volumen 1. (pp 224-229).

- Flinn Richard, Trojan Paul, 1991, *Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones*, 3ª Edición, Mc. Graw Hill. (515,526,540).
- Fogler Scott, 2001, "*Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas*" Tercera Edición, Pearson Education. (pp 68-71).
- ISO 9223, 1992, "*Corrosion of Metals and alloys. Classification of Corrosivity Atmospheres*", ISO. Geneve, Switzerland.
- ISO 9224, 1992, "*Corrosion of metals and alloys-Guiding values for the corrosivity categories of atmospheres*", ISO. Geneve, Switzerland.
- ISO 9226, 1992, "*Corrosion of metals and alloy. Corrosivity of atmospheres. Methods of determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity*", ISO. Geneve, Switzerland.
- Galvele J. R., 1979, "*Corrosión*", Departamento de Materiales, Comisión Nacional de Energía Atómica: Argentina, Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos, Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico: Washington, DC.
- Genesca J., Avila J., 1990, "*Más Allá de la Herrumbre. Lucha Contra la Corrosión*". Editorial FCE, México.
- Google, 2008, "*Google Heart*", All Rights Reserved.
- Gösta, Wranglen, "*An Introduction to corrosion and protection of metals*", 1985, Chapman and Hall, London. (pp 15-120).
- Leygraf C, Graedel T, 2001 "*Atmospheric Corrosion*" Wiley Interscience, Pennington, New Jersey. (pp 251, 269-270, 281-282, 329-340).

- Morcillo M, Feliu S, Simancas J, 1993, "*Desviation from bilogarithmic law for atmospeheric corrosion of steel*", Editorial CSIC, Madrid.
- Narváez Billy 2006, "*Determinación de la Corrosividad Atmosférica de la ciudad de Quito Parte III*", EPN, Quito, Ecuador. (pp 1-85, 200-223).
- Salinas, Mónica, 2004,"*Determinación de la Corrosividad Atmosférica de la ciudad de Quito Parte II*," EPN, Quito, Ecuador. (pp 1-64).
- Salgado Olga, Navarrete Edison, 2007 "*Determinación de la Corrosividad Atmosférica en las ciudades de Santo Domingo y Esmeraldas Parte I*, EPN, Quito, Ecuador," pp 1-66, 167-264).
- Smith J. M, 1998," *Ingeniería de la Cinética Química*" Editorial Continental, México. (pp 61-64).

ANEXOS

Anexo I

Datos de la Probetas

I.1.- Estación Instituto Luís Tello

Tabla I.1.- Datos Probetas Estación Instituto Luís Tello

Código de Probeta	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Fecha de Instalación	Fecha de Retiro
ILT Ac 11	82.0031	75.5308	26/01/2007	17/05/2007
ILT Ac 75	82.4698	76.0146	26/01/2007	17/05/2007
ILT Ac 71	82.5363	74.6905	26/01/2007	17/08/2007
ILT Ac 68	81.6644	73.8638	26/01/2007	17/08/2008
ILT Ac 46	82.3743	73.9009	26/01/2007	29/11/2007
ILT Ac 510	82.3173	73.8915	26/01/2007	29/11/2007
ILT Ac13	81.6569	67.8221	26/01/2007	23/02/2008
ILT Ac 41	80.4322	67.6317	26/01/2007	23/02/2008
ILT Ac 1 5	82.1334		26/01/2007	
ILT Ac 7 3	82.0376		26/01/2007	
ILT Ac 1 10	82.1134		26/01/2007	
ILT Ac 3 10	81.8415		26/01/2007	
ILT Ac 1 8	81.9202		26/01/2007	
ILT Ac 4 3	82.544		26/01/2007	
ILT Zn 2 2	79.938	79.7245	26/01/2007	17/05/2007
ILT Zn7 10	81.5138	81.2532	26/01/2007	17/05/2007
ILT Zn 6 3	81.9242	81.6232	26/01/2007	17/08/2007
ILT Zn 3 9	80.1026	79.8021	26/01/2007	17/08/2008
ILT Zn 5 2	81.5539	81.186	26/01/2007	29/11/2007
ILT Zn 3 5	82.3756	82.0225	26/01/2007	29/11/2007
ILT Zn 7 4	81.2625	80.8776	26/01/2007	23/02/2008
ILT Zn 1 7	82.0271	81.5937	26/01/2007	23/02/2008
ILT Zn 2 4	81.2849		26/01/2007	
ILT Zn 6 9	80.9984		26/01/2007	
ILT Zn 5 8	81.3026		26/01/2007	
ILT Zn 6 5	81.2273		26/01/2007	
ILT Zn 4 4	81.1923		26/01/2007	
ILT Zn 4 7	78.8932		26/01/2007	
ILT Cu 2 10	134.4281	134.2161	26/01/2007	17/05/2007
ILT Cu 12	135.6689	135.4766	26/01/2007	17/05/2007
ILT Cu 38	134.7684	134.4519	26/01/2007	17/08/2007
ILT Cu 31	133.9265	133.5865	26/01/2007	17/08/2008
ILT Cu 34	135.4304	135.0909	26/01/2007	29/11/2007
ILT Cu 59	135.0026	134.6665	26/01/2007	29/11/2007
ILT Cu 53	135.0402	134.6554	26/01/2007	23/02/2008
ILT Cu 62	135.6990	135.2739	26/01/2007	23/02/2008
ILT Cu 1 6	135.0739		26/01/2007	
ILT Cu 5 7	134.9503		26/01/2007	
ILT Cu 5 1	134.7326		26/01/2007	
ILT Cu 7 7	130.2589		26/01/2007	

ILT Cu 1 9	135.3533		26/01/2007	
ILT Cu 2 3	134.9699		26/01/2007	
ILT AI 4 10	34.0811	34.0799	26/01/2007	17/05/2007
ILT AI 4 2	34.0714	34.07	26/01/2007	17/05/2007
ILT AI 1 4	33.9974	33.9925	26/01/2007	17/08/2007
ILT AI 7 8	33.9832	33.9812	26/01/2007	17/08/2008
ILT AI 2 1	32.4364	32.4336	26/01/2007	29/11/2007
ILT AI 2 7	33.0502	33.0478	26/01/2007	29/11/2007
ILT AI 5 4	33.8145	33.8001	26/01/2007	23/02/2008
ILT AI 3 3	33.3077	33.296	26/01/2007	23/02/2008
ILT AI 4 5	34.0861		26/01/2007	
ILT AI 7 2	33.9153		26/01/2007	
ILT AI 2 9	32.6529		26/01/2007	
ILT AI 6 1	34.0594		26/01/2007	
ILT AI 2 6	34.0421		26/01/2007	
ILT AI 3 8	33.8229		26/01/2007	

I.2.- Estación INOCAR

Tabla I.2.- Datos Probetas Estación INOCAR

Código de Probeta	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Fecha de Instalación	Fecha de Retiro
P Ac 6 10	81,3607	77,888	23/02/2007	17/05/2007
P Ac 17	81,9334	78,6787	23/02/2007	17/05/2007
P Ac 12	82,6445	77,2285	23/02/2007	17/08/2007
P Ac 410	82,5789	76,8076	23/02/2007	17/08/2008
P Ac 7 8	81,9693	75,4712	23/02/2007	29/11/2007
P Ac 21	82,2518	76,5179	23/02/2007	29/11/2007
P Ac 39	81,6365	71,3258	23/02/2007	23/02/2008
P Ac 58	82,4508	71,9664	23/02/2007	23/02/2008
P Ac 45	82,6285		23/02/2007	
P Ac 43	82,5496		23/02/2007	
P Ac 62	81,9387		23/02/2007	
P Ac 18	82,0594		23/02/2007	
P Ac 14	82,1945		23/02/2007	
P Ac 41	82,2516		23/02/2007	
P Zn 2 10	81,9489	81,59	23/02/2007	17/05/2007
P Zn 6 5	80,6641	79,75	23/02/2007	17/05/2007
P Zn 2 4	80,9276	80,7874	23/02/2007	17/08/2007
P Zn 6 9	81,3993	81,2581	23/02/2007	17/08/2008
P Zn 4 4	81,9990	81,8249	23/02/2007	29/11/2007
P Zn 4 9	81,7538	81,6002	23/02/2007	29/11/2007
P Zn 5 7	81,0861	80,803	23/02/2007	23/02/2008
P Zn 74	80,2667		23/02/2007	
P Zn 77	80,7194		23/02/2007	
P Zn 37	81,1707		23/02/2007	
P Zn 42	81,6414		23/02/2007	
P Zn 26	81,3101		23/02/2007	
P Zn 22	81,5432		23/02/2007	
P Zn 46	81,5734		23/02/2007	
P Cu 11	134,5932	134,2298	23/02/2007	17/05/2007
P Cu 7 10	133,6520	134,5548	23/02/2007	17/05/2007
P Cu 48	134,7018	133,8884	23/02/2007	17/08/2007
P Cu 76	135,0309	132,9026	23/02/2007	17/08/2008
P Cu 36	135,5169	134,4717	23/02/2007	29/11/2007
P Cu 1 10	134,748	133,7200	23/02/2007	29/11/2007
P Cu 55	134,9723		23/02/2007	
P Cu 16	134,7048		23/02/2007	
P Cu 53	134,9487	133,3484	23/02/2007	23/02/2008
P Cu 59	134,9825		23/02/2007	
P Cu 51	134,9487		23/02/2007	
P Cu 32	135,4594		23/02/2007	
P Cu 34	133,5513		23/02/2007	
P Cu 73	135,5141		23/02/2007	
P AL 5 10	33,9597	33,957	23/02/2007	17/05/2007
P Al 2 5	33,4776	33,4751	23/02/2007	17/05/2007
P Al 4 7	33,4212	33,4165	23/02/2007	17/08/2007
P Al 1 3	32,8128	32,8088	23/02/2007	17/08/2008
P Al 5 6	33,9860	33,9792	23/02/2007	29/11/2007
P Al 1 9	34,0739	34,0682	23/02/2007	29/11/2007
P Al 5 2	33,4618	33,447	23/02/2007	23/02/2008

P AI 79	34,0536		23/02/2007	
P AI 67	34,0487		23/02/2007	
P AI 310	33,3859		23/02/2007	
P AI 71	33,3315		23/02/2007	
P AI 31	33,7934		23/02/2007	
P AI 2 8	33,7358		23/02/2007	
P AI 64	33,9042		23/02/2007	

Nota.- Los valores resaltados en amarillo presentan una desviación muy grande de los valores esperados y se debe a errores en el proceso de lavado, estos valores no se tomaron en cuenta en los cálculos.

I.3.- Estación Refinería

Tabla I.3.- Datos Probetas Estación Refinería

Código de Probeta	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Fecha de Instalación	Fecha de Retiro
R Ac 61	82,6912	80,8623	17/05/2007	17/08/2007
R Ac 19	81,7532	79,9546	17/05/2007	17/08/2007
R Ac 21	81,1439	78,7385	17/05/2007	29/11/2007
R Ac 32	81,2210	78,6612	17/05/2007	29/11/2007
R Ac 48	82,3245	77,1586	17/05/2007	23/02/2008
R Ac 42	82,1632	77,2124	17/05/2007	23/02/2008
R Ac 64	82,3368	73,7013	17/05/2007	24/05/2008
R Ac 34	80,8354	75,4167	17/05/2007	24/05/2008
R Ac 14	81,9669		17/05/2007	
R Ac 47	80,4990		17/05/2007	
R Ac 17	81,9309		17/05/2007	
R Ac 23	82,2771		17/05/2007	
R Ac 45	81,4663		17/05/2007	
R Ac 210	82,7682		17/05/2007	
R Zn 7 10	81,3420	81,2512	17/05/2007	17/08/2007
R Zn 11	80,8337	80,7539	17/05/2007	17/08/2007
R Zn 51	80,9500	80,8273	17/05/2007	29/11/2007
R Zn 57	80,9457	80,8076	17/05/2007	29/11/2007
R Zn 22	81,2952	81,172	17/05/2007	23/02/2008
R Zn 44	81,3968	81,1968	17/05/2007	23/02/2008
R Zn 13	81,5037	81,1797	17/05/2007	24/05/2008
R Zn 76	81,6824	81,4827	17/05/2007	24/05/2008
R Zn 35	82,1997		17/05/2007	
R Zn 33	80,6769		17/05/2007	
R Zn 110	81,4960		17/05/2007	
R Zn 73	80,6800		17/05/2007	
R Zn 27	80,0594		17/05/2007	
R Zn 410	80,6490		17/05/2007	
R Cu 65	135,7772	135,6727	17/05/2007	17/08/2007
R Cu 37	134,2113	134,0855	17/05/2007	17/08/2007
R Cu 77	135,6112	135,4217	17/05/2007	29/11/2007
R Cu 41	134,4125	134,1507	17/05/2007	29/11/2007
R Cu 24	134,8484	134,5146	17/05/2007	23/02/2008
R Cu 59	131,078	130,73311	17/05/2007	23/02/2008
R Cu 3 10	136,2909	135,8209	17/05/2007	24/05/2008
R Cu 25	134,8399	134,4109	17/05/2007	24/05/2008
R Cu 79	134,7346		17/05/2007	
R Cu 29	134,7699		17/05/2007	
R Cu 16	135,6018		17/05/2007	
R Cu 72	135,6284		17/05/2007	
R Cu 49	135,1029		17/05/2007	
R Cu 53	135,2772		17/05/2007	
R Al 1 2	33,0649	33,0641	17/05/2007	17/08/2007
R Al 7 8	34,0278	34,0269	17/05/2007	17/08/2007

R AI 3 1	34,1109	34,1091	17/05/2007	29/11/2007
R AI 5 8	33,9818	33,9802	17/05/2007	29/11/2007
R AI 7 5	34,0051	33,9999	17/05/2007	23/02/2008
R AI 4 3	32,5281	32,5237	17/05/2007	23/02/2008
R AI 1 5	34,0832	34,0757	17/05/2007	24/05/2008
R AI 5 6	33,3214	33,3108	17/05/2007	24/05/2008
R AI 62	33,0952		17/05/2007	
R AI 71	33,8699		17/05/2007	
R AI 39	33,3796		17/05/2007	
R AI 18	33,9984		17/05/2007	
R AI 54	33,9953		17/05/2007	
R AI 63	34,6372		17/05/2007	

Anexo II

Nomenclatura

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	UNIDADES
A	Área de las placas	cm ²
a	Corrosión en el primer año	µm
ASTM	Sociedad Americana para Ensayos y Materiales	
C	Corrosión	µm
D	Densidad	g/cm ³
ΔG	Energía libre de Gibbs	J
ΔG*	Energía de activación	J
ΔG ^o	Energía libre de Gibas estándar	J
E	Potencial del Electrodo	eq/mol
E ^o	Potencial Estándar del Electrodo	8,314 J/K*gmol
F	Constante de Faraday	F
η	Sobre potencial	
HR	Humedad Relativa	%
ISO	Organización Internacional de Estandarización	
V _c	Velocidad de corrosión	g/m ² *año
i	Corriente de intercambio	
K	Constante de equilibrio	cm ²
n	Exponente que indica el grado de difusión	g
P	Presión de saturación del vapor de agua	g/cm ³
R	Constante universal de los gases	g/m ² *h ó µm/año
t	Tiempo de exposición	µm
τ	Designa la categoría según el TDH	%
TDH	Tiempo de humectación	horas
V _{ce}	Velocidad de Corrosión Estacionaria	µm/año
V _c	Velocidad de corrosión	µm/año
W	Masa perdida	g
z	Equivalentes electroquímicos	

Anexo III

Corrosión del acero al carbono

III.1.-Cálculo de la corrosión y velocidad de corrosión para el acero al carbono.

III.1.1.-Estación Instituto Luís Tello

# Retiro	Estación	Probeta	Tiempo (años)	Masa Perdida (g)	Área (cm ²)	C media (µm/año)	Vc (µm/año)	Vc media (g/m ² año)
1	Luis Tello	ILT Ac 11	0,3	6,47	300	27,41	90,17	708,74
		ILT Ac 75	0,3	6,45	300			
2		ILT Ac 71	0,55	7,84	300	33,18	60,32	474,13
		ILT Ac 68	0,55	7,8	300			
3		ILT Ac 46	0,8	8,47	300	35,83	44,79	352,07
		ILT Ac 510	0,8	8,42	300			
4		ILT Ac13	1	13,83	300	56,48	56,48	443,92
		ILT Ac 41	1	12,8	300			

III.1.2.-Estación Refinería

# Retiro	Estación	Probeta	Tiempo (años)	Masa Perdida (g)	Area (cm ²)	C media (µm)	Vc (µm/año)	Vc media (g/m ² año)
1	Refinería	R Ac 61	0,246	1,82	300	7,69	31,26	245,76
		R Ac 19	0,246	1,79	300			
2		R Ac 21	0,493	2,4	300	10,53	21,35	167,85
		R Ac 32	0,493	2,55	300			
3		R Ac 48	0,75	5,16	300	21,45	28,6	224,81
		R Ac 42	0,75	4,95	300			
4		R Ac 64	1	8,63	300	29,8	29,8	234,23
		R Ac 34	1	5,41	300			

III.1.3.-Estación INOCAR

# Retiro	Estación	Probeta	Tiempo (años)	Masa Perdida (g)	Área (cm ²)	C media (µm)	Vc (µm/año)	Vc media (g/m ² año)
1	INOCAR	P Ac 6 10	0,23	3,47	300	14,27	62,02	487,49
		P Ac 17	0,23	3,25	300			
2		P Ac 12	0,48	5,41	300	23,72	49,42	388,44
		P Ac 410	0,48	5,77	300			
3		P Ac 7 8	0,73	6,49	300	25,94	35,53	279,26
		P Ac 21	0,73	5,73	300			
4		P Ac 39	1	10,31	300	44,09	44,09	346,58
		P Ac 58	1	10,48	300			

III.2.-Cálculo de la ecuación cinética de corrosión para el acero al carbono

Tabla III.1.-Datos de corrosión para el acero al carbono

Estación	Código	t (años)	Corrosión (μm)	C media (μm)	log (t)	log (C media)
Luis Tello	ILT Ac 11	0,31	27,45	27,41	-0,51	1,44
	ILT Ac 75	0,31	27,38			
	ILT Ac 71	0,56	33,27	33,18	-0,25	1,52
	ILT Ac 68	0,56	33,08			
	ILT Ac 46	0,83	35,93	35,83	-0,08	1,55
	ILT Ac 510	0,83	35,73			
	ILT Ac13	1,32	58,67	56,48	0,12	1,75
	ILT Ac 41	1,32	54,29			
INOCAR	P Ac 6 10	0,24	14,73	14,27	-0,63	1,15
	P Ac 17	0,24	13,80			
	P Ac 12	0,48	22,97	23,72	-0,32	1,38
	P Ac 410	0,48	24,48			
	P Ac 7 8	0,76	27,56	25,94	-0,12	1,41
	P Ac 21	0,76	24,32			
	P Ac 39	1,00	43,73	44,10	0,00	1,64
	P Ac 58	1,00	44,46			
Refinería	R Ac 61	0,25	7,76	7,69	-0,60	0,89
	R Ac 19	0,25	7,63			
	R Ac 21	0,53	10,20	10,53	-0,27	1,02
	R Ac 32	0,53	10,86			
	R Ac 33	0,76	21,91	21,46	-0,12	1,33
	R Ac 34	0,76	21,00			
	R Ac 35	1,26	36,62	29,80	0,10	1,47
	R Ac 36	1,26	22,98			

III.3.-Gráficos de regresión para obtener la ecuación de cinética de corrosión

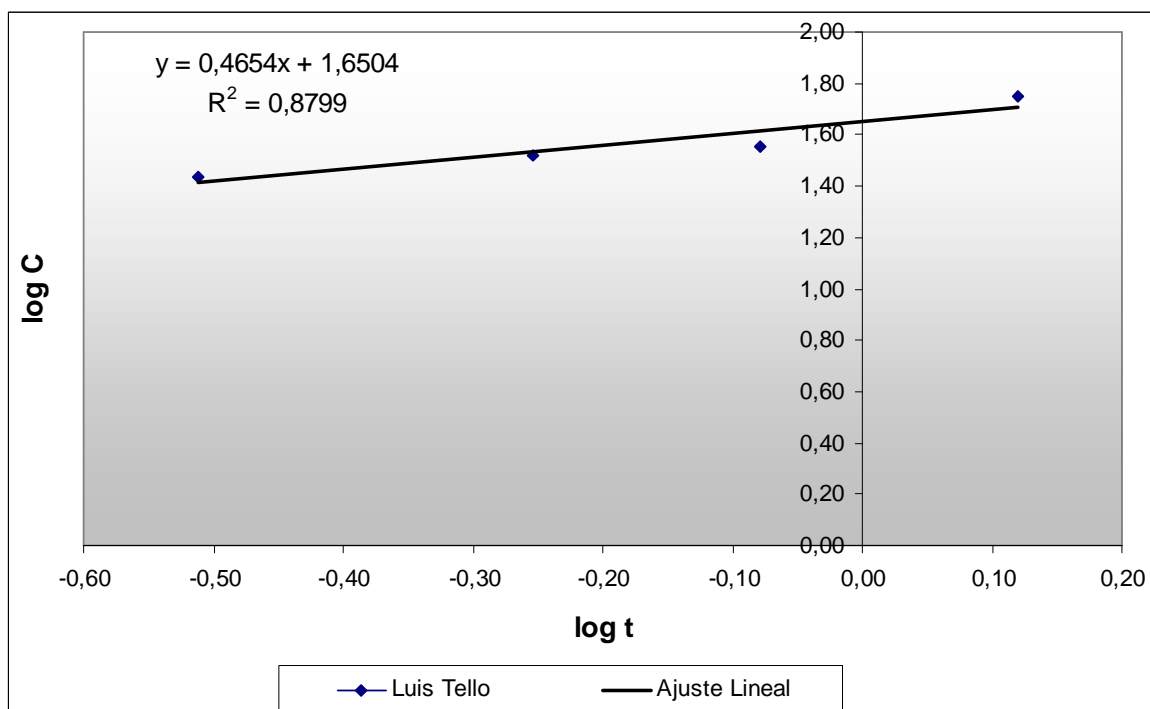


Figura III.3.1.- Estación Instituto Luis Tello

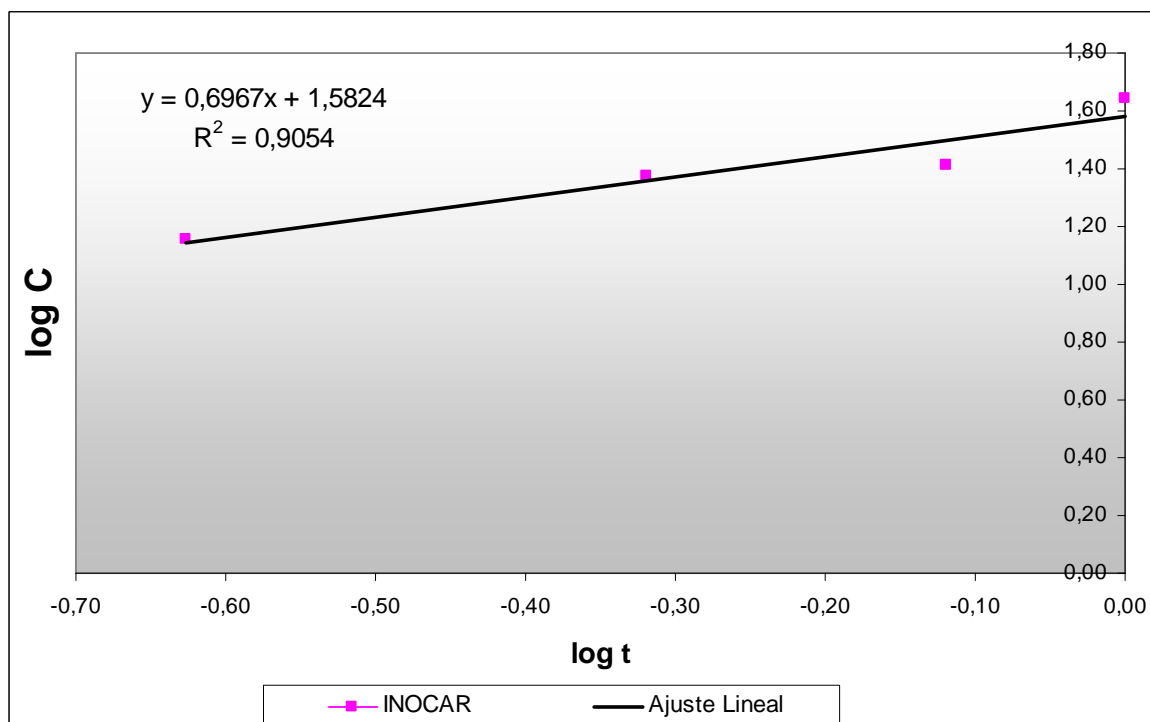


Figura III.3.2.- Estación INOCAR

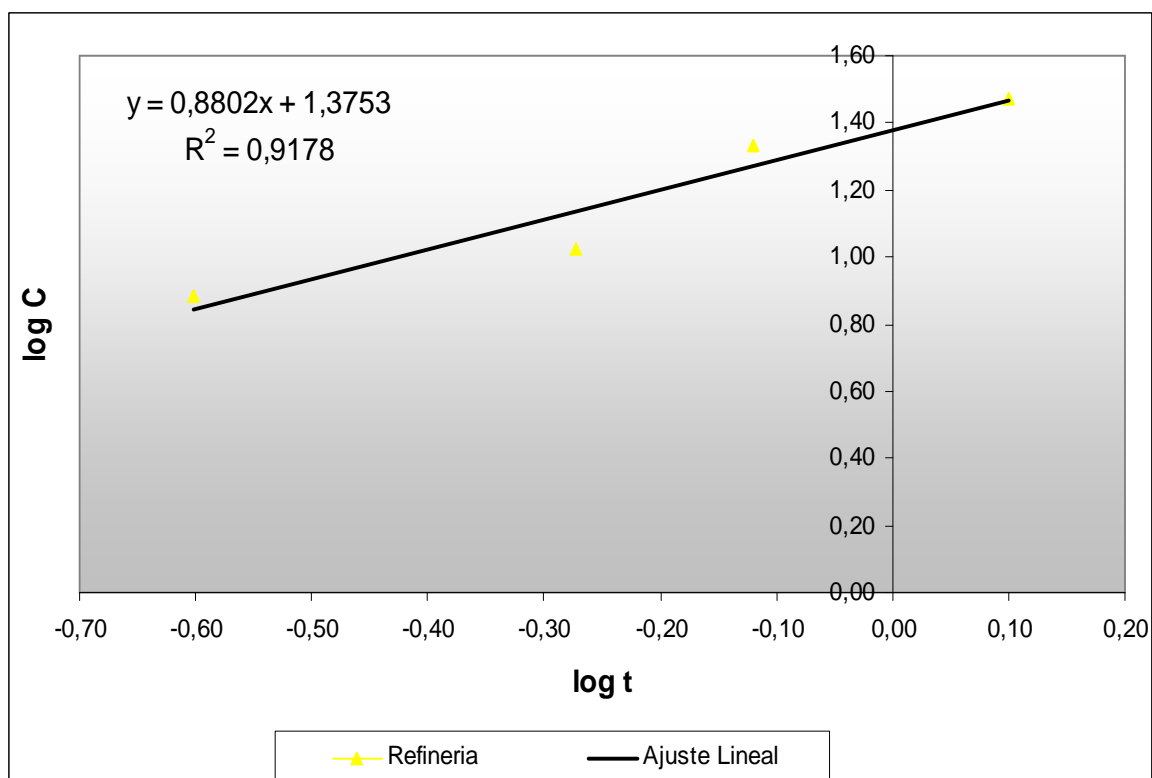


Figura III.3.3.- Estación Refinería

III.4.-Ecuaciones de la cinética de corrosión del acero al carbono

III.4.1.-Estación Instituto Luís Tello

Cinética de Corrosión:	$C = a * t^n$
	$\log C = \log a + n * \log t$
	$\log C = n * \log t + \log a$
Regresión Lineal	$y = 0.4654 x + 1.6504$
	$R^2 = 0.8799$
	$\log a = 1.6504$
	$a = 44.71$
	$n = 0.4654$
	$C = 44.71 * t^{0.4654}$

III.4.2.-Estación INOCAR

Cinética de Corrosión:	$C = a * t^n$
	$\log C = \log a + n * \log t$
	$\log C = n * \log t + \log a$
Regresión Lineal	$y = 0.6967 x + 1.5824$
	$R^2 = 0.9206$
	$\log a = 1.5824$
	$a = 38.2296$
	$n = 0.6967$
	$C = 38.2296 * t^{0.6967}$

III.4.3.-Estación Refinería

Cinética de Corrosión:	$C = a * t^n$
	$\log C = \log a + n * \log t$
	$\log C = n * \log t + \log a$
Regresión Lineal	$y = 0.8802 x + 1.3753$
	$R^2 = 0.9178$
	$\log a = 1.3753$
	$a = 23.73$
	$n = 0.8802$
	$C = 23.73 * t^{0.8802}$

Anexo IV

Corrosión del cobre

IV.1.- Cálculo de la corrosión y la velocidad de corrosión para el cobre

IV.1.1.-Estación INOCAR

# Retiro	Estación	Probeta	Tiempo (años)	Masa Perdida (g)	Área (cm ²)	C media (µm)	Vc (µm/año)	Vc media (g/m ² año)
1	INOCAR	P Cu 11	0,23	0,472	300	1,77	7,7	68,7
		P Cu 7 10	0,23	0,476	300			
2		P Cu 48	0,48	0,7	300	2,72	5,66	50,49
		P Cu 76	0,48	0,74	300			
3		P Cu 36	0,73	1,04	300	3,87	5,3	47,33
		P Cu 1 10	0,73	1,02	300			
4		P Cu 5 3	1	1,39	300	5,21	5,21	46,45

IV.1.2.-Estación Instituto Luís Tello

# Retiro	Estación	Probeta	Tiempo (años)	Masa Perdida (g)	Área (cm ²)	C media (µm/año)	Vc (µm/año)	Vc media (g/m ² año)
1	Luis Tello	ILT Cu 210	0,304	0,21	300	0,76	2,48	22,17
		ILT Cu 12	0,304	0,19	300			
2		ILT Cu 38	0,55	0,32	300	1,23	2,23	19,89
		ILT Cu 31	0,55	0,34	300			
3		ILT Cu 34	0,8	0,34	300	1,26	1,58	14,07
		ILT Cu 59	0,8	0,34	300			
4		ILT Cu 53	1	0,38	300	1,51	1,51	13,5
		ILT Cu 62	1	0,43	300			

IV.1.3.-Estación Refinería

# Retiro	Estación	Probeta	Tiempo (años)	Masa Perdida (g)	Área (cm ²)	C media (µm)	Vc (µm/año)	Vc media (g/m ² año)
1	Refinería	R Cu 65	0,246	0,10	300	0,43	1,75	15,6
		R Cu 37	0,246	0,13	300			
2		R Cu 77	0,493	0,19	300	0,84	1,71	15,25
		R Cu 41	0,493	0,26	300			
3		R Cu 24	0,8	0,33	300	1,27	1,59	14,13
		R Cu 59	0,8	0,34	300			
4		R Cu 3 10	1	0,47	300	1,68	1,68	14,98
		R Cu 25	1	0,43	300			

IV.2.-Cálculo de la ecuación cinética de corrosión para el cobre

Tabla IV.1.-Datos de corrosión para el cobre

Estación	Código	t (años)	Corrosión (μm)	C media	log (t)	log (C media)
Luís Tello	ILT Cu 2 10	0.308	0.79	0.76	-0.51	-0.12
	ILT Cu 12		0.72			
	ILT Cu 38	0.558	1.18	1.23	-0.25	0.09
	ILT Cu 31		1.27			
	ILT Cu 34	0.834	1.27	1.26	-0.08	0.10
	ILT Cu 59		1.26			
	ILT Cu 53	1.32	1.44	1.51	0.12	0.18
ILT Cu 62	1.59					
INOCAR	P Cu 11	0.236	1.76	1.77	-0.63	0.25
	P Cu 7 10		1.78			
	P Cu 48	0.48	2.63	2.72	-0.32	0.43
	P Cu 76		2.80			
	P Cu 36	0.767	3.91	3.87	-0.12	0.59
	P Cu 1 10		3.84			
P Cu 5 3	1	5.21	5.21	0.00	0.72	
Refinería	R Cu 65	0.25	0.39	0.43	-0.60	-0.37
	R Cu 37		0.47			
	R Cu 77	0.53	0.71	0.84	-0.28	-0.07
	R Cu 41		0.98			
	R Cu 24	0.76	1.25	1.27	-0.12	0.10
	R Cu 59		1.29			
	R Cu 3 10	1.01	1.76	1.68	0.00	0.23
R Cu 25	1.60					

IV.3.- Gráficos de regresión para obtener la ecuación de cinética de corrosión

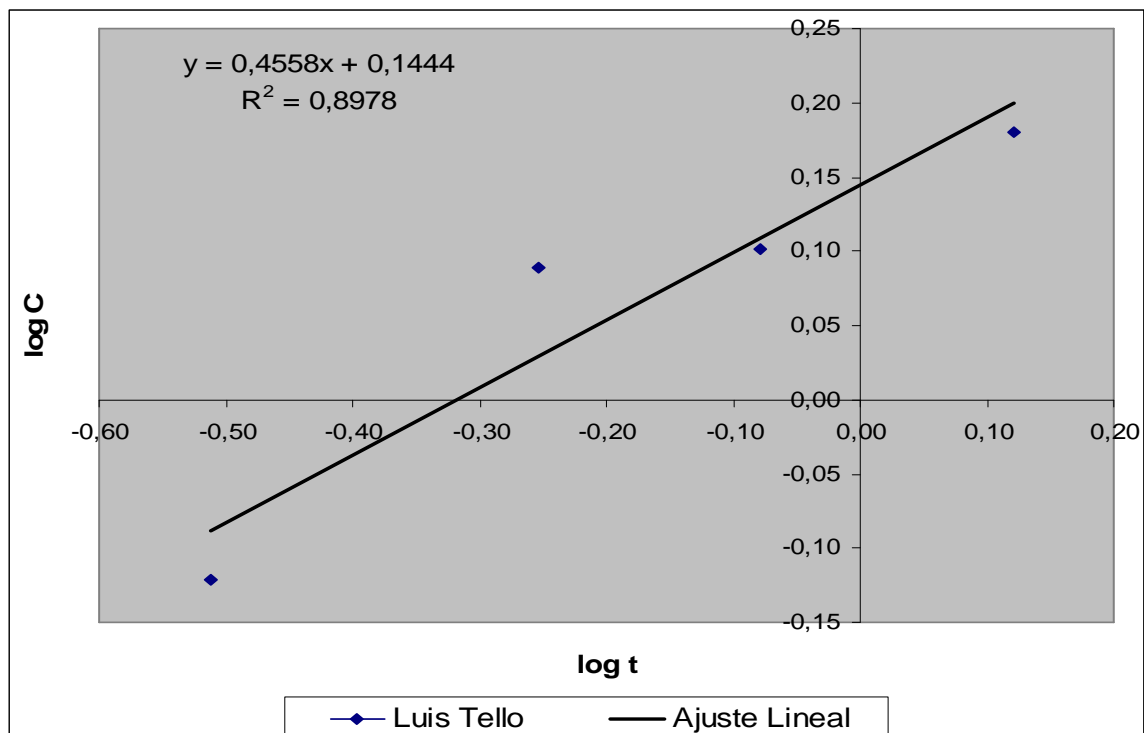


Figura IV.1.- Estación Instituto Luís Tello

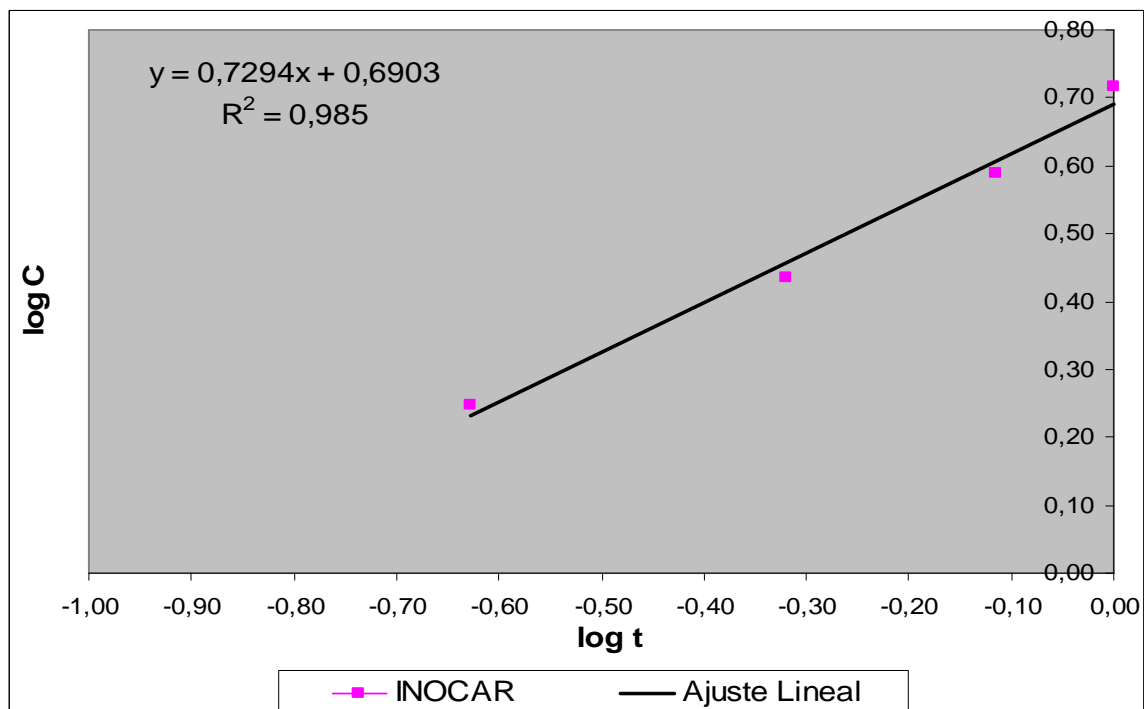


Figura IV.2.- Estación INOCAR

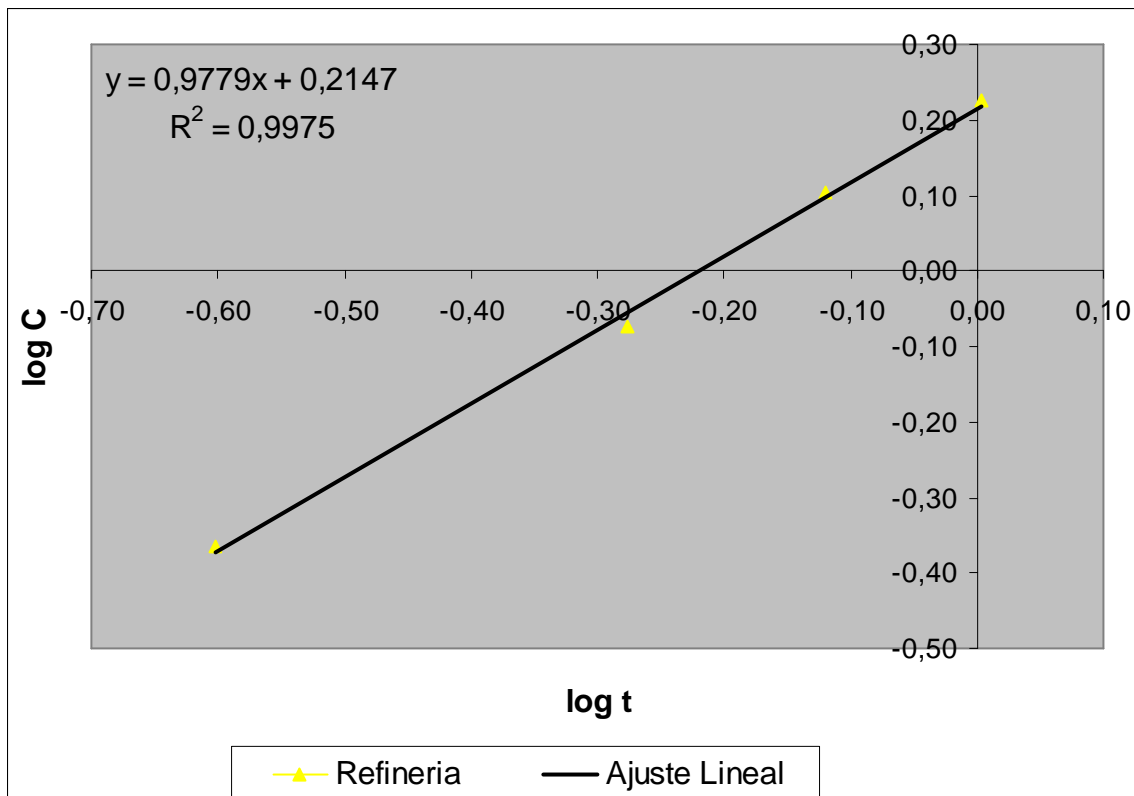


Figura IV.3.- Estación Refinería

IV.4.-Ecuaciones de la cinética de corrosión del cobre

IV.4.1.-Estación Instituto Luís Tello

Cinética de Corrosión:	$C = a * t^n$
	$\log C = \log a + n * \log t$
	$\log C = n * \log t + \log a$
Regresión Lineal	$y = 0.4558 x + 1.444$
	$R^2 = 0.897$
	$\log a = 0.1444$
	$a = 1.394$
	$n = 0.4558$
	$C = 1.394 * t^{0.4558}$

IV.4.2.-Estación INOCAR

Cinética de Corrosión:	$C = a * t^n$
	$\log C = \log a + n * \log t$
	$\log C = n * \log t + \log a$
Regresión Lineal	$y = 0.7294 x + 0.69$
	$R^2 = 0.985$
	$\log a = 0.69$
	$a = 4.897$
	$n = 0.7294$
	$C = 4.897 * t^{0.7294}$

IV.4.3.-Estación Refinería

Cinética de Corrosión:	$C = a * t^n$
	$\log C = \log a + n * \log t$
	$\log C = n * \log t + \log a$
Regresión Lineal	$y = 0.9979 x + 0.2147$
	$R^2 = 0.9975$
	$\log a = 0.2147$
	$a = 1.634$
	$n = 0.9779$
	$C = 1.6394 * t^{0.9779}$

Anexo V

Corrosión del aluminio

V.1.- Cálculo de la corrosión y la velocidad de corrosión para el aluminio

V.1.1.-Estación Instituto Luís Tello

# Retiro	Estación	Probeta	Tiempo (años)	Masa Perdida (g)	Área (cm ²)	C media (µm/año)	Vc (µm/año)	Vc media (g/m ² año)
1	Luís Tello	ILT AI 4 10	0.304	0.0012	300	0.016	0.053	0.14
		ILT AI 4 2	0.304	0.0014	300			
2		ILT AI 1 4	0.55	0.0022	300	0.026	0.047	0.13
		ILT AI 7 8	0.55	0.0020	300			
3		ILT AI 2 1	0.8	0.0028	300	0.032	0.040	0.11
		ILT AI 2 7	0.8	0.0024	300			
4		ILT AI 5 4	1	0.0144	300	0.161	0.161	0.43
		ILT AI 3 3	1	0.0117	300			

V.1.2.-Estación INOCAR

# Retiro	Estación	Probeta	Tiempo (años)	Masa Perdida (g)	Área (cm ²)	C media (µm)	Vc (µm/año)	Vc media (g/m ² año)
1	INOCAR	P AL 5 10	0.23	0.0027	300	0.032	0.140	0.3768
		P AI 2 5	0.23	0.0025	300			
2		P AI 4 7	0.48	0.0047	300	0.054	0.112	0.3021
		P AI 1 3	0.48	0.004	300			
3		P AI 5 6	0.73	0.0068	300	0.077	0.106	0.2854
		P AI 1 9	0.73	0.0057	300			
4		P AI 52	1	0.0148	300	0.18	0.18	0.4930

V.1.3.-Estación Refinería

# Retiro	Estación	Probeta	Tiempo (años)	Masa Perdida (g)	Área (cm ²)	C media (µm)	Vc (µm/año)	Vc media (g/m ² año)
1	Refinería	R AI 1 2	0.246	0.0008	300	0.01	0.0427	0.115
		R AI 7 8	0.246	0.0009	300			
2		R AI 3 1	0.493	0.0018	300	0.021	0.0426	0.115
		R AI 5 8	0.493	0.0016	300			
3		R AI 7 5	0.8	0.0052	300	0.059	0.0741	0.200
		R AI 4 3	0.8	0.0044	300			
4		R AI 1 5	1	0.0075	300	0.112	0.1117	0.302
		R AI 5 6	1	0.0106	300			

V.2.-Calculo de la ecuación cinética de corrosión para el aluminio

Tabla V.1.-Datos de corrosión para el aluminio

Estación	Código	t (años)	Corrosión (μm)	C media	log (t)	log (C media)
Luís Tello	ILT AI 4 10	0.308	0.01	0.02	-0.51	-1.79
	ILT AI 4 2		0.02			
	ILT AI 1 4	0.558	0.03	0.03	-0.25	-1.59
	ILT AI 7 8		0.02			
	ILT AI 2 1	0.834	0.03	0.03	-0.08	-1.49
	ILT AI 2 7		0.03			
	ILT AI 5 4	1.32	0.18	0.16	0.12	-0.79
	ILT AI 3 3		0.14			
INOCAR	P AL 5 10	0.236	0.03	0.03	-0.63	-1.49
	P AI 2 5		0.03			
	P AI 4 7	0.48	0.06	0.05	-0.32	-1.27
	P AI 1 3		0.05			
	P AI 5 6	0.767	0.08	0.08	-0.12	-1.11
	P AI 1 9		0.07			
	P AI 5 2	1	0.18	0.09	0.00	-1.04
Refinería	R AI 1 2	0.25	0.01	0.01	-0.60	-1.98
	R AI 7 8		0.01			
	R AI 3 1	0.53	0.02	0.02	-0.28	-1.68
	R AI 5 8		0.02			
	R AI 7 5	0.76	0.06	0.06	-0.12	-1.23
	R AI 4 3		0.05			
	R AI 1 5	1.01	0.09	0.11	0.00	-0.95
	R AI 5 6		0.13			

V.3.-Gráficos de regresión para obtener la ecuación de cinética de corrosión

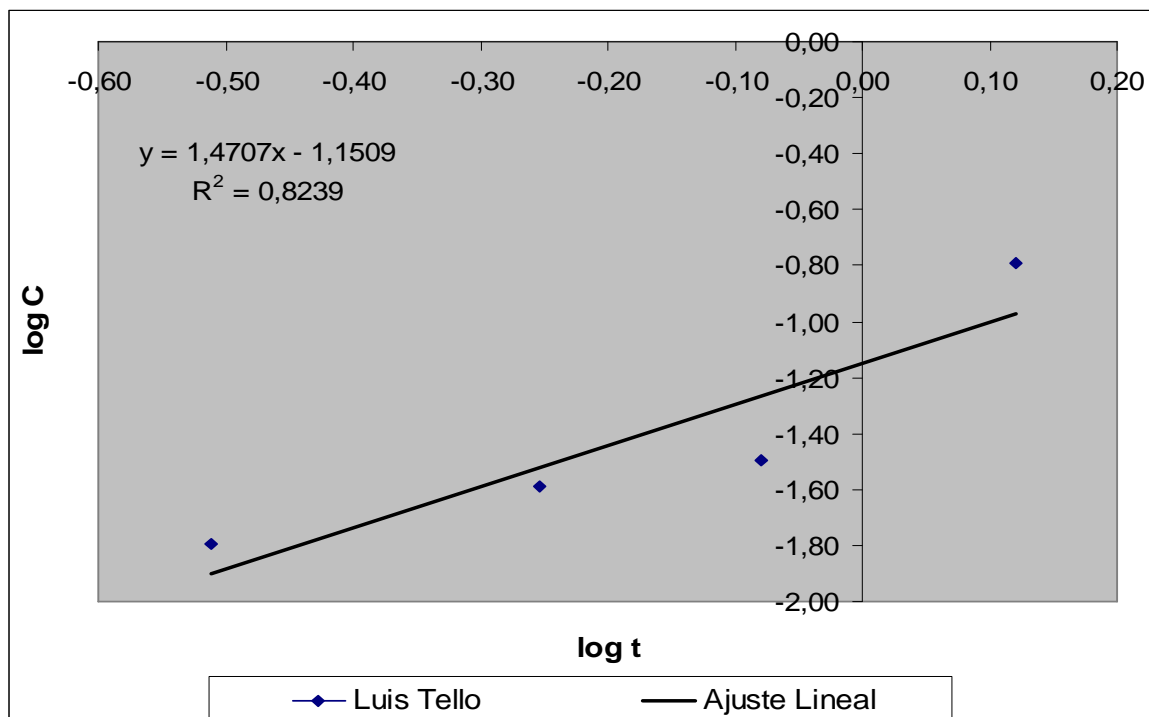


Figura V.3.1.- Estación Instituto Luís Tello

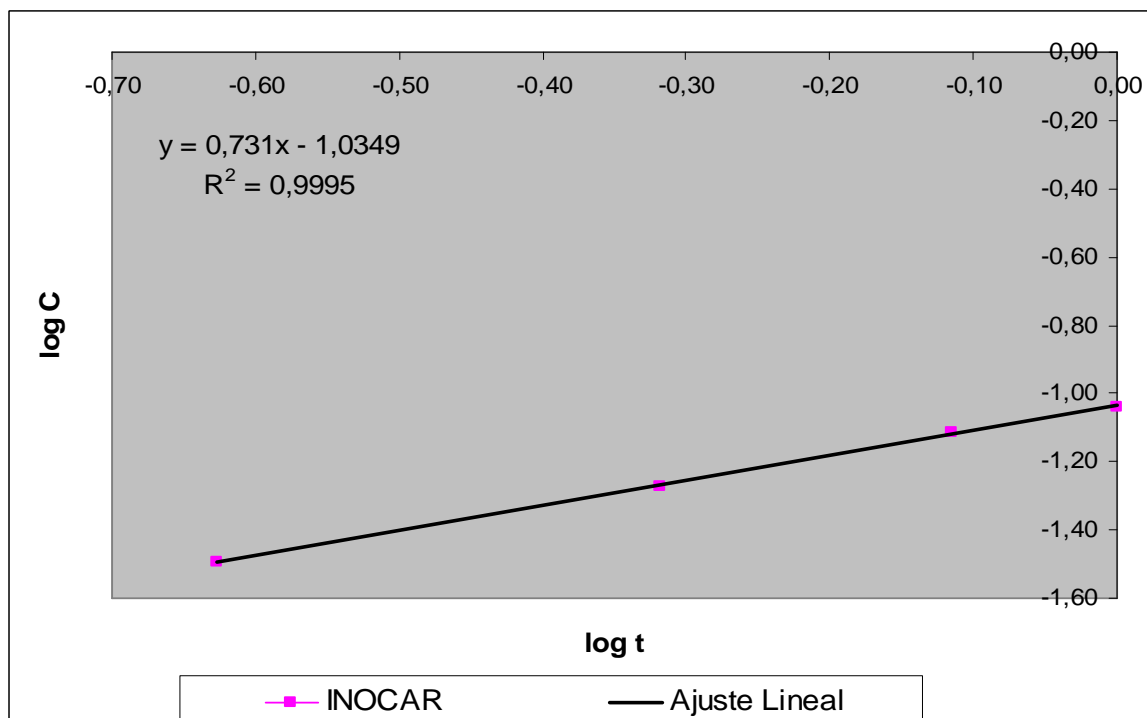


Figura V.3.2.- Estación INOCAR

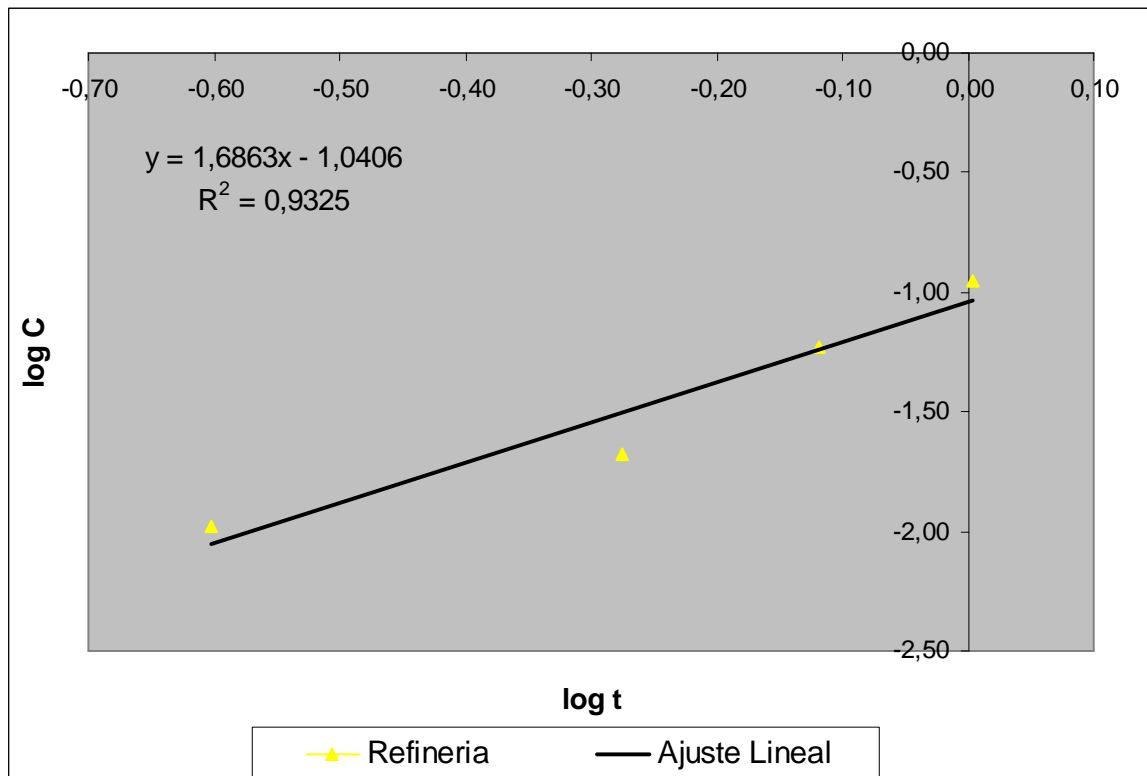


Figura V.3.3.- Estación Refinería

V.4.-Ecuaciones de la cinética de corrosión del aluminio

V.4.1.-Estación Instituto Luís Tello

Cinética de Corrosión: $C = a * t^n$

$$\log C = \log a + n * \log t$$

$$\log C = n * \log t + \log a$$

Regresión Lineal $y = 1.4707 x - 1.1509$

$$R^2 = 0.8239$$

$$\log a = -1.1509$$

$$a = 0.0706$$

$$n = 1.4707$$

$$C = 0.0706 * t^{1.4707}$$

V.4.2.-Estación INOCAR

Cinética de Corrosión: $C = a * t^n$

$$\log C = \log a + n * \log t$$

$$\log C = n * \log t + \log a$$

Regresión Lineal $y = 0.731 x - 1.0349$

$$R^2 = 0.999$$

$$\log a = -10.349$$

$$a = 0.092$$

$$n = 0.731$$

$$C = 0.092 * t^{0.731}$$

V.4.3.-Estación Refinería

Cinética de Corrosión: $C = a * t^n$

$$\log C = \log a + n * \log t$$

$$\log C = n * \log t + \log a$$

Regresión Lineal $y = 1.6863 x - 1.0406$

$$R^2 = 0.9305$$

$$\log a = -1.0406$$

$$a = 0.091$$

$$n = 1.6863$$

$$C = 0.091 * t^{1.6863}$$

Anexo VI

Corrosión del acero galvanizado

VI.1.-Cálculo de la corrosión y la velocidad de corrosión para el acero galvanizado

VI.1.1.-Estación Instituto Luís Tello

# Retiro	Estación	Probeta	Tiempo (años)	Masa Perdida (g)	Área (cm ²)	C media (µm/año)	Vc (µm/año)	Vc media (g/m ² año)
1	Luis Tello	ILT Zn 2 2	0,304	0,2232	300	1,15	3,79	27,06
		ILT Zn7 10	0,304	0,2703	300			
2		ILT Zn 6 3	0,55	0,3107	300	1,45	2,64	18,82
		ILT Zn 3 9	0,55	0,3102	300			
3		ILT Zn 5 2	0,8	0,3776	300	1,73	2,16	15,43
		ILT Zn 3 5	0,8	0,3628	300			
4		ILT Zn 7 4	1	0,3946	300	1,96	1,96	13,96
		ILT Zn 1 7	1	0,4431	300			

VI.1.2.-Estación INOCAR

# Retiro	Estación	Probeta	Tiempo (años)	Masa Perdida (g)	Área (cm ²)	C media (µm/año)	Vc (µm/año)	Vc media (g/m ² año)
1	INOCAR	P Zn 2 10	0,23	0,3686	300	3,02	13,12	93,65
		P Zn 6 5	0,23	0,9238	300			
2		P Zn 2 4	0,48	0,1499	300	0,70	1,46	10,44
		P Zn 6 9	0,48	0,1509	300			
3		P Zn 4 4	0,73	0,1838	300	0,81	1,11	7,92
		P Zn 4 9	0,73	0,1633	300			
4	P Zn 5 7	1	0,2928	300	1,36	1,36	4,86	

VI.1.3.-Estación Refinería

# Retiro	Estación	Probeta	Tiempo (años)	Masa Perdida (g)	Área (cm ²)	C media (µm)	Vc (µm/año)	Vc media (g/m ² año)
1	Refinería	R Zn 7 10	0,246	0,1005	300	0,44	1,80	12,87
		R Zn 11	0,246	0,0895	300			
2		R Zn 51	0,493	0,1324	300	0,65	1,33	9,47
		R Zn 57	0,493	0,1478	300			
3		R Zn 22	0,8	0,1329	300	0,80	1,00	7,14
		R Zn 44	0,8	0,2097	300			
4		R Zn 13	1	0,3337	300	1,27	1,27	9,05
		R Zn 76	1	0,2094	300			

VI.2.-Cálculo de la ecuación cinética de corrosión para el acero galvanizado

Tabla VI.1.-Datos de corrosión para el acero galvanizado

Estación	Código	t (años)	Corrosión (μm)	C media	log (t)	log C (media)
Luis Tello	ILT Zn 2 2	0,308	0,95	1,061	-0,511	0,026
	ILT Zn7 10		1,17			
	ILT Zn 6 3	0,558	1,36	1,359	-0,253	0,133
	ILT Zn 3 9		1,36			
	ILT Zn 5 2	0,834	1,67	1,638	-0,079	0,214
	ILT Zn 3 5		1,60			
	ILT Zn 7 4	1,32	1,84	1,955	0,121	0,291
	ILT Zn 1 7		2,07			
INOCAR	P Zn 2 10	0,236	1,63	2,926	-0,627	0,466
	P Zn 6 5		4,22			
	P Zn 2 4	0,48	0,61	0,612	-0,319	-0,214
	P Zn 6 9		0,61			
	P Zn 4 4	0,767	0,77	0,720	-0,115	-0,143
	P Zn 4 9		0,67			
	P Zn 5 7	1	1,36	1,360	0,000	0,134
Refinería	R Zn 7 10	0,25	0,38	0,353	-0,602	-0,452
	R Zn 11		0,33			
	R Zn 51	0,53	0,53	0,563	-0,276	-0,249
	R Zn 57		0,60			
	R Zn 22	0,76	0,62	0,800	-0,119	-0,097
	R Zn 44		0,98			
	R Zn 13	1,01	1,56	1,268	0,004	0,103
	R Zn 76		0,98			

VI.3.-Gráficos de regresión para obtener la ecuación de cinética de corrosión

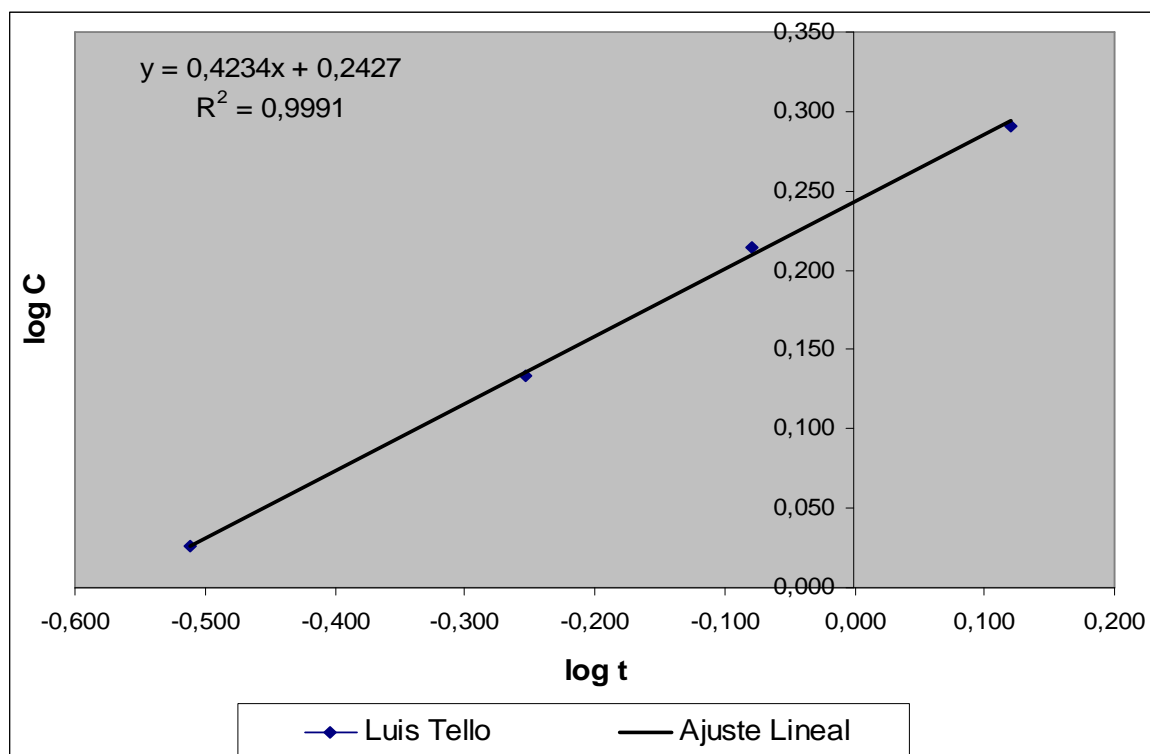


Figura VI.2.1.- Estación Instituto Luís Tello

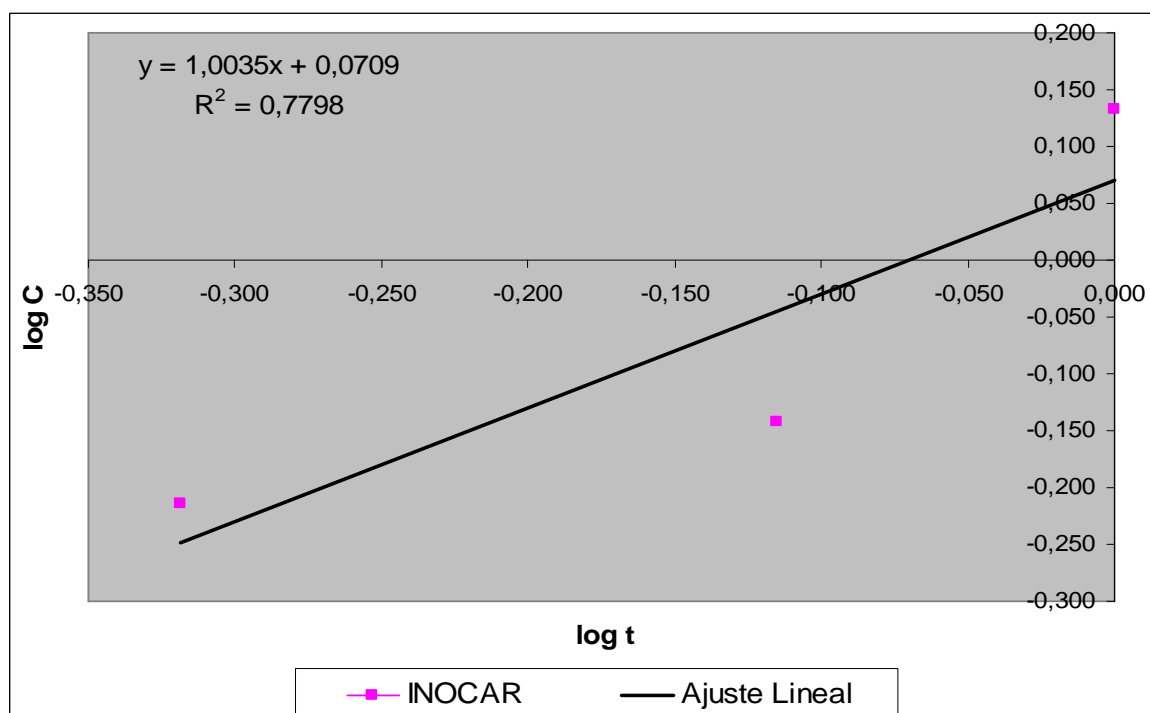


Figura VI.2.2. - Estación INOCAR

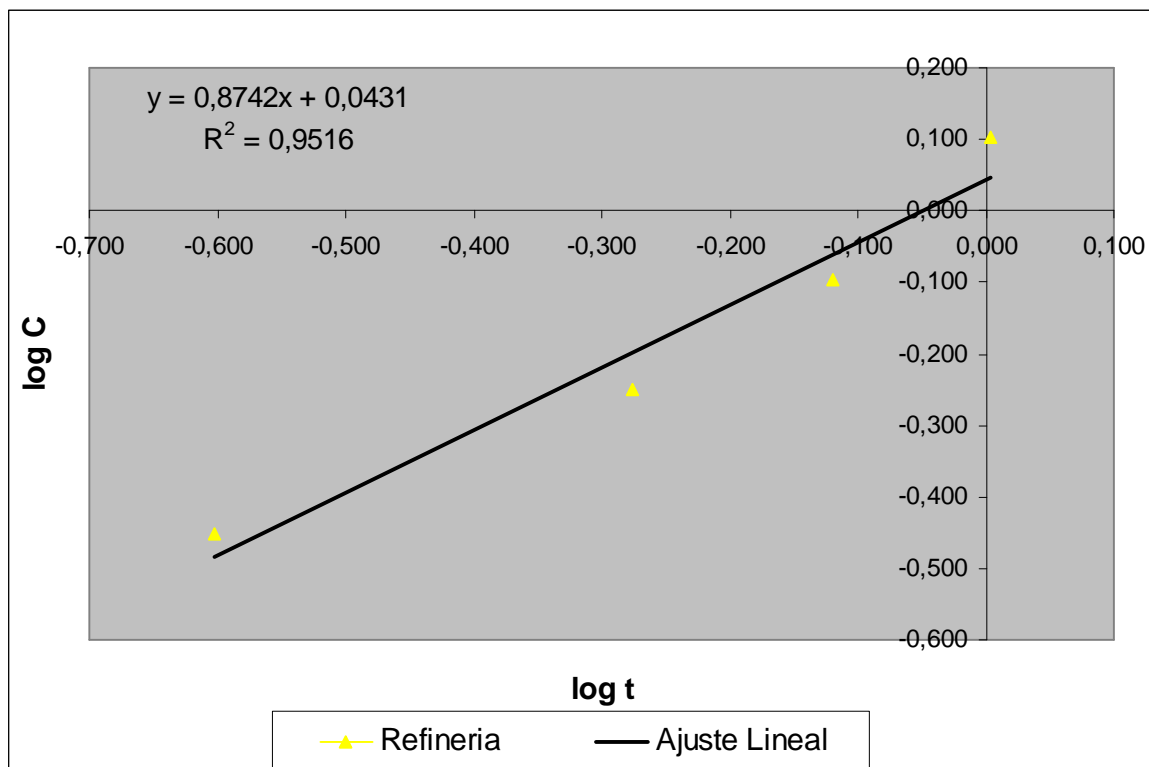


Figura VI.2.3.- Estación Refinería

VI.4.-Ecuaciones de la cinética de corrosión del acero galvanizado

VI.4.1.-Estación Instituto Luís Tello

Cinética de Corrosión: $C = a * t^n$

$$\log C = \log a + n * \log t$$

$$\log C = n * \log t + \log a$$

Regresión Lineal $y = 0.4234 x + 0.2427$

$$R^2 = 0.991$$

$$\log a = 0.2427$$

$$a = 1.748$$

$$n = 0.4234$$

$$C = 1.748 * t^{0.4234}$$

VI.4.2.-Estación INOCAR

Cinética de Corrosión: $C = a * t^n$

$$\log C = \log a + n * \log t$$

$$\log C = n * \log t + \log a$$

Regresión Lineal $y = 1.0035 x + 0.0709$

$$R^2 = 0.7798$$

$$\log a = 0.0709$$

$$a = 1.199$$

$$n = 1.0035$$

$$C = 1.199 * t^{1.0035}$$

VI.4.3.-Estación Refinería

Cinética de Corrosión: $C = a * t^n$

$$\log C = \log a + n * \log t$$

$$\log C = n * \log t + \log a$$

Regresión Lineal $y = 0.8742 x + 0.0431$

$$R^2 = 0.9516$$

$$\log a = 0.0431$$

$$a = 0.909$$

$$n = 0.8742$$

$$C = 0.909 * t^{0.8742}$$

Anexo VII

Datos estación Municipio

VII.1.- Datos experimentales

# Retiro	Estación	Probeta	Tiempo (años)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Blanco (g)	Masa Perdida (g)
Acero	Municipio	Acero E 71	1	86,42	77,18	0	9,24
		Acero E 16	1	85,57	76,99	0	8,58
Cobre		Cobre E72	1	106,46	105,02	0	1,44
		Cobre E17	1	105,63	104,46	0	1,17
Aluminio		aluminio E11	1	42,23	42,19	0	0,04
		aluminio E79	1	41,22	41,194	0	0,03
Ac. Galv		A galv.E73	1	86,98	86,8	0,0097	0,19
		A galv. E18	1	73,66	73,52	0,0097	0,15

VII.2.-Calculo de la corrosión y la velocidad de corrosión

# Retiro	Probeta	Tiempo (años)	Area (m ²)	C (µm)	C media	Vc (g/cm ² año)	Vc media
Acero	Acero E 71	1	300	39,19	37,79	308	297,0
	Acero E 16	1	300	36,39		286	
Cobre	Cobre E72	1	300	6,11	5,53	48	43,5
	Cobre E17	1	300	4,96		39	
Aluminio	aluminio E11	1	300	0,15	0,14	1,33	1,1
	aluminio E79	1	300	0,12		0,87	
Ac. Galv	A galv.E73	1	300	0,80	0,68	6,32	5,7
	A galv. E18	1	300	0,56		4,99	