



MONITOREO 2018 DE LAS ESTACIONES MEXICANAS DEL PROYECTO IBEROAMERICANO DURACON

Angélica de L. del Valle Moreno, Andrés A. Torres Acosta, José Trinidad Pérez
Quiroz, María G. Lomelí González, Miguel Martínez Madrid,
Brenda Y. Gómez Hernández, Aram de la Cruz Montufar, Brandon Gante Salinas,
Pedro Castro Borges, Mercedes Balancán,
Wilfrido Martínez Molina, Elia M. Alonso Guzmán,
Esteban López, Raquel López Célis, Silvia O. Ramírez Martínez, Flor de Belem
Pérez Chávez, Antonia López Sánchez,
Luis E. Ariza Aguilar, Demetrio Nieves, Miguel Baltazar,
Joan Genescá Llongueras,
Carlos R. Arganis Juárez, Ángeles Díaz Sánchez, Eduardo Robles y
Roberto R. Camacho Turrubiates

Publicación Técnica No. 567
Sanfandila, Qro, 2019

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Monitoreo 2018 de las estaciones mexicanas del
Proyecto Iberoamericano DURACON**

**Publicación Técnica No. 567
Sanfandila, Qro, 2019**

Esta investigación fue realizada por las personas e instituciones siguientes: Angélica de L. del Valle Moreno, Andrés A. Torres Acosta, José Trinidad Pérez Quiroz, María G. Lomelí González y Miguel Martínez Madrid (**Instituto Mexicano del Transporte, IMT**); Brenda Y. Gómez Hernández, Aram de la Cruz Montufar y Brandon Gante Salinas (**Universidad Politécnica Francisco I. Madero, UPFIM**); Pedro Castro Borges y Mercedes Balancán (**CINVESTAV Unidad Mérida**); Wilfrido Martínez Molina y Elia M. Alonso Guzmán (**Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, UMich**); Esteban López, Raquel López Célis, Silvia O. Ramírez Martínez, Flor de Belem Pérez Chávez y Antonia López Sánchez (**Instituto Tecnológico de Oaxaca, ITOx**); Luis E. Ariza Aguilar, Demetrio Nieves y Miguel Baltazar (**Universidad Veracruzana, UV**); Joan Genescá Llongueras y Francisco Rodríguez (**Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM**); Carlos R. Arganis Juárez, Ángeles Díaz Sánchez y Eduardo Robles (**Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, ININ**), y Roberto R. Camacho Turrubiates (**Universidad Autónoma de Tamaulipas, UATamps**).

Se agradece la colaboración del Centro Tecnológico del Concreto de la empresa **Holcim-La Farge** por el apoyo en la fabricación de los especímenes de concreto usados para la caracterización de esta investigación, los cuales fueron fabricados con su cemento y los agregados que utilizan en la elaboración de sus concretos.

Se agradece al Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos del **Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)** y a Emmanuel Álvarez del **Sistema Meteorológico Nacional**, Datos Históricos-EMA, por el apoyo recibido para recopilar la información de las estaciones climáticas ubicadas en las cercanías de las estaciones de exposición natural, usada para una parte del desarrollo de la presente investigación.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación **EE 16/18: Monitoreo 2018 de las estaciones mexicanas del Proyecto Iberoamericano DURACON**.

Contenido

Contenido	vii
Índice de tablas	xi
Índice de figuras	xiii
Sinopsis	xix
Abstract	xxi
Resumen ejecutivo	xxiii
Introducción	1
1 Marco teórico	5
1.1 Corrosión por penetración de cloruros	6
1.2 Corrosión por carbonatación	6
1.3 Variables ambientales	7
1.3.1 Temperatura ambiente (Temp)	7
1.3.2 Precipitación pluvial (PP)	7
1.3.3 Humedad relativa (% HR)	7
1.4 Técnicas electroquímicas	8
1.4.1 Potencial de corrosión	8
1.4.2 Velocidad de corrosión	8
1.4.3 Resistencia eléctrica del concreto	10
2 Antecedentes	11
2.1 Fichas de identificación de las estaciones de monitoreo	13
3 Metodología	25
3.1 Elaboración de probetas de concreto reforzado	25

3.2	Monitoreo de variables meteorológicas de las estaciones de exposición natural.....	25
3.3	Monitoreo de variables electroquímicas de corrosión en el acero de refuerzo	27
4	Resultados.....	29
4.1	Estaciones de monitoreo en zonas urbanas	29
4.1.1	Variables ambientales estación Querétaro	29
4.2	Estaciones de monitoreo en zonas marinas.....	33
4.2.1	Variables ambientales estación Veracruz.....	33
4.3	Variables electroquímicas	37
4.3.1	Estación Querétaro.....	37
4.3.2	Estación Veracruz.....	44
5	Análisis de resultados	51
5.1	Análisis de los resultados electroquímicos de las estaciones de campo .	51
5.1.1	Estación Querétaro.....	51
5.1.2	Estación Veracruz.....	64
5.2	Resultado de las correlaciones entre todas las estaciones de exposición mexicanas.....	75
5.2.1	Velocidad de corrosión (I_{corr}) vs. potencial de corrosión (E_{corr})	77
5.2.2	Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica	80
5.2.3	Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica	83
5.3	Velocidad de corrosión acumulada	86
5.3.1	Estaciones de monitoreo en zonas urbanas.....	86
6	Conclusiones	90
	Bibliografía	92
	ANEXOS	94
	Anexo A. Datos meteorológicos	94
	Anexo B. Datos electroquímicos	123
	Anexo C. Correlación I_{corr} vs. E_{corr}	157

Anexo D. Correlación I_{corr} vs. resistencia eléctrica	189
Anexo E. Correlación E_{corr} vs. resistencia eléctrica	221
Anexo F. Velocidad de corrosión acumulada – estaciones urbanas	253
Anexo G. Velocidad de corrosión acumulada – estaciones marinas.....	260

Índice de tablas

Tabla 1.1 Criterio de evaluación de las mediciones de potenciales de media celda	8
Tabla 1.2 Criterio de evaluación de la velocidad de corrosión	10

Índice de figuras

Figura 2.1 Estaciones de monitoreo en el proyecto DURACON México	12
Figura 2.2 Levantamiento fotográfico de la estación Mx2 – Mérida.	14
Figura 2.3 Levantamiento fotográfico de la estación Mx7 – México.....	15
Figura 2.4 Levantamiento fotográfico de la estación Mx5 – Morelia.....	16
Figura 2.5 Levantamiento fotográfico de la estación Mx5 – Oaxaca.....	17
Figura 2.6 Levantamiento fotográfico de la estación Mx2 – Progreso.....	18
Figura 2.7 Levantamiento fotográfico de la estación Mx8 – Querétaro.....	19
Figura 2.8 Levantamiento fotográfico de la estación Mx15 – Tampico.....	20
Figura 2.9 Levantamiento fotográfico de la estación Mx9 – Toluca.....	21
Figura 2.10 Levantamiento fotográfico de la estación Mx6 – Veracruz.....	22
Figura 2.11 Levantamiento fotográfico de la estación Mx14 – Xalapa.....	23
Figura 3.1 Geometría de los especímenes de concreto utilizados (López Celis <i>et al.</i> , 2006).....	26
Figura 3.2 Detalle de la distribución del acero de refuerzo en los especímenes (López Celis <i>et al.</i> , 2006).....	26
Figura 3.3 Orientación de los especímenes colocados en las estaciones de exposición natural.....	27
Figura 3.4 Formato de la recolección de datos tomados de las probetas de concreto reforzado.....	28
Figura 4.1 Valores mensuales de la temperatura promedio de la estación (Mx8) Querétaro.....	29
Figura 4.2 Valores mensuales de la humedad relativa de la estación (Mx8) Querétaro.....	30
Figura 4.3 Valores mensuales del tiempo de humectación de la estación (Mx8) Querétaro.....	30
Figura 4.4 Valores mensuales de la precipitación pluvial de la estación (Mx8) Querétaro.....	31
Figura 4.5 Valores mensuales de la velocidad del viento de la estación (Mx8) Querétaro.....	31
Figura 4.6 Valores mensuales de la dirección del viento de la estación (Mx8) Querétaro.....	32
Figura 4.7 Valores mensuales de la radiación solar de la estación (Mx8) Querétaro	32
Figura 4.8 Valores mensuales de la temperatura promedio de la estación (Mx6) Veracruz.....	33
Figura 4.9 Valores mensuales de la humedad relativa de la estación (Mx6) Veracruz	34
Figura 4.10 Valores mensuales del tiempo de humectación de la estación (Mx6) Veracruz.....	34

Figura 4.11	Valores mensuales de la precipitación pluvial de la estación (Mx6) Veracruz.....	35
Figura 4.12	Valores mensuales de la velocidad de los vientos de la estación (Mx6) Veracruz.....	35
Figura 4.13	Valores mensuales de la dirección de los vientos de la estación (Mx6) Veracruz.....	36
Figura 4.14	Valores mensuales de la radiación solar de la estación (Mx6) Veracruz.....	36
Figura 4.15	Velocidad de corrosión (icorr) vs. tiempo para cara expuesta C1 Relación a/c: 0.45	37
Figura 4.16	Velocidad de corrosión (icorr) vs. tiempo para cara resguardada C2 Relación a/c: 0.45	38
Figura 4.17	Velocidad de corrosión (icorr) vs. tiempo para cara expuesta C1 Relación a/c: 0.65	38
Figura 4.18	Velocidad de corrosión (icorr) vs. tiempo para cara resguardada C2 Relación a/c: 0.65	39
Figura 4.19	Potencial de corrosión (Ecorr) vs. tiempo para cara expuesta C1 Relación a/c: 0.45	39
Figura 4.20	Potencial de corrosión (Ecorr) vs. tiempo para cara resguardada C2 Relación a/c: 0.45	40
Figura 4.21	Potencial de corrosión (Ecorr) vs. tiempo para cara expuesta C1 Relación a/c: 0.65	40
Figura 4.22	Potencial de corrosión (Ecorr) vs. tiempo para cara resguardada C2 Relación a/c: 0.65	41
Figura 4.23	Resistencia eléctrica (Resist. Eléct) vs. tiempo para cara expuesta C1 Relación a/c: 0.45	41
Figura 4.24	Resistencia eléctrica (Resist. Eléct) vs. tiempo para cara resguardada C2 Relación a/c: 0.45	42
Figura 4.25	Resistencia eléctrica (Resist. Eléct) vs. tiempo para cara expuesta C1 Relación a/c: 0.65	42
Figura 4.26	Resistencia eléctrica (Resist. Eléct) vs. tiempo para cara resguardada C2 Relación a/c: 0.65	43
Figura 4.27	Velocidad de corrosión (icorr) vs. tiempo para cara expuesta C1 Relación a/c: 0.45	44
Figura 4.28	Velocidad de corrosión (icorr) vs. tiempo para cara resguardada C2 Relación a/c: 0.45	44
Figura 4.29	Velocidad de corrosión (icorr) vs. tiempo para cara expuesta C1 Relación a/c: 0.65	45
Figura 4.30	Velocidad de corrosión (icorr) vs. tiempo para cara resguardada C2 Relación a/c: 0.65	45
Figura 4.31	Potencial de corrosión (Ecorr) vs. tiempo para cara expuesta C1 Relación a/c: 0.45	46
Figura 4.32	Potencial de corrosión (Ecorr) vs. tiempo para cara resguardada C2 Relación a/c: 0.45	46
Figura 4.33	Potencial de corrosión (Ecorr) vs. tiempo para cara expuesta C1 Relación a/c: 0.65	47

Figura 4.34 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. tiempo para cara resguardada C2 Relación a/c: 0.65	47
Figura 4.35 Resistencia eléctrica (Resist. Eléct) vs. tiempo para cara expuesta C1 Relación a/c: 0.45	48
Figura 4.36 Resistencia eléctrica (Resist. Eléct) vs. tiempo para cara resguardada C2 Relación a/c: 0.45	48
Figura 4.37 Resistencia eléctrica (Resist. Eléct) vs. tiempo para cara expuesta C1 Relación a/c: 0.65	49
Figura 4.38 Resistencia eléctrica (Resist. Eléct) vs. tiempo para cara resguardada C2 Relación a/c: 0.65	49
Figura 5.1 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.	52
Figura 5.2 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.....	53
Figura 5.3 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.	54
Figura 5.4 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2.	55
Figura 5.5 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.	56
Figura 5.6 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.	57
Figura 5.7 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.....	58
Figura 5.8 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2.....	59
Figura 5.9 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.	60
Figura 5.10 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.....	61
Figura 5.11 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.....	62
Figura 5.12 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2.....	63

Figura 5.13 Potencial de corrosión (Ecorr) vs. velocidad de corrosión (icorr) para 2 cm: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.....	65
Figura 5.14 Potencial de corrosión (Ecorr) vs. velocidad de corrosión (icorr) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.	66
Figura 5.15 Potencial de corrosión (Ecorr) vs. velocidad de corrosión (icorr) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2.	67
Figura 5.16 Velocidad de corrosión (icorr) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.....	68
Figura 5.17 Velocidad de corrosión (icorr) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.....	69
Figura 5.18 Velocidad de corrosión (icorr) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.....	70
Figura 5.19 Velocidad de corrosión (icorr) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2.....	71
Figura 5.20 Potencial de corrosión (Ecorr) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.....	72
Figura 5.21 Potencial de corrosión (Ecorr) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.....	73
Figura 5.22 Potencial de corrosión (Ecorr) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.....	74
Figura 5.23 Potencial de corrosión (Ecorr) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2.....	75
Figura 5.24 Velocidad de corrosión (icorr) vs. potencial de corrosión (Ecorr) para 3 cm de recubrimiento de todas las estaciones de monitoreo: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2	77
Figura 5.25 Velocidad de corrosión (icorr) vs. potencial de corrosión (Ecorr) para 2 cm de recubrimiento de todas las estaciones de monitoreo: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2	78
Figura 5.26 Velocidad de corrosión (icorr) vs. potencial de corrosión (Ecorr) para 1.5 cm de recubrimiento de todas las estaciones de monitoreo: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2	79
Figura 5.27 Velocidad de corrosión (icorr) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 3 cm de recubrimiento de todas las estaciones de monitoreo: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.....	80
Figura 5.28 Velocidad de corrosión (icorr) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 2 cm de recubrimiento de todas las estaciones de monitoreo: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.....	81

Figura 5.29	Velocidad de corrosión (icorr) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 1.5 cm de recubrimiento de todas las estaciones de monitoreo: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.....	82
Figura 5.30	Potencial de corrosión (icorr) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 3 cm de recubrimiento de todas las estaciones de monitoreo: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.....	83
Figura 5.31	Potencial de corrosión (Ecorr) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 2 cm de recubrimiento de todas las estaciones de monitoreo: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.....	84
Figura 5.32	Potencial de corrosión (Ecorr) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 1.5 cm de recubrimiento de todas las estaciones de monitoreo: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.....	85
Figura 5.33	Velocidad de corrosión acumulada de la cara expuesta C1 de la estación (Mx8) Querétaro.....	86
Figura 5.34	Velocidad de corrosión acumulada de la cara resguardada C2 de la estación (Mx8) Querétaro.....	86
Figura 5.35	Velocidad de corrosión acumulada en la cara resguardada de la estación (Mx8) Querétaro.....	87
Figura 5.36	Velocidad de corrosión acumulada en la cara expuesta de la estación (Mx8) Querétaro.....	87
Figura 5.37	Velocidad de corrosión acumulada de la cara expuesta C1 de la estación (Mx6) Veracruz.....	88
Figura 5.38	Velocidad de corrosión acumulada de la cara resguardada C2 de la estación (Mx6) Veracruz.....	88
Figura 5.39	Velocidad de corrosión acumulada de la cara resguardada C2 de la estación (Mx6) Veracruz.....	89
Figura 5.40	Velocidad de corrosión acumulada de la cara expuesta C1 de la estación (Mx6) Veracruz.....	89

Sinopsis

Este trabajo muestra la actualización de los resultados obtenidos, a la fecha, del Proyecto Iberoamericano DURACON en México, cuyo objetivo principal es caracterizar la durabilidad de concretos expuestos a condiciones ambientales reinantes en diferentes ciudades de los países participantes. Esta caracterización se realiza mediante estaciones de ensayo de exposición natural en atmósferas marina y urbana.

Se muestran los resultados obtenidos en las estaciones mexicanas entre los años 2003 y 2018. Cada estación consta de seis especímenes prismáticos (15x15x30 cm) reforzados de concreto, con dos tipos de concreto: tres especímenes con una relación $a/c = 0.65$ y otros tres con una relación $a/c = 0.45$. Cada espécimen posee seis varillas de refuerzo del núm. 3, manteniendo cada par de ellas un recubrimientos de 1.5, 2.0 y 3.0 cm.

La mayoría de los especímenes de concreto fabricados y expuestos en las estaciones de México se encuentran pasivados, aún después de poco más de 15 años de exposición, excepto en las estaciones de Morelia y Veracruz, donde se encontraron indicios de haberse iniciado la corrosión de algunas de las varillas, pero esa activación fue en época de lluvias y después se volvieron a pasivar en época de estiaje.

Abstract

This publication presents the experimental results obtained, to date, of the Project DURACON Mexico. Its main objective is to characterize the durability of concrete that has been exposed to environmental conditions prevailing in different cities of the participating Iberoamerican countries. This characterization has been done through natural test sites, under marine and urban environments.

This publication shows the results obtained in the Mexican test sites between the years 2003 and 2018. Each test site is composed of six reinforced concrete prismatic specimens (15x15x30 cm): three specimens with a $w/c=0.65$ and other three with a 0.45 w/c ratio. Each specimen included six No. 3 reinforcement steel bars. Three different concrete covers by pairs of 1.5, 2.0 and 3.0 cm were used.

The experimental results show that the specimens tested at almost all the Mexican stations are passivated, even though they may have been exposed to environmental conditions for as long as 15 years. At the Morelia and Veracruz stations, incipient corrosion was found on some of the rebars, but this activation coincides with the rainy seasons, but when humidity levels decrease, they got passivated again.

Resumen ejecutivo

Este trabajo incluyó la actualización de la información recabada del Proyecto Iberoamericano DURACON en sus estaciones mexicanas, desde el año 2003 hasta el año 2017, teniendo como antecedente los resultados publicados en la Parte I de este proyecto en el año 2005 (López Celis *et al.*, 2005).

Primero se presentó una breve explicación de los especímenes de concreto utilizados. A continuación se mostraron los datos de las estaciones de exposición natural mexicanas y evidencias fotográficas del estado actual de las mismas. Después se mostraron los valores obtenidos de las pruebas electroquímicas realizadas a estos especímenes reforzados con varilla de acero convencional, que incluyeron los potenciales de media celda, la velocidad de corrosión (del acero de refuerzo embebido en los especímenes de concreto) y, finalmente, los valores de la resistencia eléctrica del recubrimiento del concreto de estos especímenes. A continuación, se mostraron los datos meteorológicos disponibles de todas las estaciones evaluadas, durante el periodo antes mencionado.

Se reportó un análisis de los resultados obtenidos de todas las estaciones evaluadas en esta investigación por separado y como un grupo, así como una discusión de los datos obtenidos en esta investigación. Finalmente, se expusieron las conclusiones, el listado de referencias y los anexos, en donde se lista cada uno de los resultados obtenidos en todas las estaciones de ensayo.

Los especímenes de concreto fabricados y expuestos en las estaciones de México no mostraron daños por corrosión del acero de refuerzo, aún después de poco más de 15 años de exposición. Esto demuestra que los concretos de relación agua/cemento (*a/c*) menores que 0.65 y fabricados con cemento tipo CPO (contenido de Clinker >95%) son durables en los ambientes de exposición seleccionados en este proyecto.

El comportamiento electroquímico de los aceros de refuerzo en las estaciones presentadas en esta investigación mostraron valores que indicaron pasivación en la mayoría de los especímenes utilizados. Únicamente un par de ellos, en las estaciones de Morelia y Veracruz, mostraron indicios una incipiente corrosión en algunas de las varillas de acero colocadas en los especímenes, pero mostraron activación en las fechas de humedad alta o en época de lluvias, y después se volvieron a pasivar en época de baja precipitación.

Introducción

El concreto reforzado es uno de los materiales de construcción más empleados en la actualidad, debido a la resistencia y durabilidad que presenta. Sin embargo, existe un gran número de estructuras que se han dañado prematuramente por la corrosión presente en el acero de refuerzo. Este fenómeno es de gran preocupación debido a los costos que se generan por mantenimiento.

Según Rojas (2008), en términos generales, las estructuras se diseñan para una vida útil de 50 años, por lo que se debe garantizar que, durante su vida útil, la estructura conserve los requisitos de diseño sobre seguridad, funcionalidad y estética. De este modo, se debe garantizar que los materiales y componentes se comporten adecuadamente durante ese periodo, sin la generación de costos de mantenimiento inesperados.

Rojas (2008) señala que, en la actualidad, lo que se conoce como diseño por durabilidad ha cobrado mucha importancia, pues éste trata precisamente de definir las acciones pertinentes para garantizar la vida útil de la estructura. En relación con los aspectos de tipo ambiental se deben considerar los siguientes factores: agresividad del ambiente, espesor de recubrimiento, resistencia a la penetración del agente agresivo y un límite inaceptable de deterioro.

Históricamente, el diseño de las estructuras de concreto se ha basado en su mayoría sólo en el criterio de la resistencia mecánica; gracias a esto, se ha logrado tener estructuras que soportan adecuadamente las cargas de servicio; sin embargo, se han encontrado problemas relacionados con el medio ambiente donde se encuentra la estructura. Por ello, existe la necesidad de investigar las razones del deterioro en el concreto y solucionar problemas prácticos.

De acuerdo con Hernández y Mendoza (2006), los primeros problemas de durabilidad empezaron a surgir antes de la mitad del siglo XX, por lo que la problemática no es nueva; sin embargo, las obras que se han realizado en las décadas más recientes siguen presentando problemas de esta naturaleza, ya que no se ha estudiado lo suficiente, dada su complejidad y también debido a que significa, generalmente, un costo inicial mayor.

En 2010, Cerna y Galicia (2010) comentan acerca de la vida útil en estructuras de concreto reforzado desde la perspectiva del comportamiento del material en el aspecto de la corrosión, fenómeno asociado directamente con la durabilidad del concreto reforzado.

Torres y Martínez (2001) señalan que, en México, hace falta mucha investigación para llegar a un nivel de conocimiento suficiente para que exista la posibilidad de

incluir el diseño por durabilidad en alguno de los reglamentos de diseño estructural, como el estadounidense ACI o el europeo CEB. Sin embargo, también señalan que el conocimiento que se ha aportado en la actualidad es de gran ayuda para que en un futuro cercano pueda establecerse un código de diseño integral por durabilidad y solicitaciones de cargas.

Entre 2015 y 2018, el Grupo de Trabajo de Concreto y Agregados del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE) contribuyó a la estandarización de los métodos de prueba y criterios de aceptación de los ensayos de durabilidad en concreto. A la fecha de publicación de este trabajo, se dispone ya de nueve normas específicas relacionadas con la durabilidad del concreto.

El concepto de vida útil de una estructura lo propone el reporte de la Red Temática DURAR indicando lo siguiente: “Período en el que la estructura conserva los requisitos del proyecto sobre seguridad, funcionalidad y estética, sin costos inesperados de mantenimiento” (Red Durar, 2000). Por ello, si la estructura no cumpliera con alguna de estas tres características (seguridad, funcionalidad y estética), se podría establecer que la estructura ha sobrepasado su vida útil.

El programa Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), en el marco del Subprograma XV “Corrosión e impacto ambiental sobre los materiales”, como parte del proyecto XV.3 denominado “Influencia de la acción del medio ambiente en la durabilidad del concreto” (DURACON), integró a nivel iberoamericano la Red temática de durabilidad de la armadura (Red DURAR), conformada por especialistas de Argentina, Brasil, Colombia, Cuba, España, México, Perú, Portugal, Uruguay y Venezuela.

Con base en el intercambio de ideas, experiencias y resultados de investigación, la Red DURAR tiene como objetivo general unificar criterios y métodos de inspección, ensayo y evaluación, con la finalidad de utilizar sistemas mejorados de intervención, reparación y rehabilitación en estructuras de concreto reforzado que se encuentren deterioradas por fenómenos de corrosión.

A escala mundial, se tienen reportes del Proyecto DURACON durante los primeros 10 años de exposición de las probetas fabricadas para llevar a cabo el monitoreo de las variables electroquímicas en el acero de refuerzo (Troconis *et al.*, 2007, 2015, 2016). Esto representa un antecedente importante en cuanto a los objetivos que busca cumplir dicho proyecto.

En México, varios autores, entre ellos López Celis (2006) y Moreno (2009), reportan resultados de carbonatación en el concreto, así como de corrosión en el acero de refuerzo de las probetas del Proyecto DURACON en los primeros cuatro años de exposición.

El organismo responsable de llevar a cabo las actividades de este proyecto DURACON en México es el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), en coordinación con un grupo de investigadores, conformado por diversas instituciones

públicas y privadas, dentro de las cuales se encuentran: el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), el Centro Tecnológico del Concreto (CTC) del grupo Holcim México, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la Universidad Autónoma de Tamaulipas (UAT), la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional-Unidad Mérida (CINVESTAV-U. Mérida), la Universidad Veracruzana (UV), el Instituto Tecnológico de Oaxaca (ITO), entre otras.

Por lo establecido anteriormente, se hace notar la importancia que representa contar con estructuras de concreto reforzado que se comporten adecuadamente ante las sollicitaciones mecánicas y las condiciones ambientales, de manera que es necesario seguir efectuando investigaciones acerca de los mecanismos responsables de deteriorar tales estructuras, desde el punto de vista de durabilidad.

Descripción del problema

Una de las principales causas del deterioro en las estructuras de concreto reforzado es la corrosión en el acero de refuerzo, debido a distintos factores que influyen desde la etapa de diseño hasta las condiciones de exposición y servicio, lo que refleja como consecuencia elevados costos de mantenimiento y reparación. Se suman los altos índices actuales de contaminación, que agravan dicho problema, por lo que a efectos de preservar la integridad estructural, resulta de gran importancia determinar el grado de daño que presenta el acero a causa del proceso de corrosión.

El deterioro de la infraestructura existente de concreto reforzado es un problema a ser considerado y estudiado, debido a que no sólo afecta a las dependencias responsables de ellas, sino que también perjudica directamente a la sociedad, ya que estas estructuras quedan inservibles antes de alcanzar el final de su vida útil prevista, siendo, en la mayoría de los casos, la falta de diagnóstico de las condiciones de exposición ambiental la causa del deterioro.

La problemática de corrosión en las estructuras de concreto reforzado depende en gran medida del medio ambiente al que se encuentran expuestas, de manera que se vuelve necesario analizar detalladamente el comportamiento de las estructuras ante diversas condiciones ambientales, con la finalidad de determinar el tratamiento que se debe dar a las estructuras existentes y las consideraciones de diseño para futuras estructuras, tomando en consideración dicho comportamiento.

Con el propósito de contribuir a la consecución de dicho objetivo, el IMT cuenta con 15 estaciones de monitoreo, ubicadas en todo el territorio nacional, de las cuales se obtienen datos de velocidad y potencial de corrosión, resistencia eléctrica, concentración de iones cloruros y profundidad de carbonatación. Además, se obtienen datos meteorológicos como humedad relativa, temperatura, precipitación pluvial, velocidad del viento, radiación solar, tiempo de humectación y tiempo de

insolación, contenido de compuestos de cloruro, compuestos de azufre y dióxido de carbono en la atmósfera.

Este proyecto busca determinar la durabilidad de concretos expuestos en las condiciones ambientales predominantes en México, basándose en la exposición de especímenes de concreto con acero y sin acero de refuerzo en ambientes diversos (urbano, marino, urbano-industrial, urbano-marino, rural-marino e industrial-marino).

En general, para llevar a cabo el monitoreo de la actividad de corrosión, se diseñaron dos tipos de concretos, uno con una relación a/c = 0.65 y otro de relación a/c = 0.45. Las pruebas están centradas principalmente en la determinación de los procesos de carbonatación y penetración de cloruros en el concreto, además del monitoreo de las variables electroquímicas en el acero de refuerzo embebido en las probetas.

Objetivos de la investigación

a. Objetivo general

Establecer la correlación entre variables electroquímicas de corrosión en el acero de refuerzo de las probetas de concreto reforzado ubicadas en las estaciones de monitoreo activas del proyecto DURACON México, con las variables ambientales específicas a las que se encuentran expuestas dichos especímenes.

b. Objetivos específicos

- Analizar las variables electroquímicas de corrosión en el acero de refuerzo correspondientes a las probetas de concreto reforzado expuestas en distintos ambientes de México.
- Determinar niveles de corrosión en las probetas de cada estación de monitoreo.
- Describir el comportamiento de las variables ambientales en cada estación de monitoreo.
- Correlacionar las variables electroquímicas de corrosión con variables ambientales en cada estación de monitoreo.

1 Marco teórico

De acuerdo con Torres Acosta y Martínez Madrid (2001), la corrosión del acero de refuerzo consiste en la oxidación destructiva del acero debido al medio en el que se encuentra. Las consecuencias de la acción destructiva de la oxidación se presentan como una disminución de la sección de la varilla, agrietamiento en el concreto e incluso delaminación del concreto debido a las presiones que ejerce el óxido expansivo y a la disminución o desaparición de la adherencia entre el concreto y el refuerzo. En la figura 1.1, se muestran gráficamente los mecanismos para que exista corrosión y cómo prevenirla.

La corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica, la cual consiste en cuatro elementos principales:

- ánodo, donde ocurre la oxidación
- cátodo, donde ocurre la reducción
- conductor metálico, donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones
- electrolito, en este caso, el concreto, donde la corriente eléctrica es generada por el flujo de iones en un medio acuoso

PARA QUE HAYA CORROSIÓN

pH < 8,0

Oxígeno
Agua

pH > 8,0

Oxígeno
Agua
Cloruros

PARA QUE NO HAYA CORROSIÓN

Mantener fuera del concreto armado alguna de las siguientes opciones:

- Oxígeno
- Agua
- Cloruros

Colocar en el concreto armado alguna de las siguientes opciones:

- Iones hidroxilos
- Potencial negativo sobre el acero
- Iones ferrosos
- Inhibidor

Figura 1.1. Mecanismos para generar y evitar la corrosión del acero en concreto.

1.1 Corrosión por penetración de cloruros

El fenómeno de corrosión del acero de refuerzo puede destacarse por la presencia de un agente agresivo que acelera el proceso, como los cloruros (procedentes del agua de mar, sales de deshielo, etc.), u otros iones despasivantes, aún si el pH del concreto está por encima de 9.

El ataque de cloruros produce picaduras locales que rompen la capa pasivadora del acero de refuerzo, con lo que se inicia el proceso anódico y se reduce la sección de la barra.

La porosidad del concreto es, sin duda, un factor crucial en todos estos fenómenos, ya que la penetración será más rápida cuanto mayor sea la porosidad del recubrimiento. Así, a bajas relaciones a/c (agua/cemento) y relativamente altos contenidos en cemento, se obtiene una cierta garantía de lentas velocidades de penetración de los cloruros. El tipo de cemento y su capacidad de retener o combinar cloruros es otro de los parámetros relevantes del proceso.

El ACI -201(1982) establece que los ciclos de humedecimiento y secado de agua con cloruros representan un factor importante para la penetración de cloruros, debido a que aumentan su concentración en la capa superficial. Cuando ocurre el mojado de la superficie, el agua con cloruros penetra el concreto por succión capilar. Posteriormente, cuando ocurre el secado, el agua se evapora y los cloruros permanecen en los poros del concreto.

1.2 Corrosión por carbonatación

La pérdida de alcalinidad del concreto, denominada carbonatación, también es un problema que actualmente afecta a muchas estructuras en el país. Este fenómeno ocurre cuando el dióxido de carbono (CO_2) reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) con un pH de 12 a 13, a carbonato de calcio (CaCO_3), que tiene un pH menos alcalino (DURAR, 1997). El hidróxido de calcio y los iones de sodio (Na) y potasio (K), por su alta alcalinidad, forman en el acero de refuerzo embebido en el concreto una capa pasiva de hidróxido de hierro ($\text{Fe}(\text{OH})_2$), que lo cubre y protege de la corrosión. La permanencia de esta capa depende de que el concreto conserve dicha alcalinidad, la que, al descender ante la presencia de dióxido de carbono en el concreto, hace que el acero pierda su capa pasiva; se requiere un pH menor que 11 para que se inicie este efecto (DURAR, 1997).

Los factores que afectan la carbonatación son el contenido de humedad, el contenido de CO_2 y SO_2 en el ambiente atmosférico y la permeabilidad del concreto. El contenido de humedad relativa ambiental es un factor importante para que exista carbonatación, misma que ocurre con mayor rapidez en el intervalo de 50-70% aproximadamente de humedad relativa (DURAR, 1997). A bajas humedades, no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelva el dióxido de

carbono, y en humedades altas, los poros se bloquean y evitan el ingreso del dióxido de carbono.

1.3 Variables ambientales

1.3.1 Temperatura ambiente (Temp)

Es una magnitud física que se define como el nivel térmico que se presenta en un ambiente, con variaciones afectadas por distintas variables como presión atmosférica, altura sobre el nivel del mar y humedad relativa.

La temperatura se mide con la ayuda de un termómetro, el cual puede medir en diferentes escalas, tales como: grados Celcius o centígrados ($^{\circ}\text{C}$), grados Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) y grados Kelvin ($^{\circ}\text{K}$). Para efectos del presente estudio, las medidas se indican en grados centígrados.

1.3.2 Precipitación pluvial (PP)

De acuerdo con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) (2009), la precipitación pluvial se define como un fenómeno atmosférico iniciado con la condensación de vapor del agua contenido en las nubes, que posteriormente cae a la superficie terrestre. La precipitación se mide en milímetros de agua, o litros caídos por unidad de superficie (m^2), es decir, la altura de la lámina de agua recogida en una superficie plana se mide en mm o L/m^2 (1 milímetro de agua de lluvia equivale a 1 L de agua por m^2).

La precipitación pluvial se mide por medio de pluviómetros o pluviógrafos; los segundos se utilizan principalmente cuando se tratan de determinar precipitaciones intensas de corto periodo. Para que los valores sean comparables en las estaciones pluviométricas, se utilizan instrumentos estandarizados.

1.3.3 Humedad relativa (% HR)

Giancoli (2006) define la humedad relativa como: “La razón entre la presión parcial del vapor de agua y la presión de vapor saturado a una temperatura dada”. En otras palabras, la humedad relativa es la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera, expresada en porcentaje de la cantidad máxima que podría haber a una temperatura dada (tomando en cuenta que al aumentar la temperatura, la cantidad de vapor de agua también aumenta). Por ello, una lectura de 100% de humedad relativa significa que el aire está totalmente saturado de vapor de agua.

Para medir la humedad relativa, se emplea un instrumento llamado higrómetro. La medida de esta variable se expresa en porcentaje (%). La importancia de considerar esta variable dentro del estudio de la corrosión obedece a que tanto el oxígeno como la humedad relativa son ambivalentes, es decir que cuando el acero de refuerzo aún está pasivado, una cierta cantidad de oxígeno y humedad pueden reforzar tal capa pasivante, mientras que cuando se presenta corrosión, dichos factores aceleran notablemente el ataque.

1.4 Técnicas electroquímicas

Las técnicas experimentales utilizadas para medir la corrosión en las estructuras son las pruebas electroquímicas, las cuales permiten conocer las características físicas y eléctricas del sistema.

1.4.1 Potencial de corrosión

Cuando el acero se corroe en el concreto, existe sobre el acero una diferencia de potencial entre las áreas de media celda anódicas y las áreas de media celda catódicas. El potencial de corrosión de media celda puede medirse por comparación con una celda de referencia normalizada, la cual tiene un valor constante conocido. Es común usar como electrodo de referencia en mediciones de potencial de barras de acero en concreto el electrodo de Cobre/Sulfato de cobre saturado, el cual se denota con las siglas CSC. El criterio general para interpretar las mediciones de potencial, según la norma NMX- C495-ONNCC-2015, se muestra en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Criterio de evaluación de las mediciones de potenciales de media celda

Potencial de corrosión (E_{corr}) mV vs. Cu/CuSO ₄	Actividad de corrosión
Más negativo que -500	Corrosión severa
Más negativo que -350	90% de probabilidad de corrosión
Valores de -350 a -200	Incertidumbre
Más positiva que -200	10% de probabilidad de corrosión

Se utiliza el equipo denominado Gecor para determinar el potencial de media celda o potencial de corrosión del acero de refuerzo embebido en cada prisma. Los sensores de este equipo poseen electrodos de referencia de CSC, por lo que la medición obtenida fue la utilizada de manera directa en los registros obtenidos.

1.4.2 Velocidad de corrosión

Se llama velocidad de corrosión a la pérdida de metal por unidad de superficie y tiempo. Las unidades básicas son g/cm² día. Aunque la forma usual de definirla es a partir de mediciones de tipo electroquímico, en donde se estima la intensidad de

corriente del metal en el electrolito que está expuesto. Esta intensidad de corriente se define como i_{corr} y las unidades normalmente se expresan en la cantidad de corriente dividida entre el área de exposición del metal en el electrolito de exposición (en $\mu A/cm^2$). Una vez medido, este valor se transforma, a partir de la densidad del metal, en unidades de penetración de la corrosión (por ejemplo en mm/año o mpy –mils per year). Para estas pruebas, se utiliza el equipo Gecor, que emplea la técnica electroquímica de resistencia a la polarización lineal por el método de corriente confinada. Se ha demostrado que este equipo es el único que puede emplearse en pruebas de campo sobre estructuras de concreto porque confina el área del refuerzo cuya velocidad de corrosión se desea medir. La resistencia a la polarización es la habilidad de un material a ceder o ganar electrones, o la facilidad con la cual un metal tiende a sufrir o no corrosión. La relación entre la resistencia a la polarización y la velocidad de corrosión se definen en la ecuación 1:

$$i_{corr} = \frac{0.026}{R_p} \quad [1]$$

Donde:

- i_{corr} = Intensidad de corrosión en ($\mu A/cm^2$, mA/cm² o A/cm²)
 B = Constante que se obtiene de las pendientes de Tafel (0.026 para acero activo y 0.052 para acero pasivo)
 R_p = Resistencia a la polarización de un metal

La velocidad de corrosión se puede obtener a partir de la i_{corr} multiplicando ésta por un factor de 0.012, o se puede calcular empleando las leyes de Faraday, como se muestra en la ecuación 2:

$$i_{corr} * 11.6 = \frac{mm}{año} \quad [2]$$

El objetivo de este ensayo es determinar la velocidad a la cual el acero de refuerzo de una estructura de concreto pierde área de sección por corrosión. En la tabla 1.2 se definen los rangos de i_{corr} en función del nivel de corrosión que muestra el acero de refuerzo en concreto.

Tabla 1.2 Criterio de evaluación de la velocidad de corrosión

Velocidad de corrosión (i_{corr}) $\mu A/cm^2$	Nivel de corrosión
< 0.1	Despreciable
0.1 - 0.5	Moderado
0.5 - 1	Elevado
>1	Muy elevado

1.4.3 Resistencia eléctrica del concreto

La resistencia eléctrica del concreto depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del concreto, y en menor grado de la hidratación de la pasta y la presencia de sales disueltas en la fase acuosa. Esta se basa en variables como: tipo de cemento, adiciones inorgánicas, relación agua/cemento y porosidad de las estructuras, entre otras.

2 Antecedentes

El Proyecto Iberoamericano DURACON está enfocado principalmente en:

- Monitoreo de estaciones de campo en México con diferentes parámetros atmosféricos.
- Evaluación de los parámetros climático-ambientales, como humedad, relativa, temperatura, precipitación pluvial, velocidad del viento, radiación solar y tiempo de insolación de las estaciones.
- Obtención periódica de datos de velocidad de corrosión, potencial de corrosión del acero de refuerzo y resistencia eléctrica del concreto.
- Estudio de las causas y mecanismos de deterioro, cuando aparezcan.
- Creación de un mapa de agresividad del medio ambiente en los países que forman parte del proyecto.

A nivel mundial, se tienen reportes del Proyecto DURACON durante los primeros seis años de exposición de las probetas fabricadas para llevar a cabo el monitoreo de las variables electroquímicas en el acero de refuerzo (Troconis *et al.*, 2009, 2015, 2016), antecedente importante en cuanto a los objetivos que busca alcanzar este proyecto.

En México, varios autores, entre ellos, López Celis (2006) y Moreno (2009) reportan los resultados de carbonatación en el concreto, así como de corrosión en el acero de refuerzo de las probetas del Proyecto DURACON en los primeros cuatro años de exposición.

El organismo responsable de llevar a cabo las actividades de este proyecto en México es el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), en coordinación con un grupo de investigadores, conformado por diversas instituciones públicas y privadas, dentro de las cuales se encuentran: el Centro Tecnológico del Concreto (CTC) del grupo Holcim La Farge México; el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ); la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); la Universidad Autónoma de Tamaulipas (UAT); la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH); la Universidad Veracruzana (UV); el Tecnológico Regional de Oaxaca (ITox); la Universidad Autónoma de Campeche (UACamp) y el CINVESTAV Unidad Mérida.

Con la finalidad de cumplir con lo anterior, el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) cuenta con 13 estaciones de monitoreo expuestas a lo largo del territorio nacional, (ver figura 1.1), de las cuales se obtienen datos de velocidad de corrosión, potencial de corrosión, resistividad eléctrica, determinación de la concentración de iones cloruro y profundidad de carbonatación, así como datos meteorológicos como: humedad relativa, temperatura, precipitación pluvial, velocidad del viento, radiación solar, tiempo de humectación y tiempo de insolación, al igual que el contenido de compuestos de cloruros, azufre y dióxido de carbono en la atmósfera.



Figura 2.1 Estaciones de monitoreo en el proyecto DURACON México

De las 15 estaciones mostradas en la figura 2.1, las estaciones de Chihuahua y Mexicali (Mx3 y Mx10) desaparecieron en los años 2011 y 2013, respectivamente, por diferentes motivos ajenos al proyecto. El responsable de la estación Mx3 se cambió de institución y las personas que se quedaron en su lugar las desecharon; mientras que el edificio en donde se encontraban los especímenes de la estación Mx10 se colapsó durante un sismo en la localidad durante el año de 2013 y los especímenes se limpiaron como parte de los escombros del edificio colapsado. Así es como, de las 15 estaciones instaladas, 13 funcionan en la actualidad. El presente reporte muestra los resultados de 10 de esas estaciones, ya que de la estación Chihuahua no se tienen datos; las tres de Campeche no entregaron información aún, y la de Mexicali presenta los que se pudieron recabar antes del colapso del edificio.

2.1 Fichas de identificación de las estaciones de monitoreo

A continuación, se presentan las fichas de identificación de las estaciones de monitoreo del Proyecto DURACON, listadas en orden alfabético por nombre de la estación. De igual manera, se presentan fotografías tomadas durante la visita de cinco estaciones, quedando pendiente la visita de las demás durante la continuación del proyecto.

A las estaciones Mx10 y Mx3, desaparecidas ya, no fue posible tomarles fotografías, por lo que no se les incluye en este trabajo.

Las estaciones Mx11, Mx12 y Mx13, correspondientes a Campeche, no proporcionaron la información pertinente para ser incluidas en esta publicación.

Nombre de la estación:	Mérida
Código de la estación:	Mx2
Ciudad:	Mérida
Estado:	Yucatán
País:	México
Ubicación de la estación:	Universidad Autónoma de Yucatán
Dirección de la estación:	
Fecha de instalación de la estación:	
Atmósfera aparente:	Urbana
Responsable de la estación:	IMT y el Dr. Eric I. Moreno



Figura 2.2 Levantamiento fotográfico de la estación Mx2 – Mérida.

Nombre de la estación:	México, D.F.
Código de la estación:	Mx7
Ciudad:	Distrito Federal
Estado:	Distrito Federal
País:	México
Ubicación de la estación:	Universidad Nacional Autónoma de México
Dirección de la estación:	Edificio "D" de la Facultad de Química de la UNAM, México, D.F., CP 04510
Fecha de instalación de la estación:	02/04/2003
Atmósfera aparente:	Urbana industrial
Responsable de la estación:	IMT y el Dr. Joan Genescá Llongueras



Figura 2.3 Levantamiento fotográfico de la estación Mx7 – México.

Nombre de la estación:	Morelia
Código de la estación:	Mx5
Ciudad:	Morelia
Estado:	Michoacán
País:	México
Ubicación de la estación:	Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Dirección de la estación:	Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH, Morelia, Michoacán
Fecha de instalación de la estación:	22/10/2003
Atmósfera aparente:	Urbana
Responsable de la estación:	IMT y el Dr. Wilfrido Martínez Molina



Figura 2.4 Levantamiento fotográfico de la estación Mx5 – Morelia.

Nombre de la estación:	Oaxaca
Código de la estación:	Mx4
Ciudad:	Oaxaca
Estado:	Oaxaca
País:	México
Ubicación de la estación:	Instituto Tecnológico de Oaxaca
Dirección de la estación:	Francisco I. Madero, Instituto Tecnológico de Oaxaca, 68030 Oaxaca, Oax.
Atmósfera aparente:	Urbana
Responsable de la estación:	IMT y el Dr. Esteban López Vázquez



Figura 2.5 Levantamiento fotográfico de la estación Mx5 – Oaxaca.

Nombre de la estación:	Progreso
Código de la estación:	Mx2
Ciudad:	Progreso
Estado:	Yucatán
País:	México
Ubicación de la estación:	CINVESTAV Unidad Mérida
Dirección de la estación:	Km 6 antigua, Carr. Mérida - Progreso, Loma Bonita, 97310 Mérida, Yuc.
Atmósfera aparente:	Urbana
Responsable de la estación:	IMT y el Dr. Pedro Castro



Figura 2.6 Levantamiento fotográfico de la estación Mx2 – Progreso.

Nombre de la estación:	Querétaro
Código de la estación:	Mx8
Ciudad:	Santiago de Querétaro
Estado:	Querétaro
País:	México
Ubicación de la estación:	Estación Meteorológica de la CNA Querétaro
Dirección de la estación:	Carretera Queretaro-Galindo Km. 12, Sanfandila, Pedro Escobedo, Querétaro. CP 76700
Fecha de instalación de la estación:	03/05/2003
Atmósfera aparente:	Urbana
Responsable de la estación:	IMT



Figura 2.7 Levantamiento fotográfico de la estación Mx8 – Querétaro.

Nombre de la estación:	Tampico
Código de la estación:	Mx15
Ciudad:	Tampico
Estado:	Tamaulipas
País:	México
Ubicación de la estación:	Universidad Autónoma de Tamaulipas
Dirección de la estación:	Matamoros 8 y 9 Col. Centro C.P. 87000; Victoria, Tamaulipas
Atmósfera aparente:	Urbana
Responsable de la estación:	IMT y el Dr. Ricardo Tobías



Figura 2.8 Levantamiento fotográfico de la estación Mx15 – Tampico.

Nombre de la estación:	Toluca
Código de la estación:	Mx9
Ciudad:	Toluca
Estado:	Estado de México
País:	México
Ubicación de la estación:	Centro Tecnológico de Cementos APASCO
Dirección de la estación:	Prolongación Isidro Fabela Norte #1517 Col. San Juan de la Cruz, Toluca, México.
Fecha de instalación de la estación:	01/05/2003
Atmósfera aparente:	Urbana Industrial
Responsable de la estación:	IMT, Centro Tecnológico del Concreto de APASCO e ININ



Figura 2.9 Levantamiento fotográfico de la estación Mx9 – Toluca.

Nombre de la estación:	Veracruz
Código de la estación:	Mx6
Ciudad:	Veracruz
Estado:	Veracruz
País:	México
Ubicación de la estación:	Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana
Dirección de la estación:	Av. Juan Pablo II s/n entre Ruiz Cortines y Reyes Heróles, Boca del Río, Veracruz, CP 294294
Fecha de instalación de la estación:	26/06/2003
Atmósfera aparente:	Urbana marina
Responsable de la estación:	IMT y el Ing. Eduardo Ariza Aguilar



Figura 2.10 Levantamiento fotográfico de la estación Mx6 – Veracruz.

Nombre de la estación:	Xalapa
Código de la estación:	Mx14
Ciudad:	Xalapa
Estado:	Veracruz
País:	México
Ubicación de la estación:	Universidad Veracruzana
Dirección de la estación:	Lomas del Estadio s/n, edificio «A», 3er. piso, C.P. 91000; Xalapa, Veracruz, México
Atmósfera aparente:	Urbana
Responsable de la estación:	IMT y el Dr. Miguel Baltazar Zamora



Figura 2.11 Levantamiento fotográfico de la estación Mx14 – Xalapa.

3 Metodología

3.1 Elaboración de probetas de concreto reforzado

Se prepararon seis probetas de concreto con acero de refuerzo (tres con una relación $a/c = 0.45$ y tres con una relación $a/c = 0.65$) para cada estación de monitoreo, las cuales tienen las siguientes características:

1. Tipo de cemento: Portland I (superficie específica Blaine a 3600 y 8% de C3A)
2. Árido siliceo triturado de 19 mm (grosso)
3. Arena cuarzosa
4. Relación a/c : 0.45 y 0.65
5. Adición de plastificante 0.3% vs. cemento (tipo Plastiment VZ de Sika)
6. Revenimiento de $10 \text{ cm} \pm 1.0 \text{ cm}$
7. Encofrado en madera resinosa
8. Curado bajo agua por 7 días

En la figura 3.1 se muestran las dimensiones de diseño de los especímenes de concreto reforzado, a saber: 15 cm de ancho, 15 cm de altura y 30 cm de largo. Dichos especímenes se reforzaron con acero del núm. 3 ($\varnothing = 3/8''$) con $f_y = 4,200 \text{ kg/cm}^2$, colocándose en forma simétrica en tres distintos recubrimientos de 1.5, 2 y 3 cm, tal como se muestra en la figura 3.2.

Las estaciones de monitoreo se construyeron con paneles metálicos para sostener las probetas de concreto a 1.20 m por encima del suelo, y orientando una cara de la probeta hacia la dirección de los vientos predominantes A tal cara se le denominó C1, mientras que la cara resguardada se denominó C2, y la cara de la dirección del colado se colocó como base. En la figura 3.3 se muestra esta orientación y la designación de las caras de exposición.

3.2 Monitoreo de variables meteorológicas de las estaciones de exposición natural

Los datos de temperatura, precipitación y humedad relativa se obtienen directamente de campo, mediante estaciones meteorológicas automáticas que conforman la Red Nacional de Observación, mismos que proporciona la Comisión Nacional del Agua (Conagua) y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

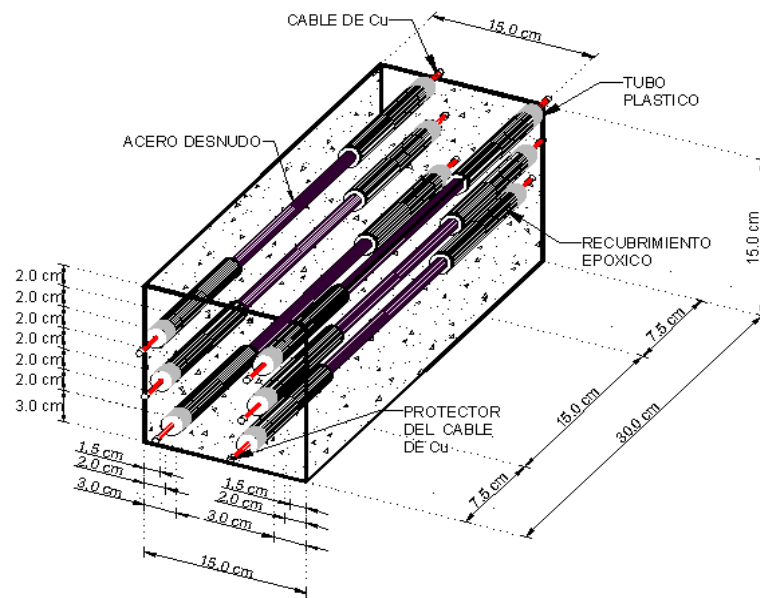


Figura 3.1 Geometría de los especímenes de concreto utilizados (López Celis et al., 2006).

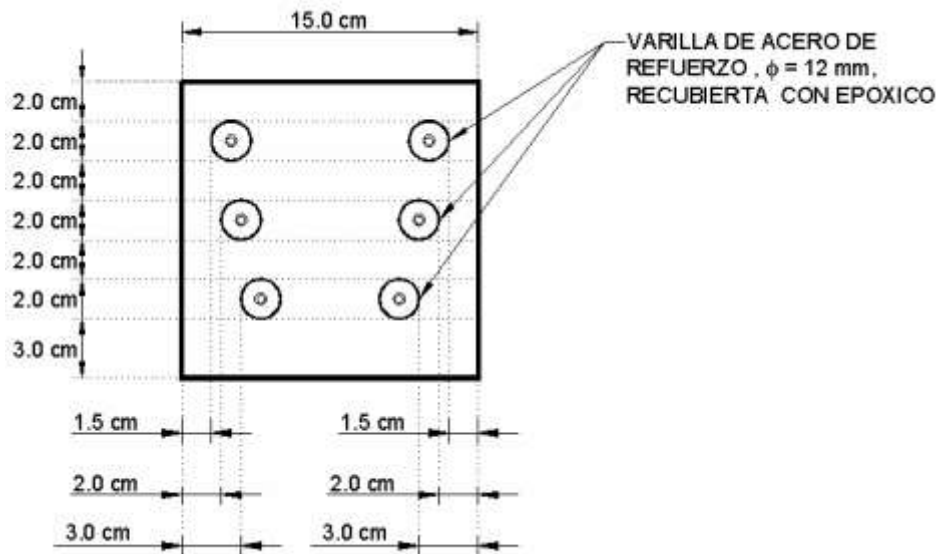


Figura 3.2 Detalle de la distribución del acero de refuerzo en los especímenes (López Celis et al., 2006).

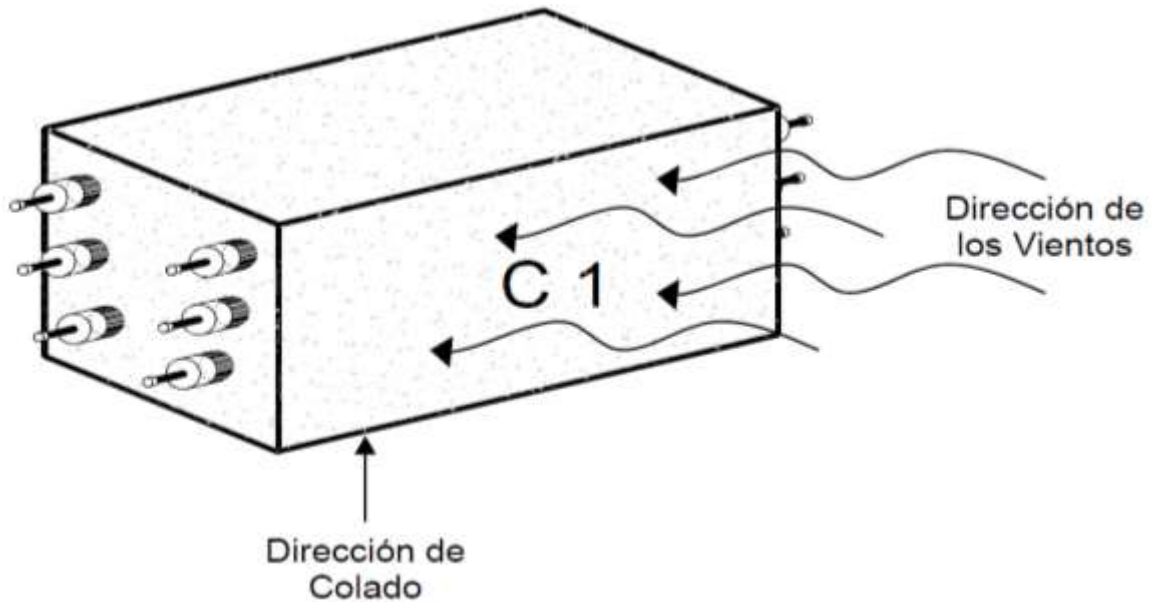


Figura 3.3 Orientación de los especímenes colocados en las estaciones de exposición natural.

3.3 Monitoreo de variables electroquímicas de corrosión en el acero de refuerzo

La medición del potencial de corrosión (E_{corr}), la velocidad de corrosión (i_{corr}) y la resistencia eléctrica del concreto se determinaron al menos una vez al año, empleando el Gecor 6™, el cual emplea la técnica de resistencia a la polarización por el método de corriente confinada. Las mediciones se llevan a cabo de forma automática, en un tiempo de 2 a 5 minutos aproximadamente. Investigadores del Área de Materiales de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural (CIVIE) del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) se encargan de efectuar las mediciones correspondientes, así como de registrarlas y comunicarlas.

El corrosímetro Gecor 6™ está compuesto por tres elementos principales:

- Unidad de medida LG-ECM-06, que alberga el microprocesador para control del sistema.
- Sensor LG-ECS-06A para la medida de la intensidad de corrosión. Este sensor contiene tres electrodos de cobre/sulfato de cobre, un contraelectrodo central y un contraelectrodo exterior, ambos de acero inoxidable. Éste permite también la medida del potencial de corrosión en las estructuras.

- El sensor LG-ECS-06B, que contiene un electrodo de cobre/sulfato de cobre y un contraelectrodo de acero inoxidable, sirve para medir la resistividad eléctrica del concreto.

El procedimiento de medición fue el siguiente:

- Se satura la superficie de todos los especímenes con acero de refuerzo con agua potable.
- Se inicia con las mediciones de cada espécimen con la cara expuesta (C1), comenzando con la varilla con 3.0 de recubrimiento, enseguida la de 2.0 cm, y se termina con la de 1.5 cm.
- Se continúa con la cara resguardada (C2), comenzando de forma inversa: primero con la de 1.5 cm, 2.0 cm, y finalizando con la de 3.0 cm.
- Se registran los datos arrojados por el equipo.

La figura 3.4 muestra el formato para el registro de los datos electroquímicos obtenidos en cada estación de monitoreo.

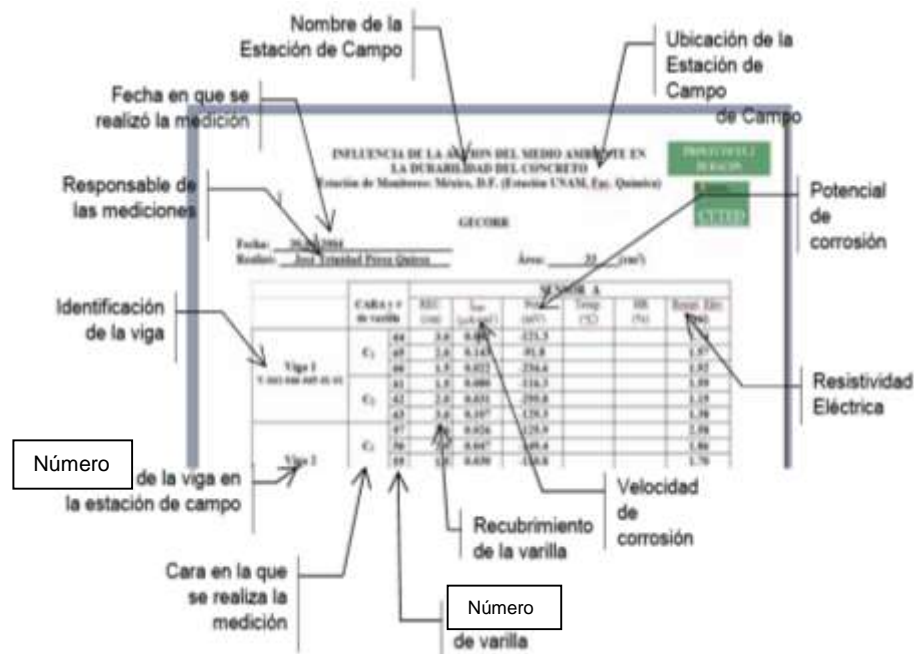


Figura 3.4 Formato de la recolección de datos tomados de las probetas de concreto reforzado.

4 Resultados

Las estaciones de monitoreo existentes, ubicadas en zonas urbanas, son Mérida, México, Morelia, Oaxaca, Querétaro, Toluca y Xalapa; las que se ubican en zona marina son las tres estaciones de Campeche, y las de Progreso, Tampico y Veracruz.

A efecto de realizar una comparación entre los cambios que se han ido obteniendo, se toman como referencia dos estaciones: una urbana y otra marina.

A fin de representar la zona urbana, se tomó como ejemplo la estación de Querétaro; para representar la zona marina, se muestran los resultados de la estación Veracruz. En el anexo A se encuentran los datos de las estaciones restantes con que se cuenta.

4.1 Estaciones de monitoreo en zonas urbanas

4.1.1 Variables ambientales de la estación Querétaro

En las figuras 4.1 a 4.7, se muestran las gráficas del registro de las variables ambientales correspondientes a la estación de Querétaro, cuyo periodo de registro comprendió de enero 2003 a diciembre 2017.

4.1.1.1 Temperatura

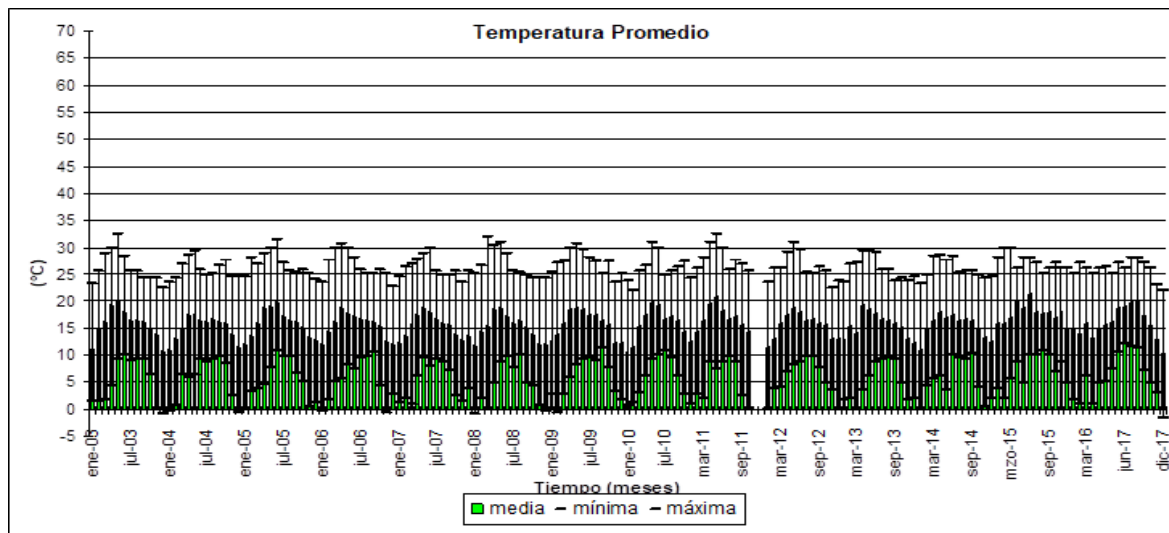


Figura 4.1 Valores mensuales de la temperatura promedio de la estación (Mx8) Querétaro

4.1.1.2 Humedad relativa

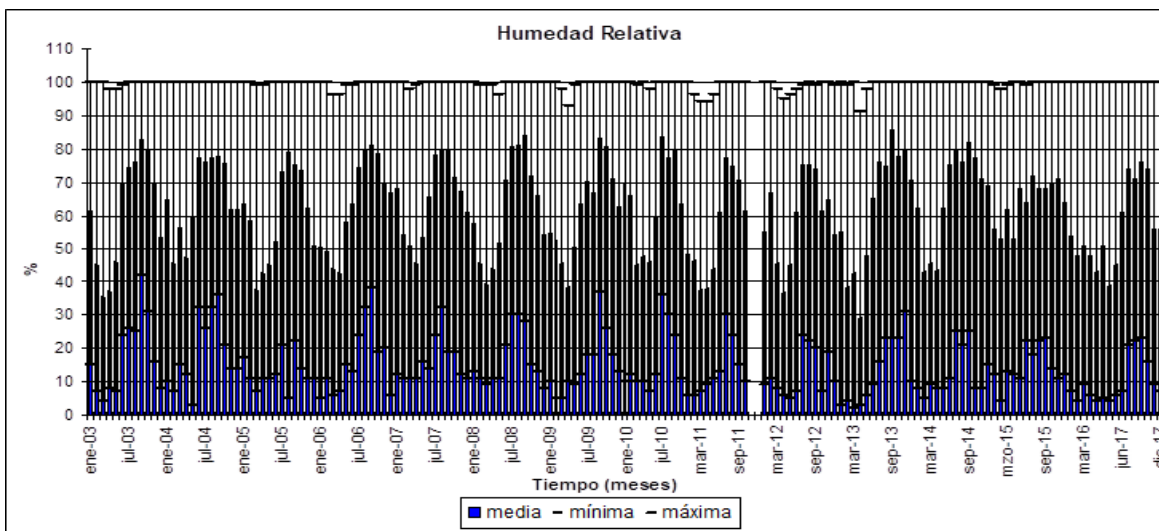


Figura 4.2 Valores mensuales de la humedad relativa de la estación (Mx8) Querétaro

4.1.1.3 Tiempo de humectación

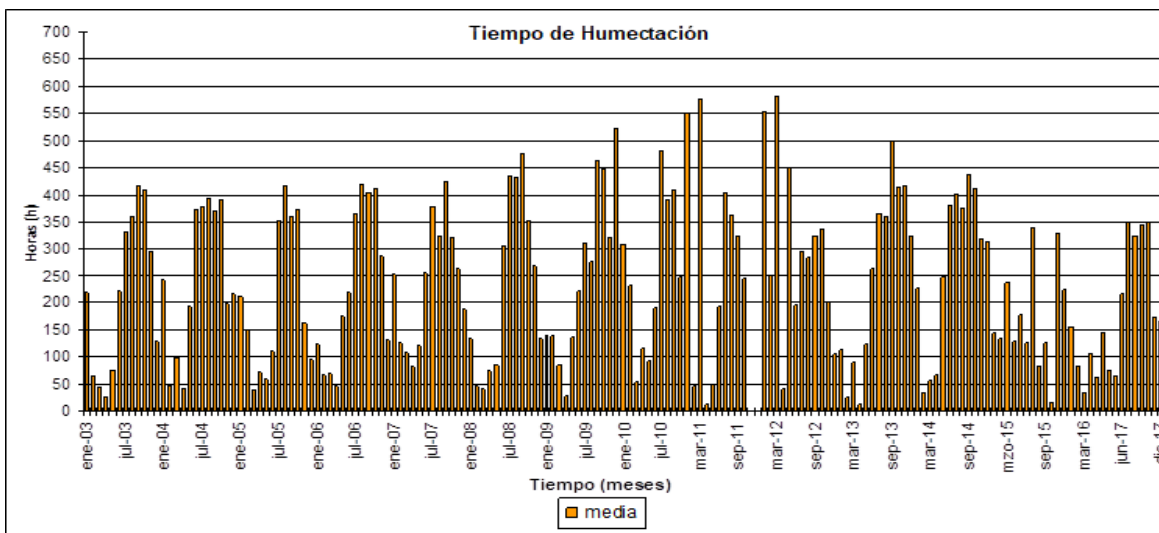


Figura 4.3 Valores mensuales del tiempo de humectación de la estación (Mx8) Querétaro

4.1.1.4 Precipitación pluvial

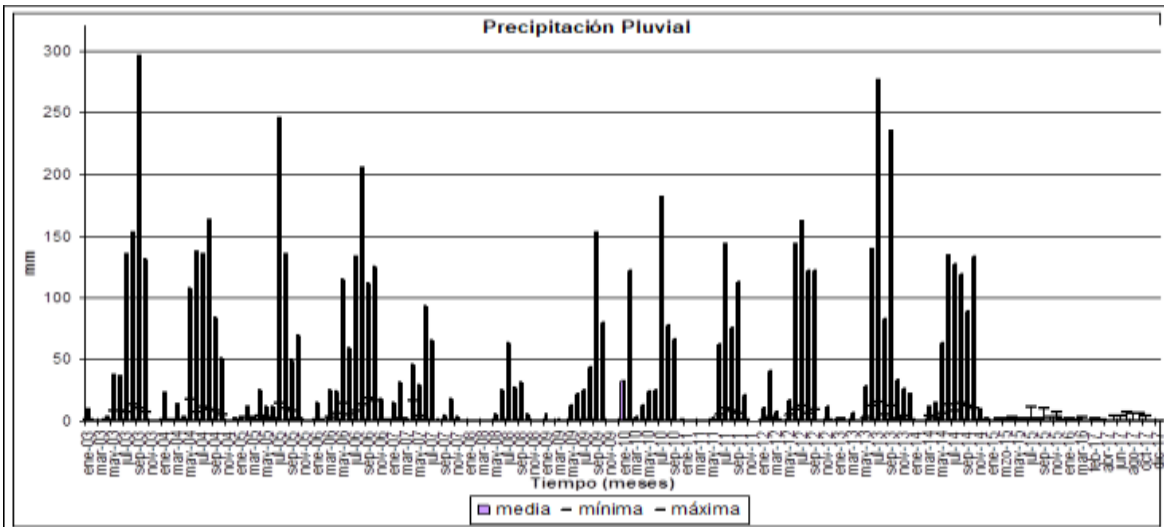


Figura 4.4 Valores mensuales de la precipitación pluvial de la estación (Mx8) Querétaro

4.1.1.5 Velocidad del viento

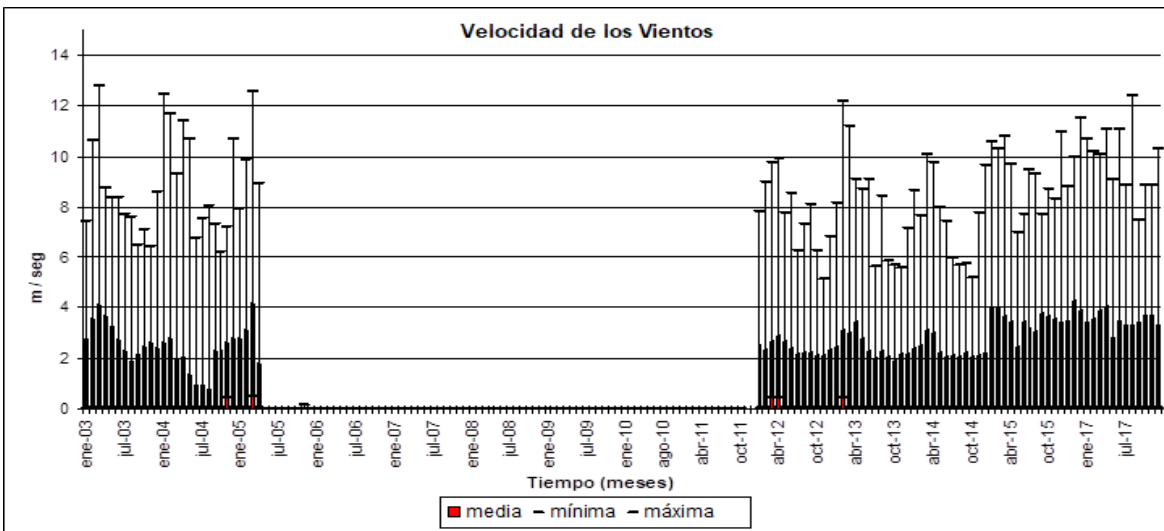


Figura 4.5 Valores mensuales de la velocidad del viento de la estación (Mx8) Querétaro

4.1.1.6 Dirección del viento

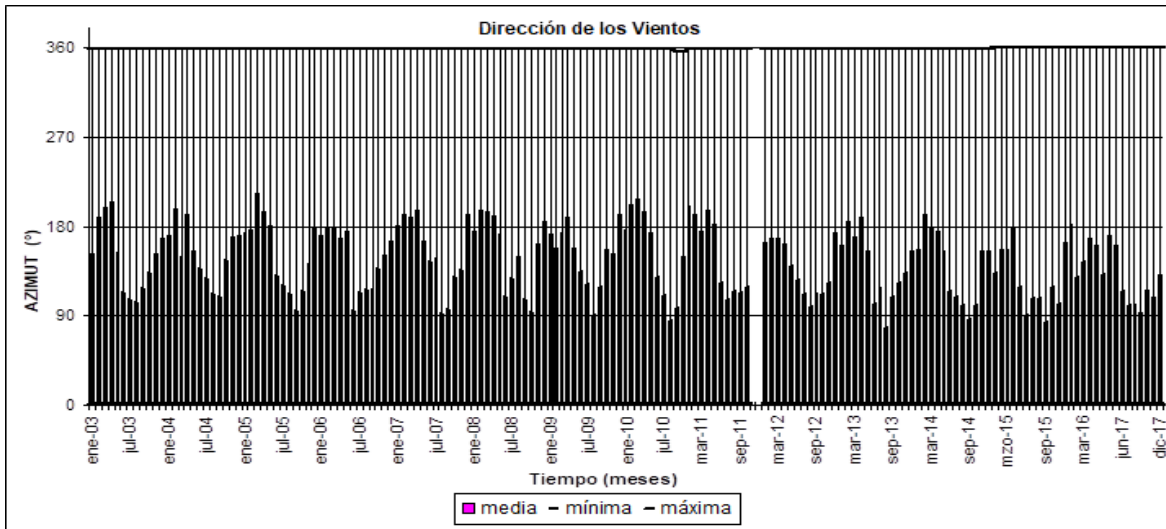


Figura 4.6 Valores mensuales de la dirección del viento de la estación (Mx8) Querétaro

4.1.1.7 Radiación solar

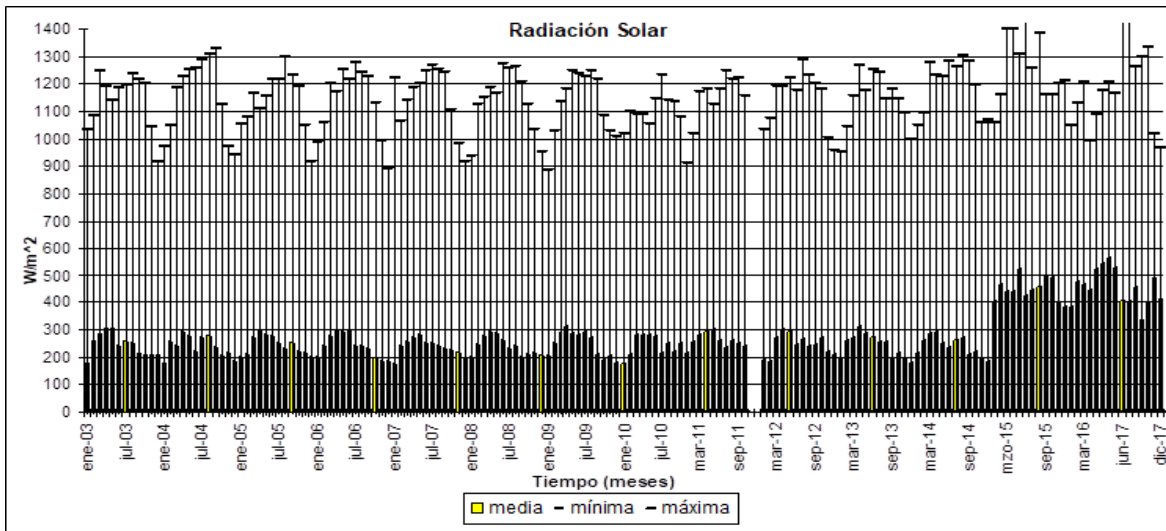


Figura 4.7 Valores mensuales de la radiación solar de la estación (Mx8) Querétaro

4.2 Estaciones de monitoreo en zonas marinas

4.2.1 Variables ambientales en la estación Veracruz

En las figuras 4.8 a 4.14, se muestran las gráficas del registro de las variables ambientales correspondientes a la estación de Veracruz, cuyos datos fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional. El registro de estos datos comprendió de enero 2003 a noviembre 2017.

4.2.1.1 Temperatura

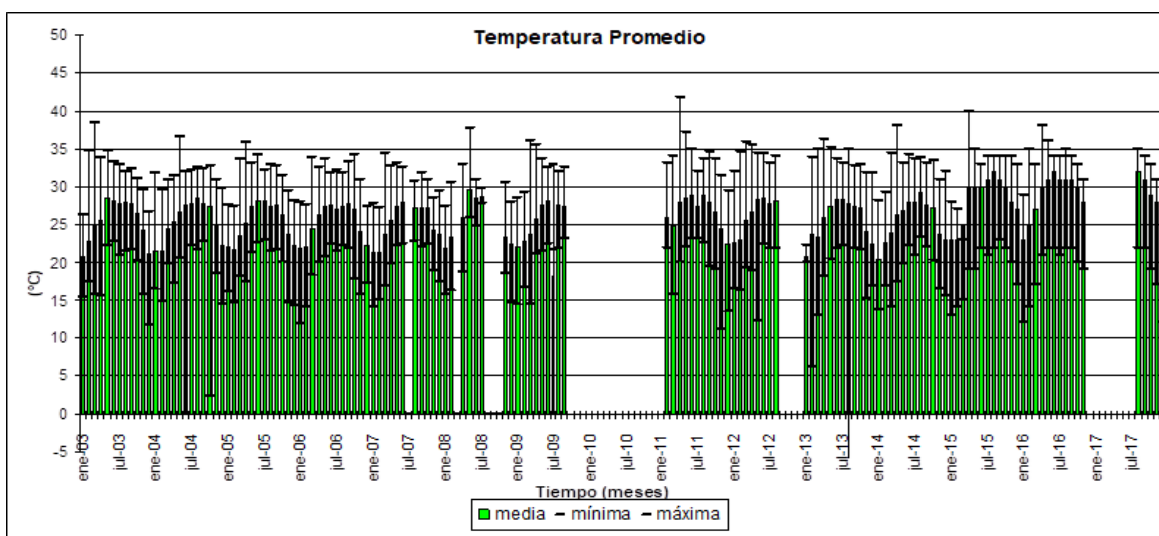


Figura 4.8 Valores mensuales de la temperatura promedio de la estación (Mx6) Veracruz

4.2.1.2 Humedad relativa

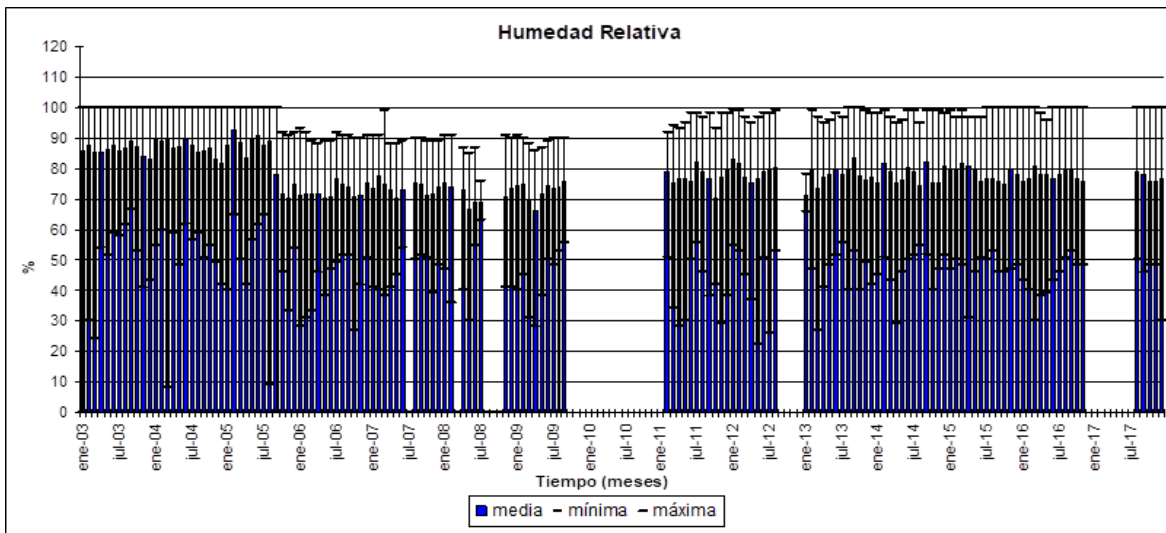


Figura 4.9 Valores mensuales de la humedad relativa de la estación (Mx6) Veracruz

4.2.1.3 Tiempo de humectación

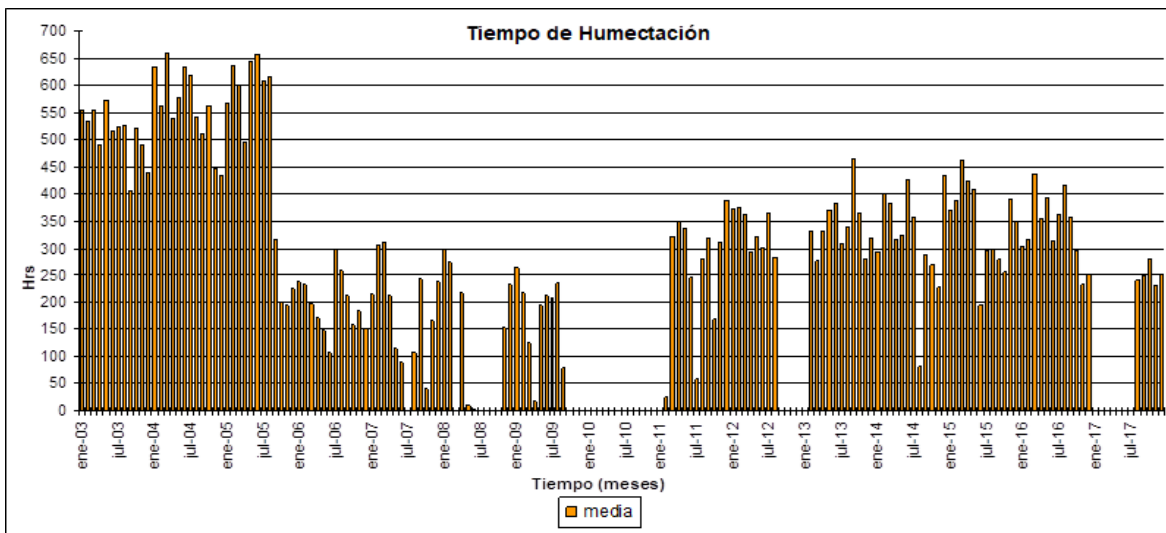


Figura 4.10 Valores mensuales del tiempo de humectación de la estación (Mx6) Veracruz

4.2.1.4 Precipitación pluvial

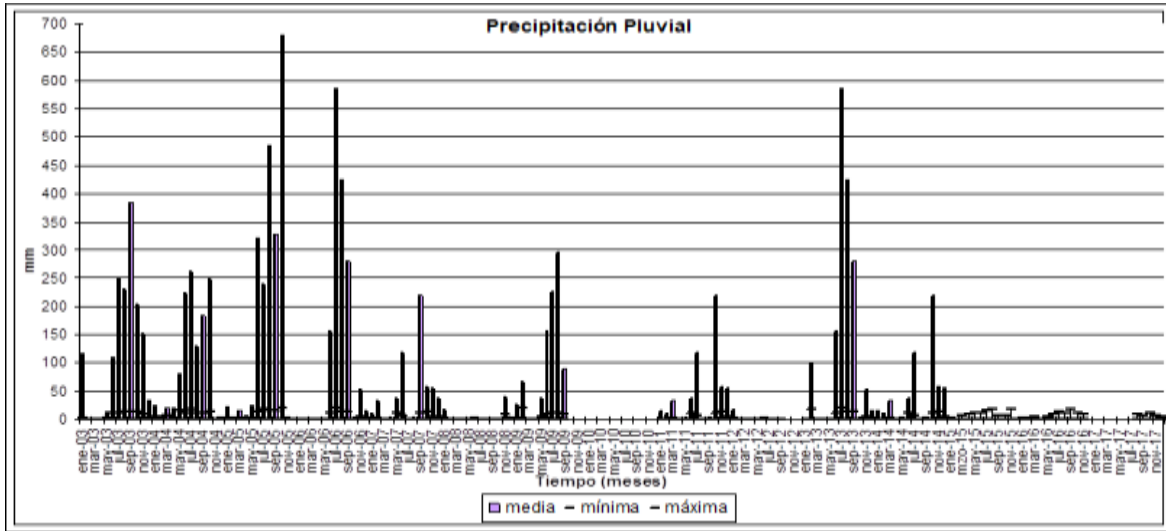


Figura 4.11 Valores mensuales de la precipitación pluvial de la estación (Mx6) Veracruz

4.2.1.5 Velocidad del viento

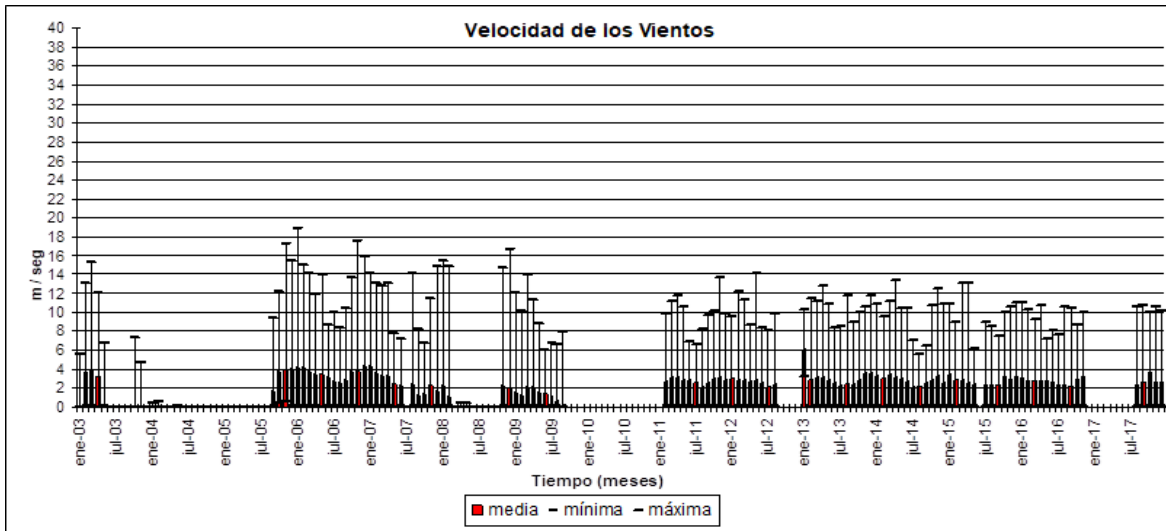


Figura 4.12 Valores mensuales de la velocidad de los vientos de la estación (Mx6) Veracruz

4.2.1.6 Dirección del viento

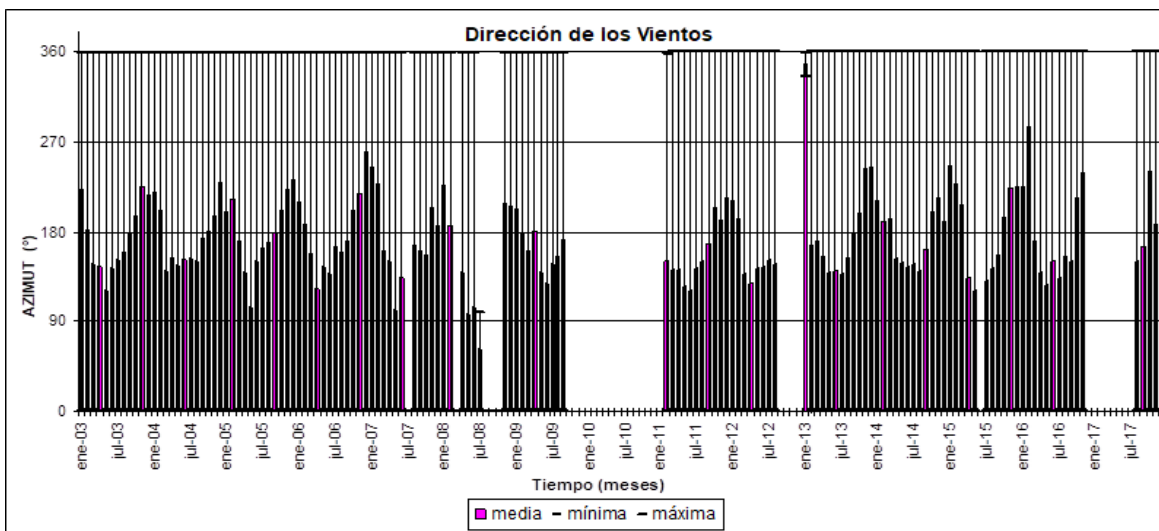


Figura 4.13 Valores mensuales de la dirección de los vientos de la estación (Mx6) Veracruz

4.2.1.7 Radiación solar

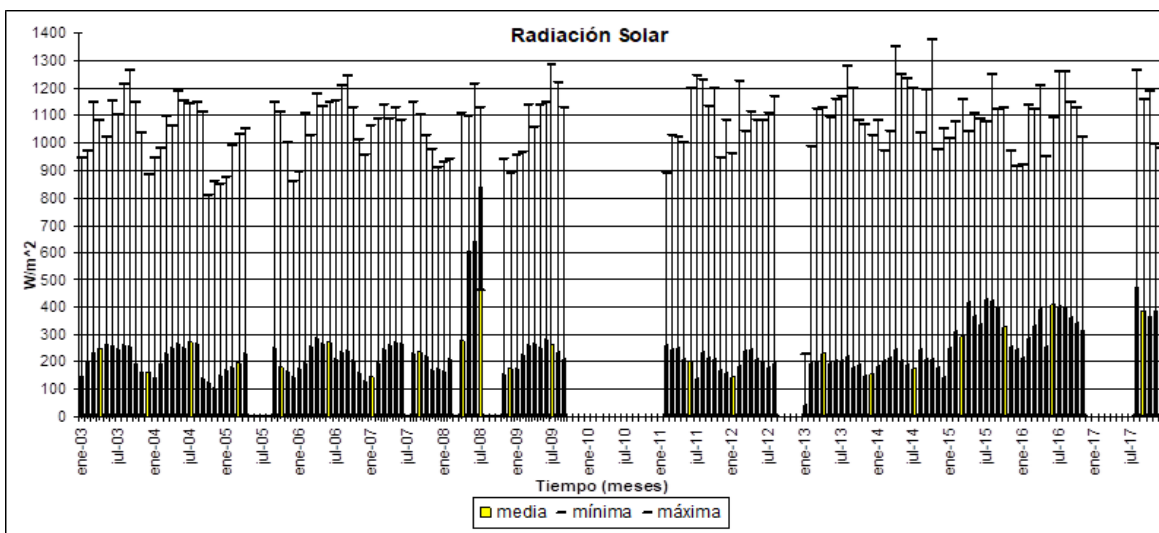


Figura 4.14 Valores mensuales de la radiación solar de la estación (Mx6) Veracruz

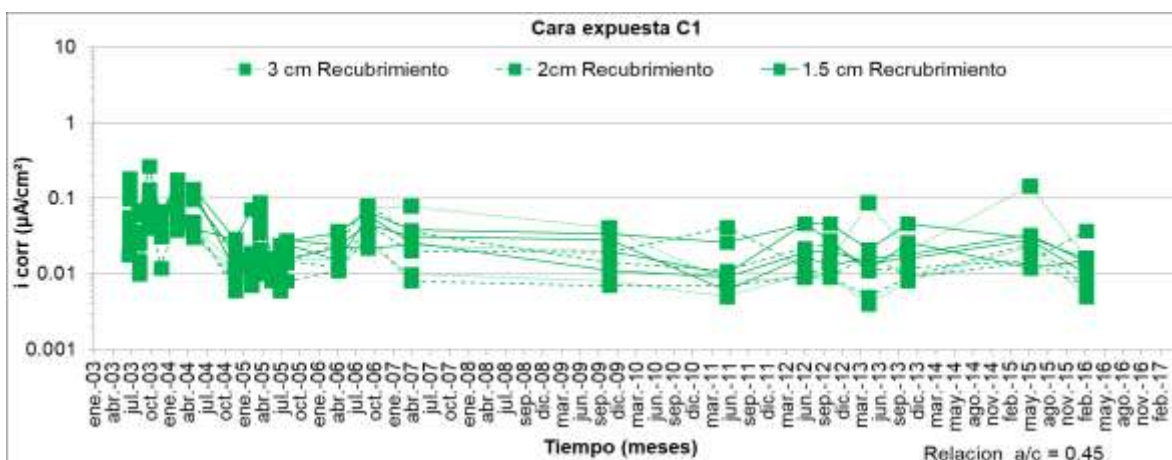
4.3 Variables electroquímicas

Al igual que los datos de las estaciones meteorológicas, los valores de las variables electroquímicas que se presentan a continuación corresponden a las estaciones de Querétaro, como urbana, y Veracruz, como estación marina. Las gráficas de los valores electroquímicos de las estaciones con que se cuenta se encuentran en el anexo B.

4.3.1 Estación Querétaro

4.3.1.1 Velocidad de corrosión

En las figuras 4.15 a 4.18, se presentan las gráficas de los datos relativos a la velocidad de corrosión de las probetas con la cara expuesta (C1) y resguardada (C2), fabricadas con sus dos relaciones $a/c = 0.45$ y $a/c = 0.65$.



**Figura 4.15 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. tiempo para cara expuesta C1
Relación a/c : 0.45**

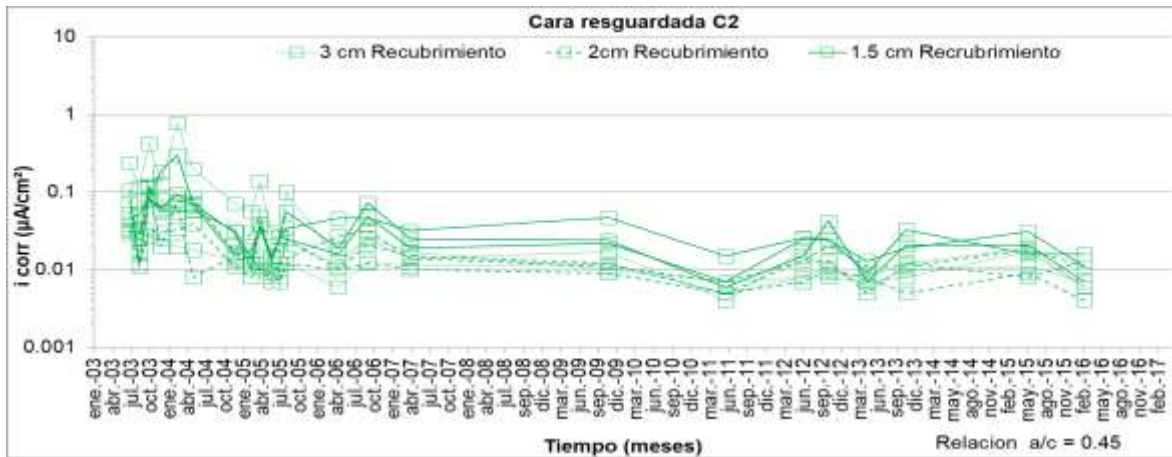


Figura 4.16 Velocidad de corrosión (icorr) vs. tiempo para cara resguardada C2 – Relación a/c: 0.45

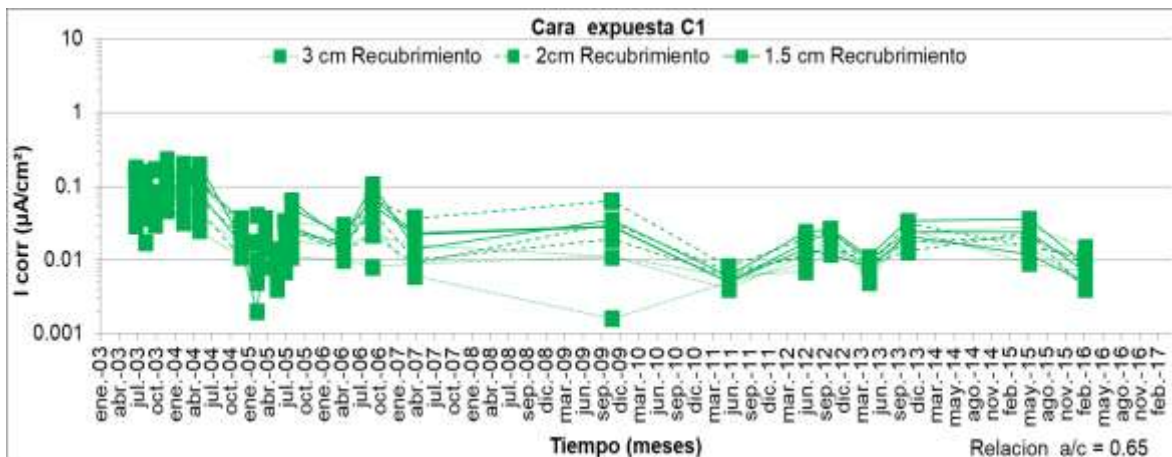


Figura 4.17 Velocidad de corrosión (icorr) vs. tiempo para cara expuesta C1 Relación a/c: 0.65

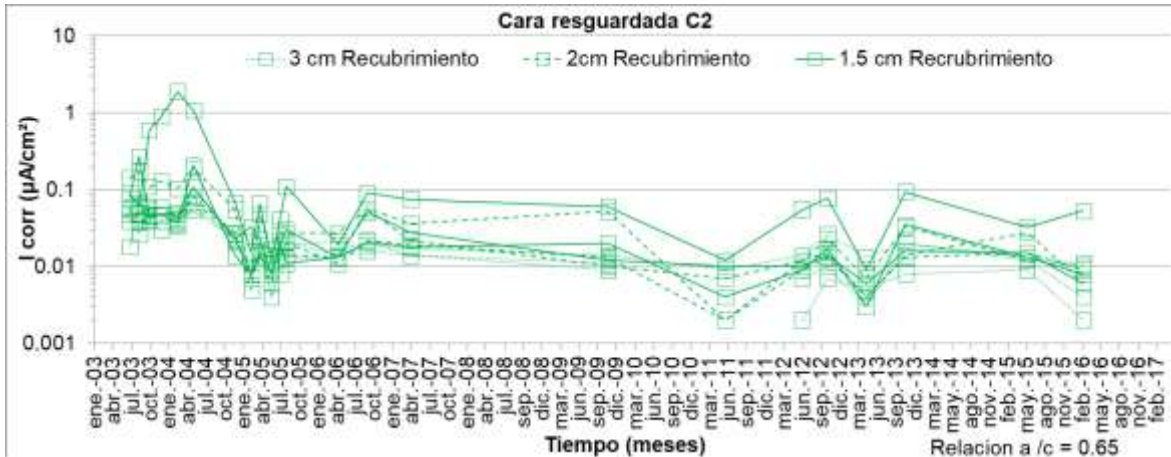


Figura 4.18 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. tiempo para cara resguardada C2 – Relación a/c: 0.65

4.3.1.2 Potencial de corrosión

En las figuras 4.19 a 4.22, se muestran las gráficas con los datos correspondientes al comportamiento del potencial de corrosión en las caras expuestas (C1) y resguardadas (C2) de las probetas con recubrimiento 1.5, 2 y 3 cm, con las relaciones a/c de 0.45 y a/c = 0.65, durante los años de exposición en la estación de Querétaro.

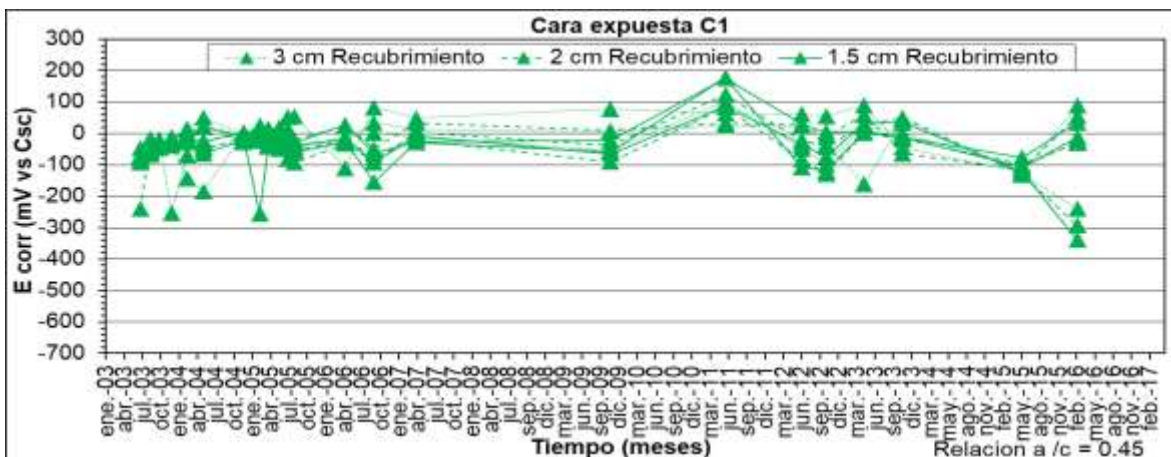


Figura 4.19 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. tiempo para cara expuesta C1 Relación a/c: 0.45

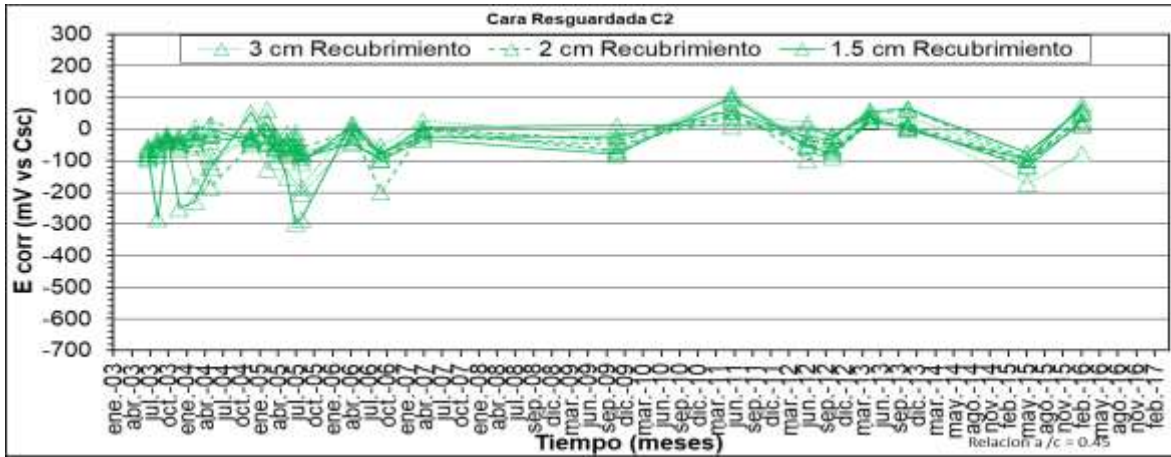


Figura 4.20 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. tiempo para cara resguardada C2 – Relación a/c: 0.45

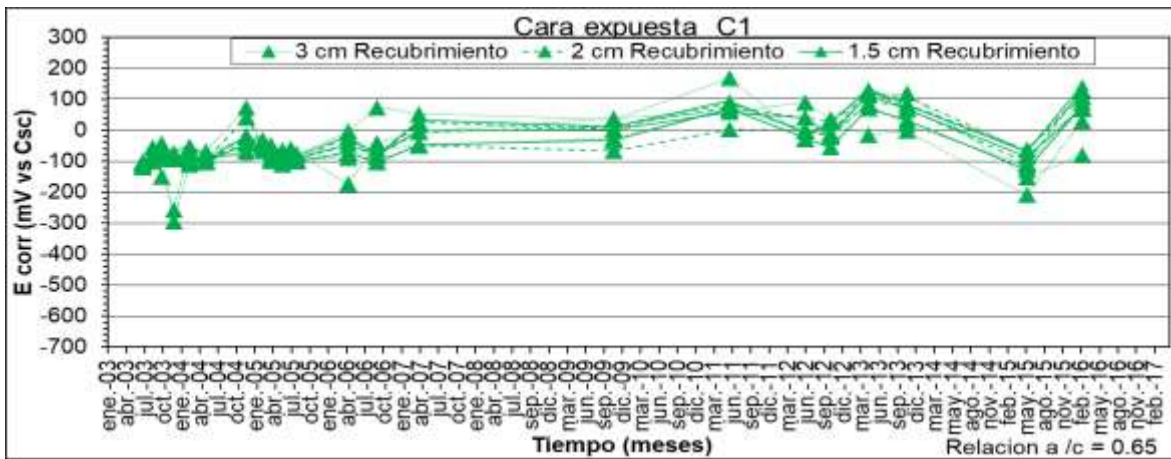


Figura 4.21 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. tiempo para cara expuesta C1 Relación a/c: 0.65

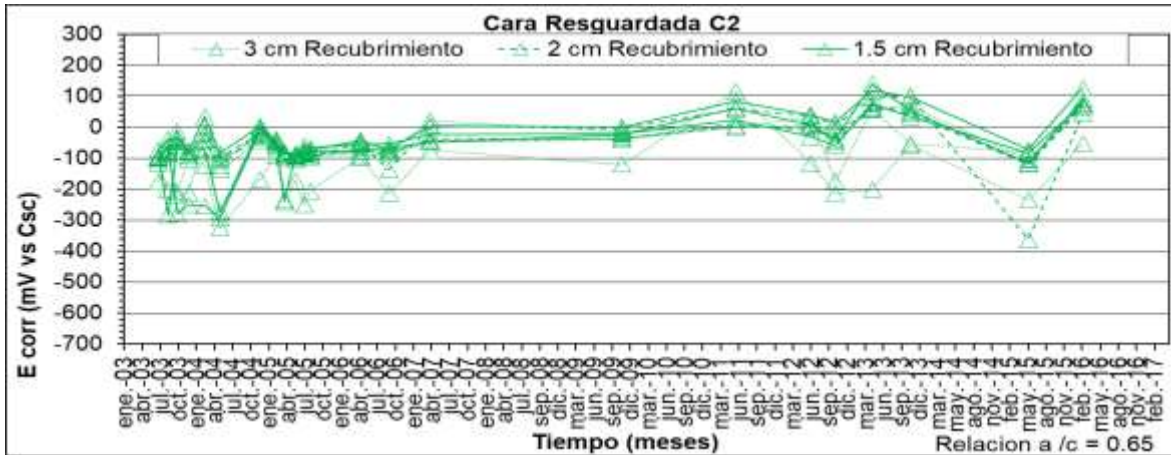


Figura 4.22 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. tiempo para cara resguardada C2 – Relación a/c: 0.65

4.3.1.3 Resistencia eléctrica

En las figuras 4.23 a 4.26, se presentan las gráficas con los datos relativos a la resistencia eléctrica de las probetas con la cara expuesta (C1) y resguardada (C2), fabricadas con las dos relaciones a/c = 0.45 y a/c = 0.65.

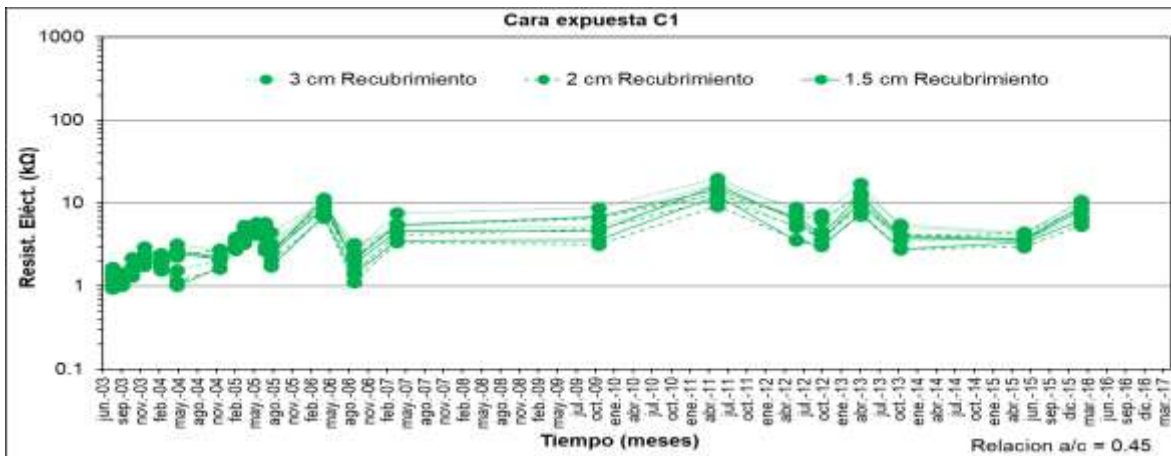


Figura 4.23 Resistencia eléctrica (Resist. Eléct) vs. tiempo para cara expuesta C1 – Relación a/c: 0.45

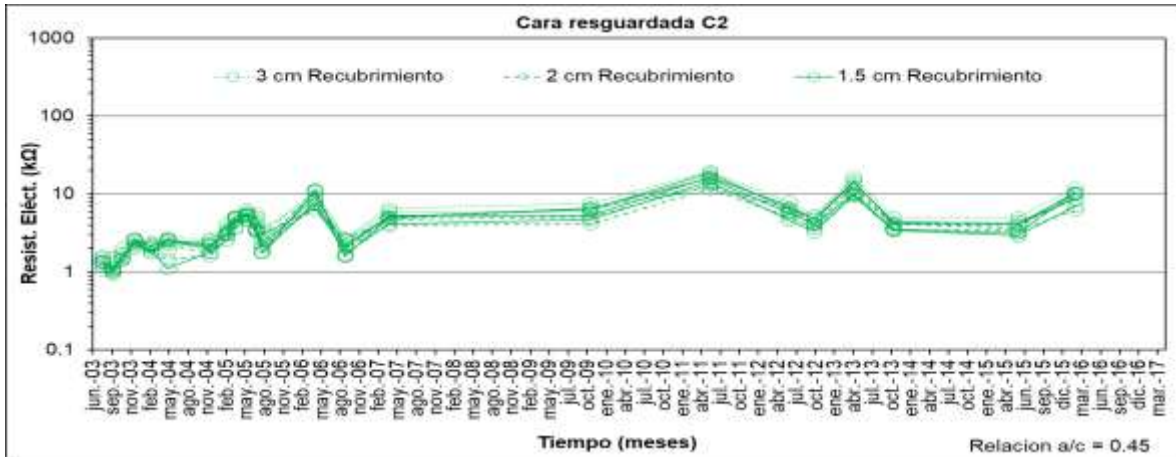


Figura 4.24 Resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) vs. tiempo para cara resguardada C2 – Relación a/c: 0.45

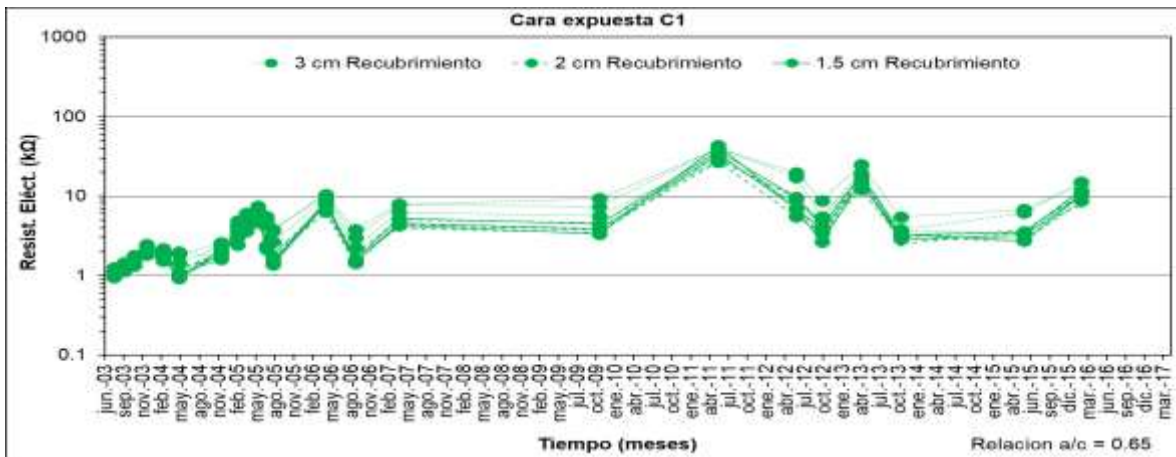


Figura 4.25 Resistencia eléctrica (Resist. Eléct) vs. tiempo para cara expuesta – C1 Relación a/c: 0.65

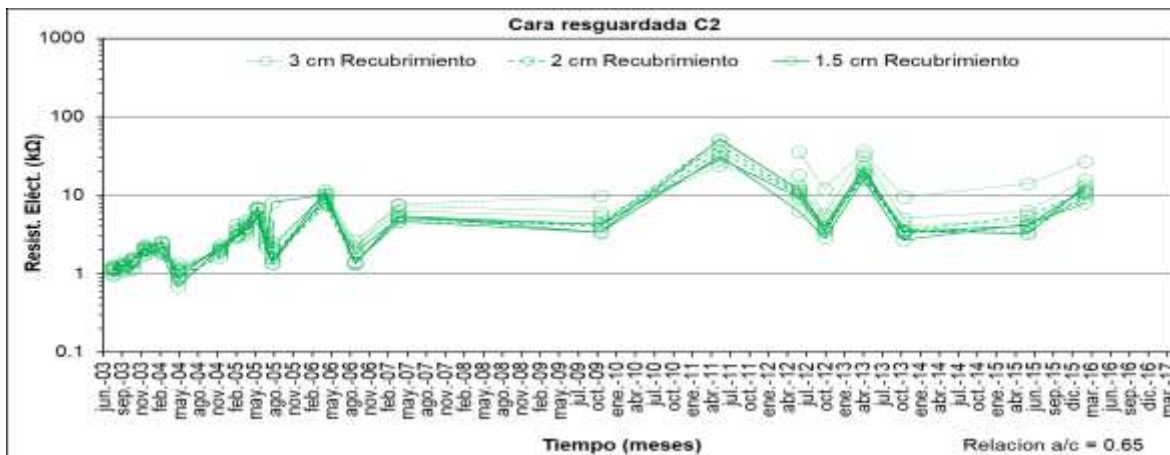


Figura 4.26 Resistencia eléctrica (Resist. Eléct) vs. tiempo para cara resguardada C2 – Relación a/c: 0.65

4.3.2 Estación Veracruz

4.3.2.1 Velocidad de corrosión

En las figuras 4.27 al 4.30, se presentan las gráficas de los datos relativos a la velocidad de corrosión de las probetas con la cara expuesta (C1) y resguardada (C2), fabricadas con sus dos relaciones $a/c = 0.45$ y $a/c = 0.65$.

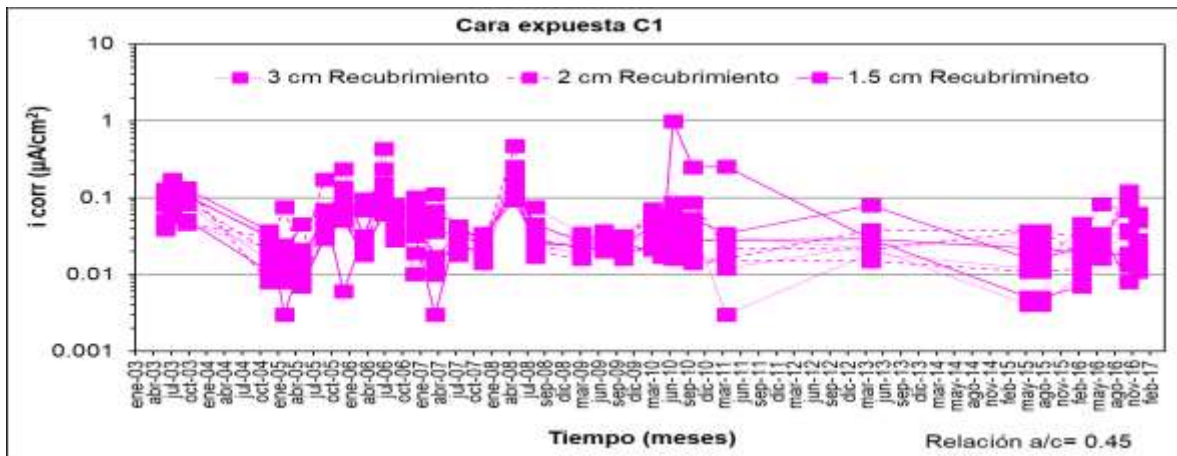


Figura 4.27 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. tiempo para cara expuesta C1 Relación a/c : 0.45

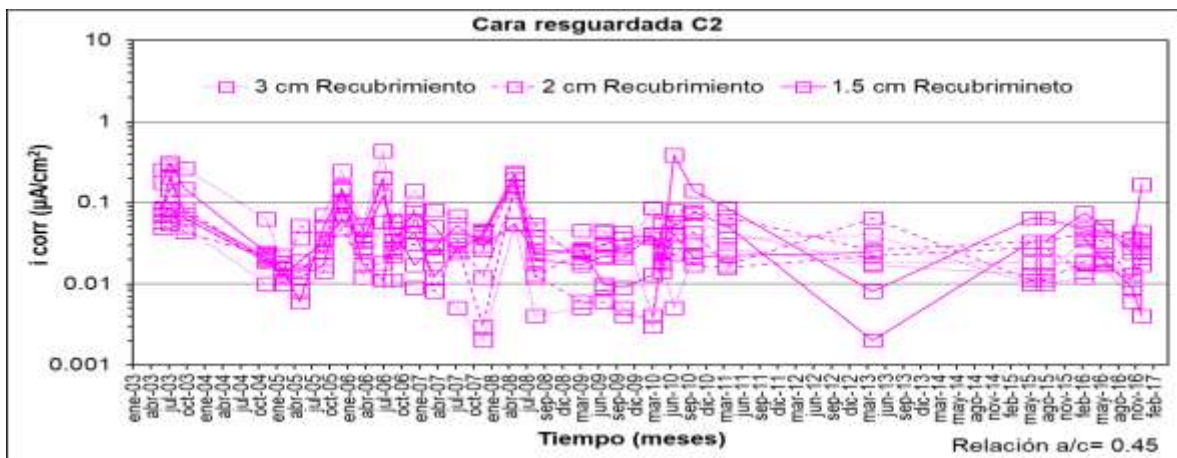


Figura 4.28 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. tiempo para cara resguardada C2 – Relación a/c : 0.45

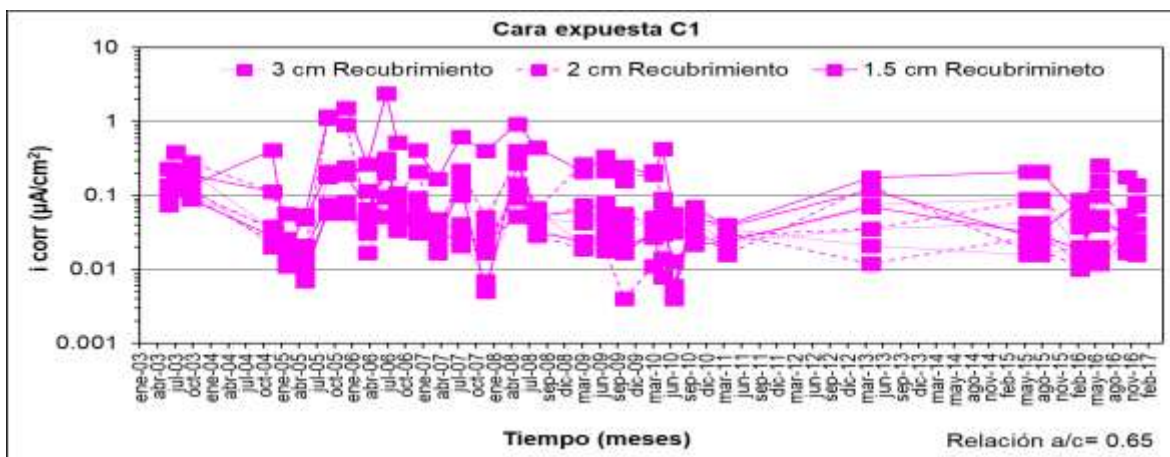


Figura 4.29 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. tiempo para cara expuesta C1
Relación a/c: 0.65

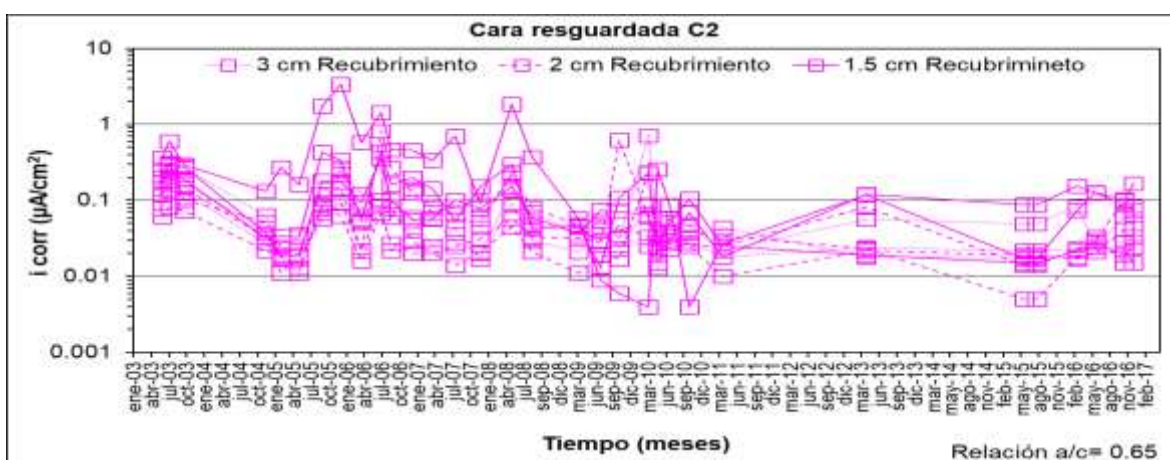


Figura 4.30 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. tiempo para cara resguardada C2 – Relación a/c: 0.65

4.3.2.2 Potencial de corrosión

En las figuras 4.31 a 4.34, se muestran las gráficas con los datos correspondientes al comportamiento del potencial de corrosión en las caras expuestas (C1) y resguardadas (C2) de las probetas con recubrimiento 1.5, 2 y 3 cm, con las relaciones a/c de 0.45 y a/c = 0.65; durante los años de exposición en la estación de Veracruz, siendo ésta una representación de las estaciones marinas.

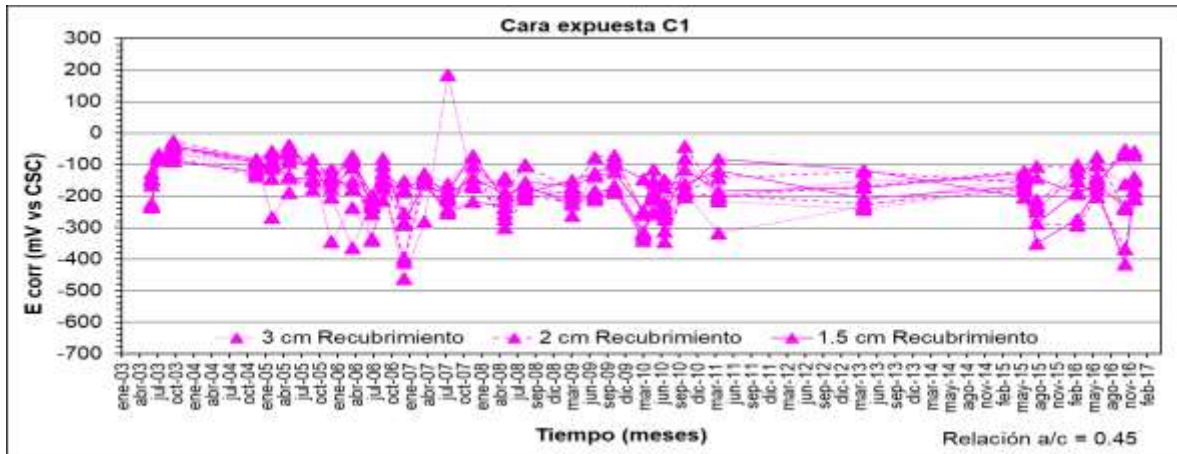


Figura 4.31 Potencial de corrosión (Ecorr) vs. tiempo para cara expuesta C1 Relación a/c: 0.45

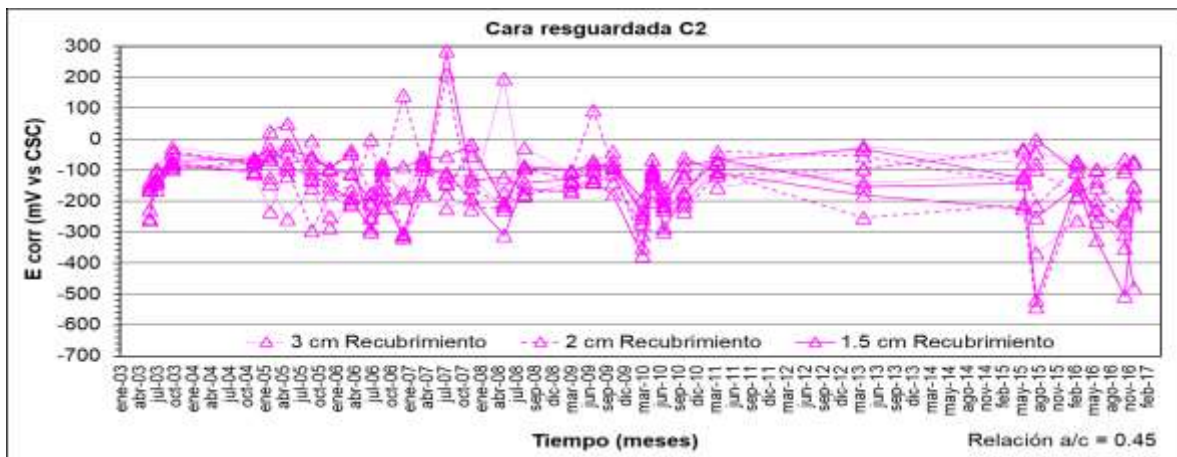


Figura 4.32 Potencial de corrosión (Ecorr) vs. tiempo para cara resguardada C2 – Relación a/c: 0.45

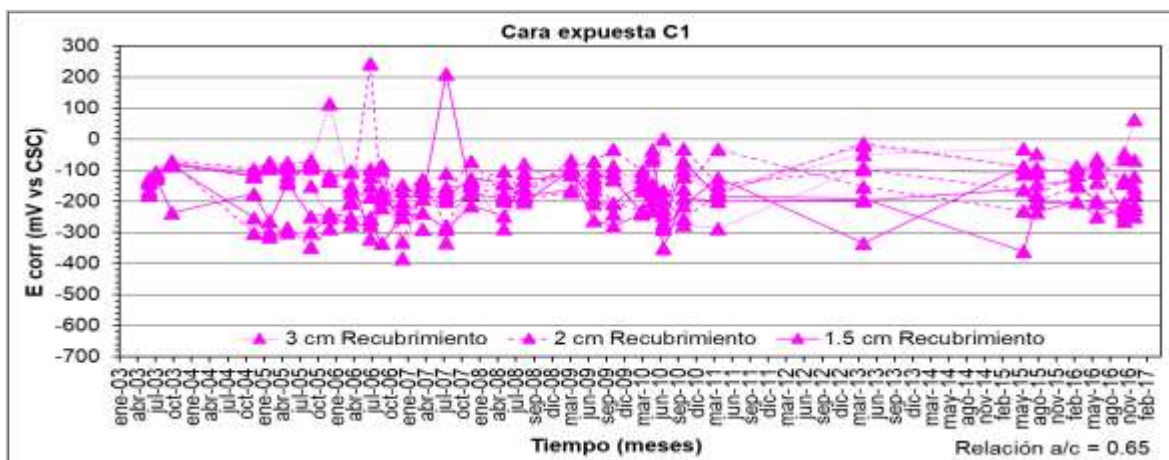


Figura 4.33 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. tiempo para cara expuesta C1
Relación a/c: 0.65

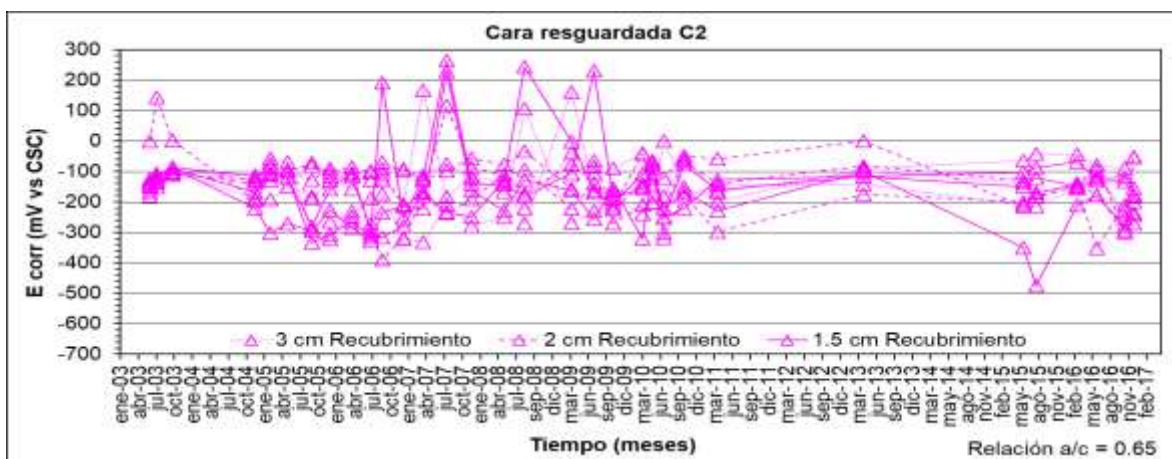


Figura 4.34 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. tiempo para cara resguardada
C2 – Relación a/c: 0.65

4.3.2.3 Resistencia eléctrica

En las figuras 4.35 al 4.38, se presentan las gráficas con los datos relativos a la resistencia eléctrica de las probetas con la cara expuesta (C1) y resguardada (C2), fabricadas con sus dos relaciones $a/c = 0.45$ y $a/c = 0.65$.

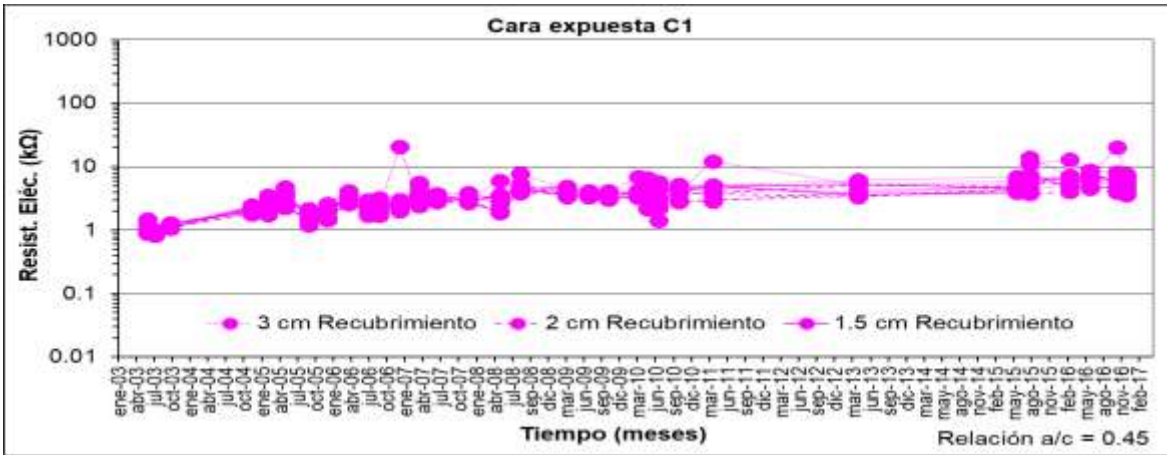


Figura 4.35 Resistencia eléctrica (Resist. Eléc) vs. tiempo para cara expuesta C1 – Relación a/c : 0.45

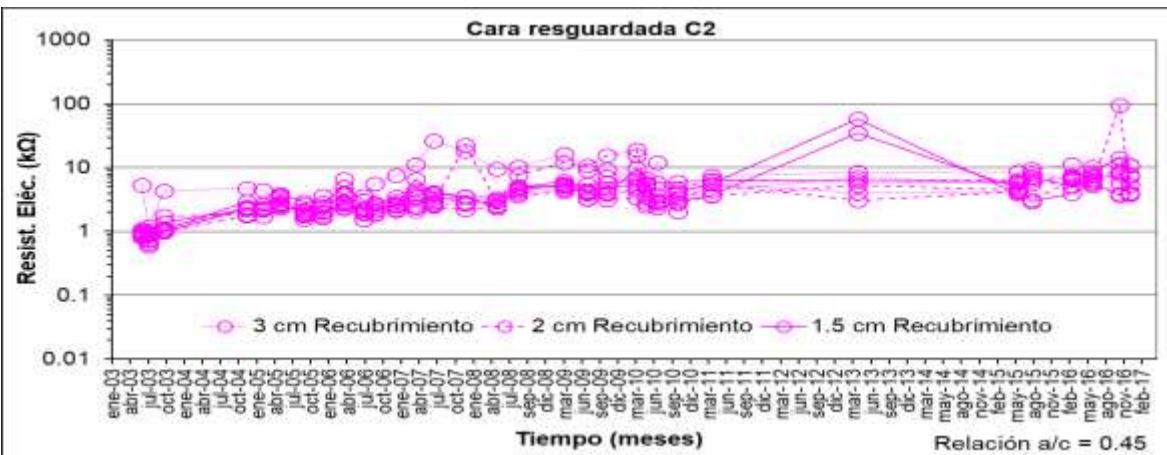


Figura 4.36 Resistencia eléctrica (Resist. Eléc) vs. tiempo para cara resguardada C2 – Relación a/c : 0.45

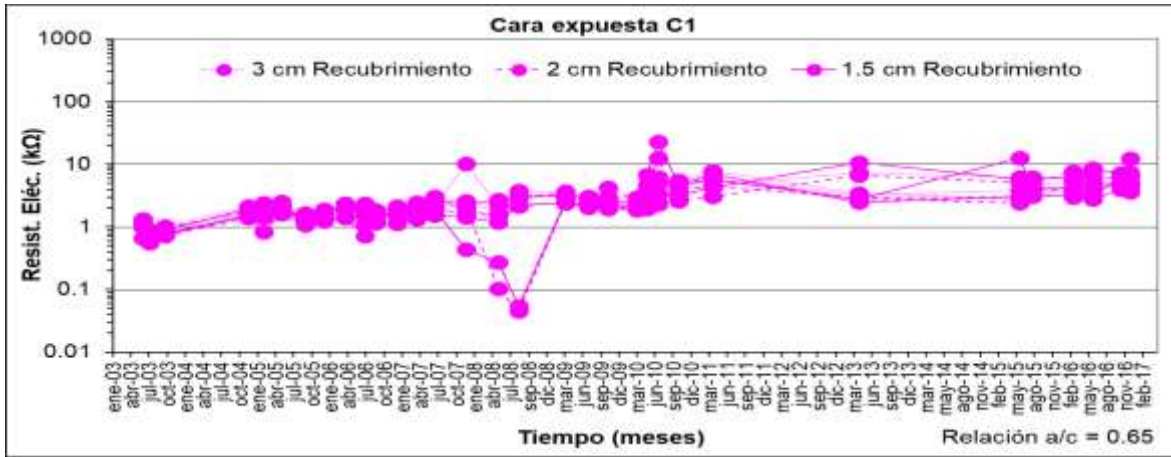


Figura 4.37 Resistencia eléctrica (Resist.Eléct) vs. tiempo para cara expuesta C1 – Relación a/c: 0.65

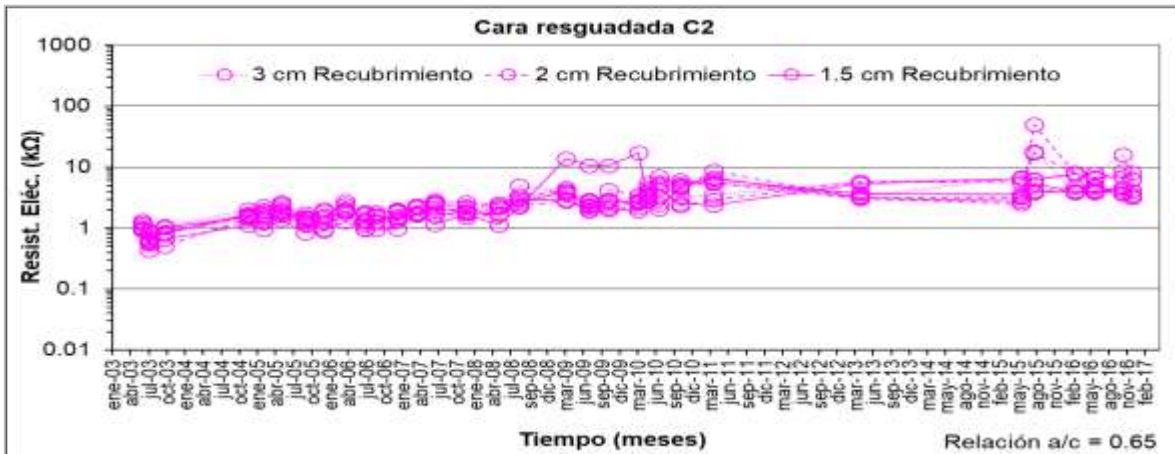


Figura 4.38 Resistencia eléctrica (Resist.Eléct) vs. tiempo para cara resguardada C2 – Relación a/c: 0.65

5 Análisis de resultados

5.1 Análisis de los resultados electroquímicos de las estaciones de campo

Se analizaron los valores de potencial de corrosión (E_{corr}) vs. la velocidad de corrosión (i_{corr}), al igual que de resistencia eléctrica (R_e) vs. i_{corr} y R_e vs. E_{corr} . Estos análisis se realizaron con las gráficas para cada estación de exposición natural, para cada cara de exposición (C1 y C2) y para cada varilla con los tres recubrimientos (1.5, 2.0 y 3.0 cm). En este capítulo, se mostrarán las correlaciones de las estaciones de Querétaro y Veracruz, dejando las gráficas de las demás estaciones con que se cuenta, en los anexos C, D y E.

5.1.1 Estación Querétaro

En las figuras 5.1 a 5.12, se muestran las correlaciones empíricas entre los datos electroquímicos obtenidos durante el tiempo de exposición de este proyecto (2003 a 2017).

La primera correlación mostrada corresponde a E_{corr} vs. i_{corr} , la cual se observa en las figuras 5.1 a la 5.4. En estas gráficas, se puede observar una tendencia casi horizontal, con una ligera pendiente descendente de los potenciales hacia valores más negativos conforme aumentan los valores de i_{corr} . Sin embargo, se trata de una variación realmente muy pequeña, y se observa que ambos valores de E_{corr} e i_{corr} se encuentran en zonas que denotan activación electroquímica muy baja, es decir en zona de pasivación del acero de refuerzo.

La siguiente correlación generada es entre E_{corr} vs. R_e para esta misma estación Querétaro, y se muestra en las figuras 5.5 a 5.8. Ahora se observa una correlación similar a la anterior, aunque la tasa de cambio de E_{corr} con respecto a la R_e es mayor, es decir se puede observar una pendiente más pronunciada de E_{corr} vs. R_e que la observada en E_{corr} vs. i_{corr} .

Por último, la correlación i_{corr} vs. R_e se muestra en las figuras 5.9 a la 5.12. Estas gráficas muestran una correlación opuesta a las dos anteriores: a mayor la resistencia eléctrica, más positivo el valor de E_{corr} .

En todas estas correlaciones (E_{corr} vs. i_{corr} , E_{corr} vs. R_e y R_e vs. E_{corr} vs. R_e), no se observan diferencias entre los valores de cara resguardada vs. cara expuesta o espesor de recubrimiento. Pareciera que no existen diferencias entre estos dos parámetros que pudieran afectar el comportamiento electroquímico.

5.1.1.1 E_{corr} vs. i_{corr}

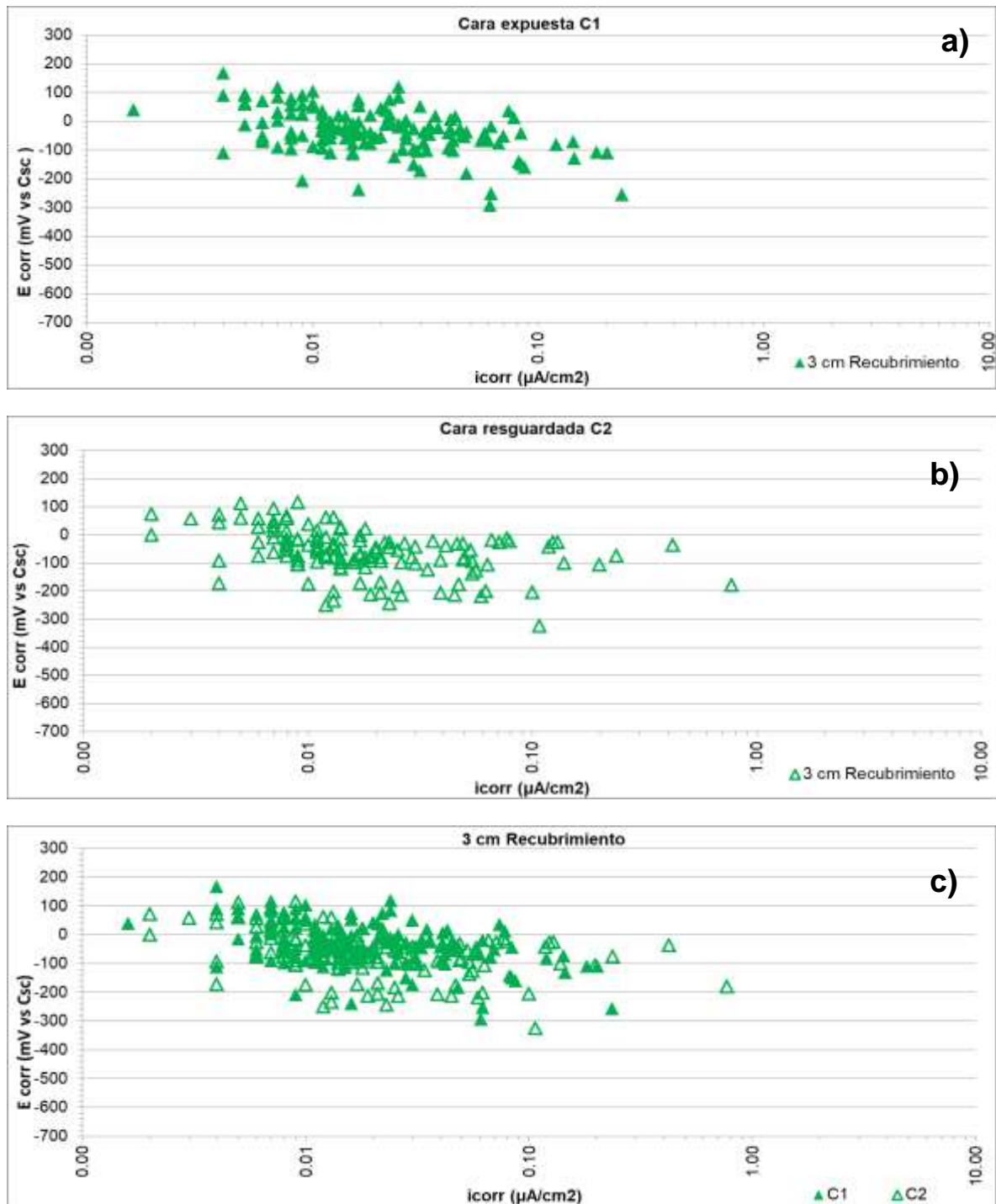


Figura 5.1 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

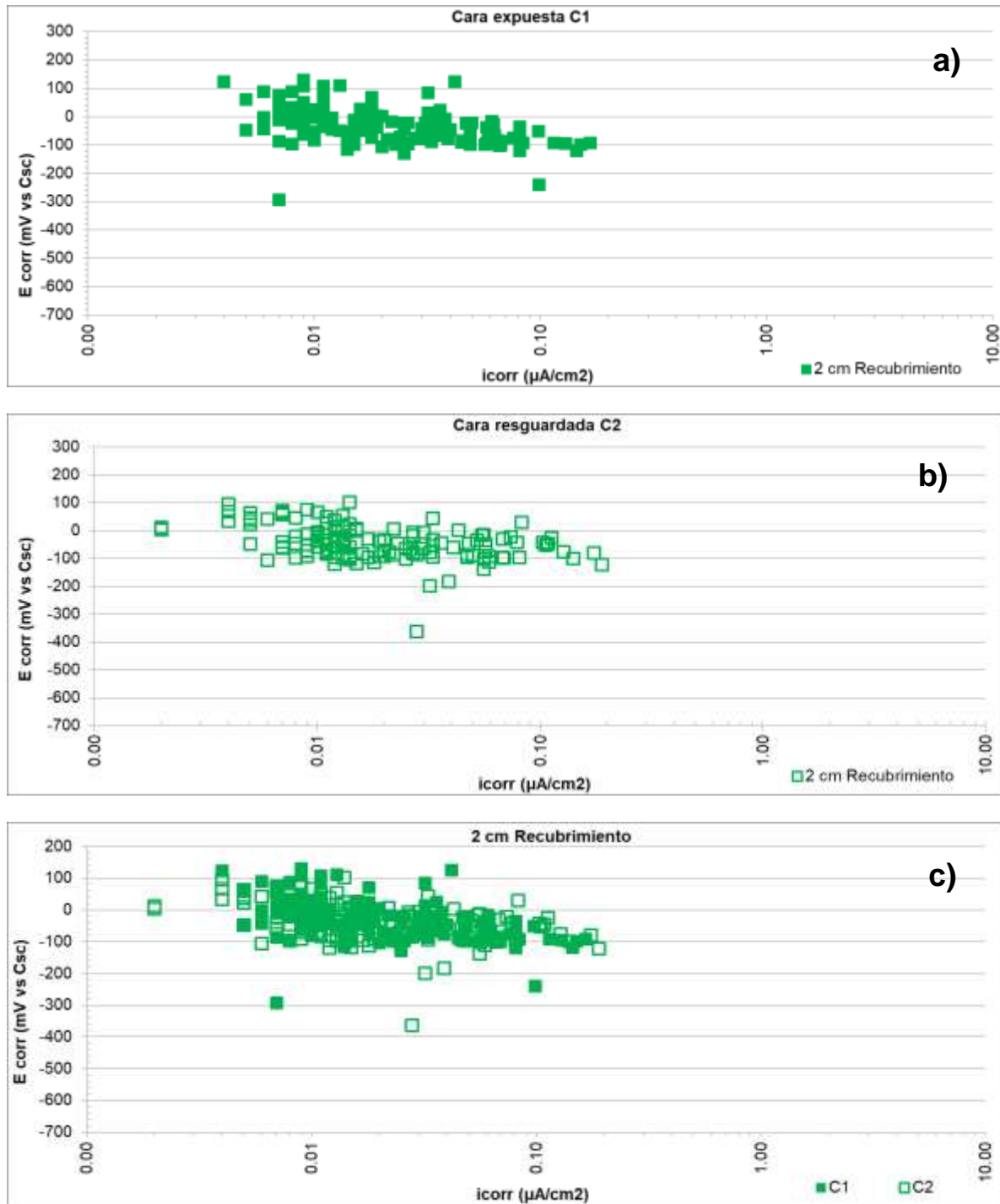


Figura 5.2 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

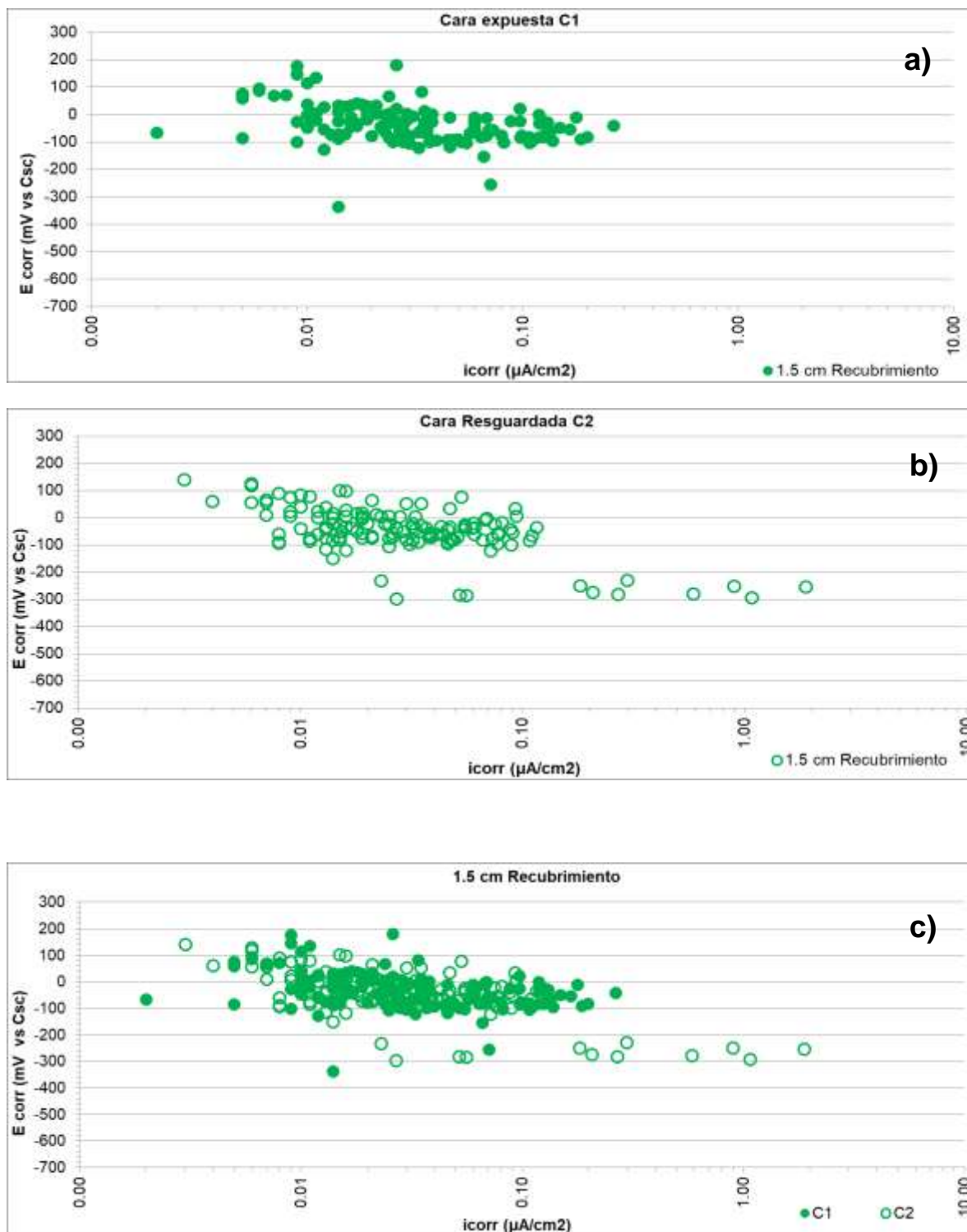


Figura 5.3 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

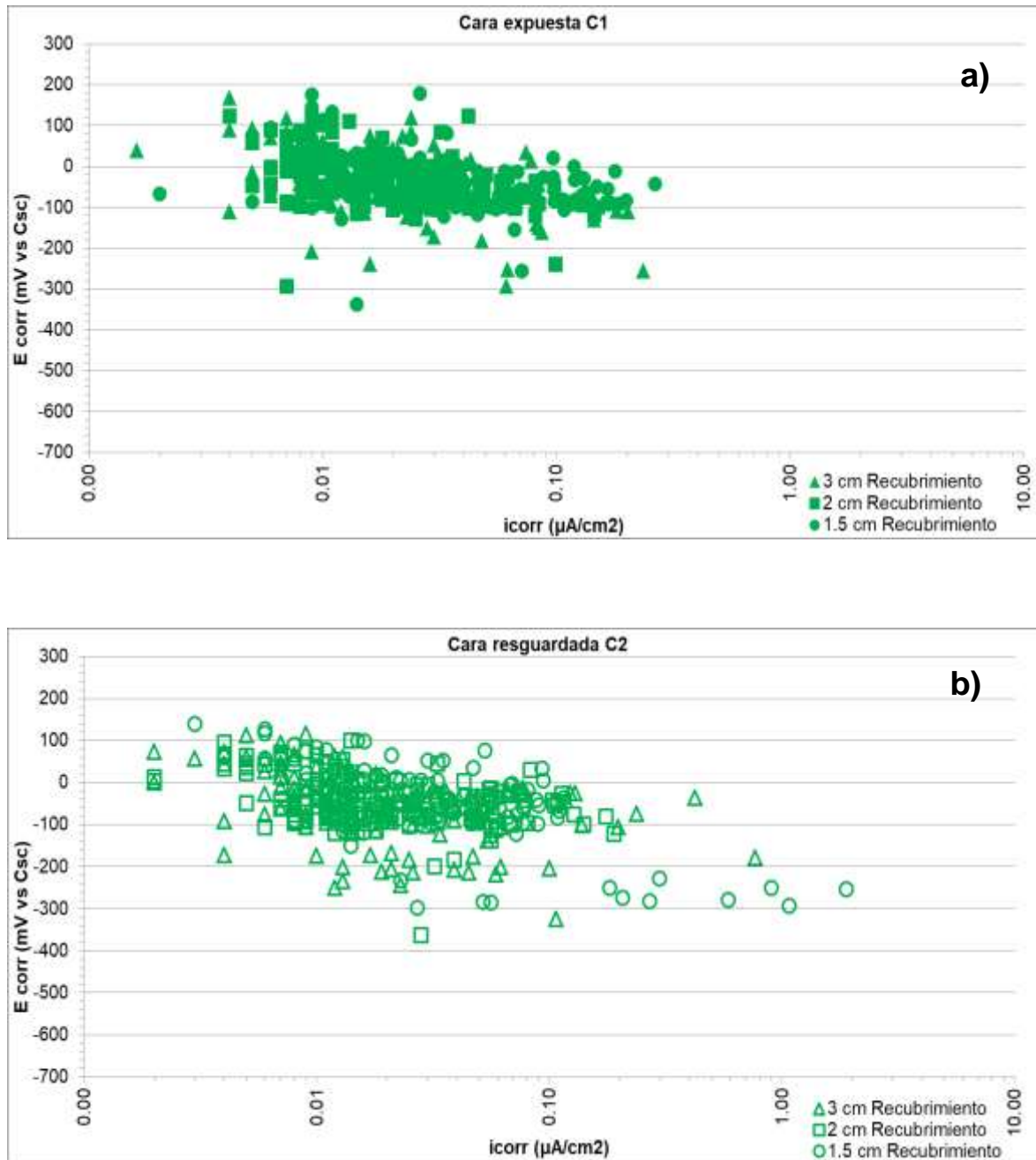


Figura 5.4 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

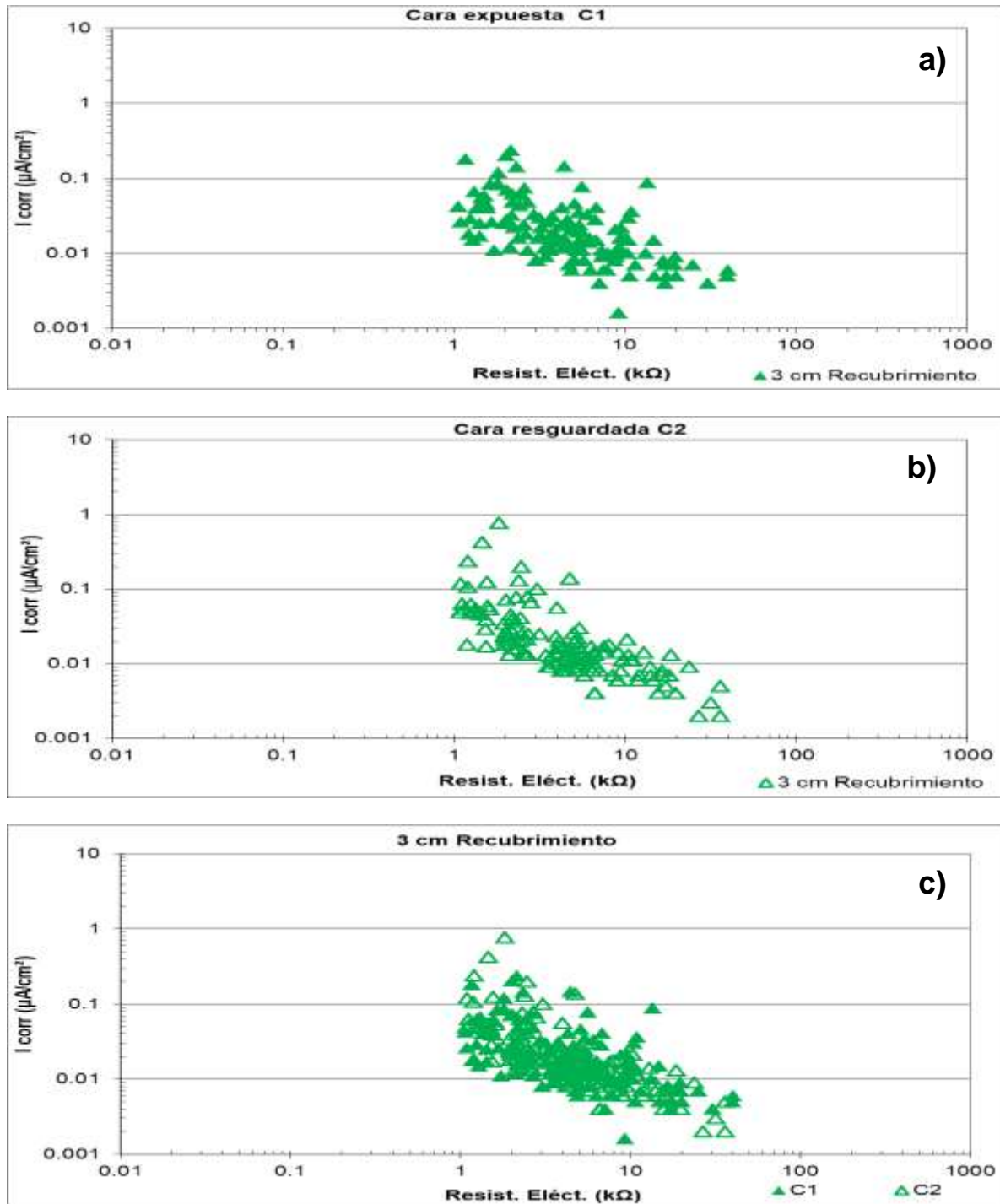


Figura 5.5 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

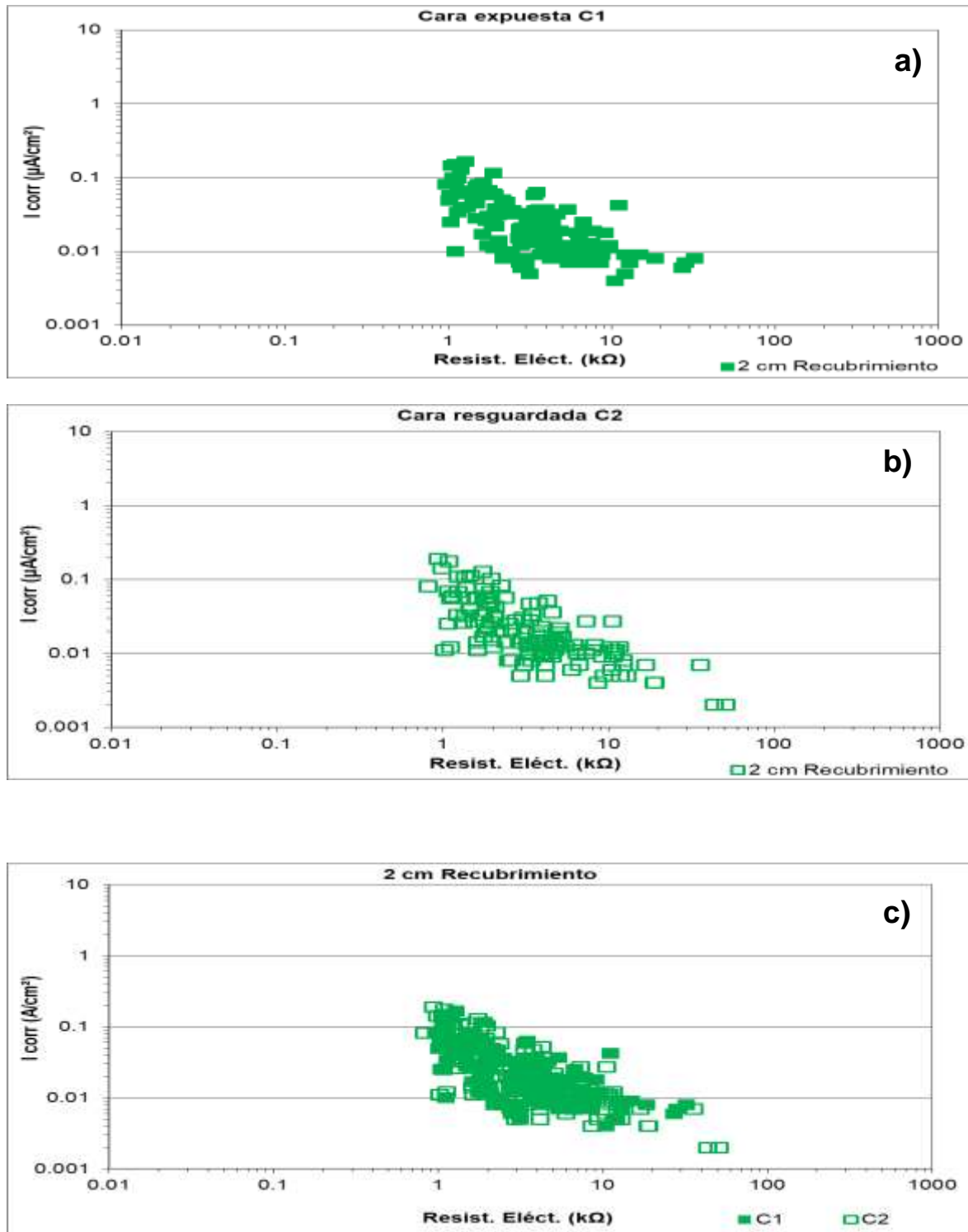


Figura 5.6 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

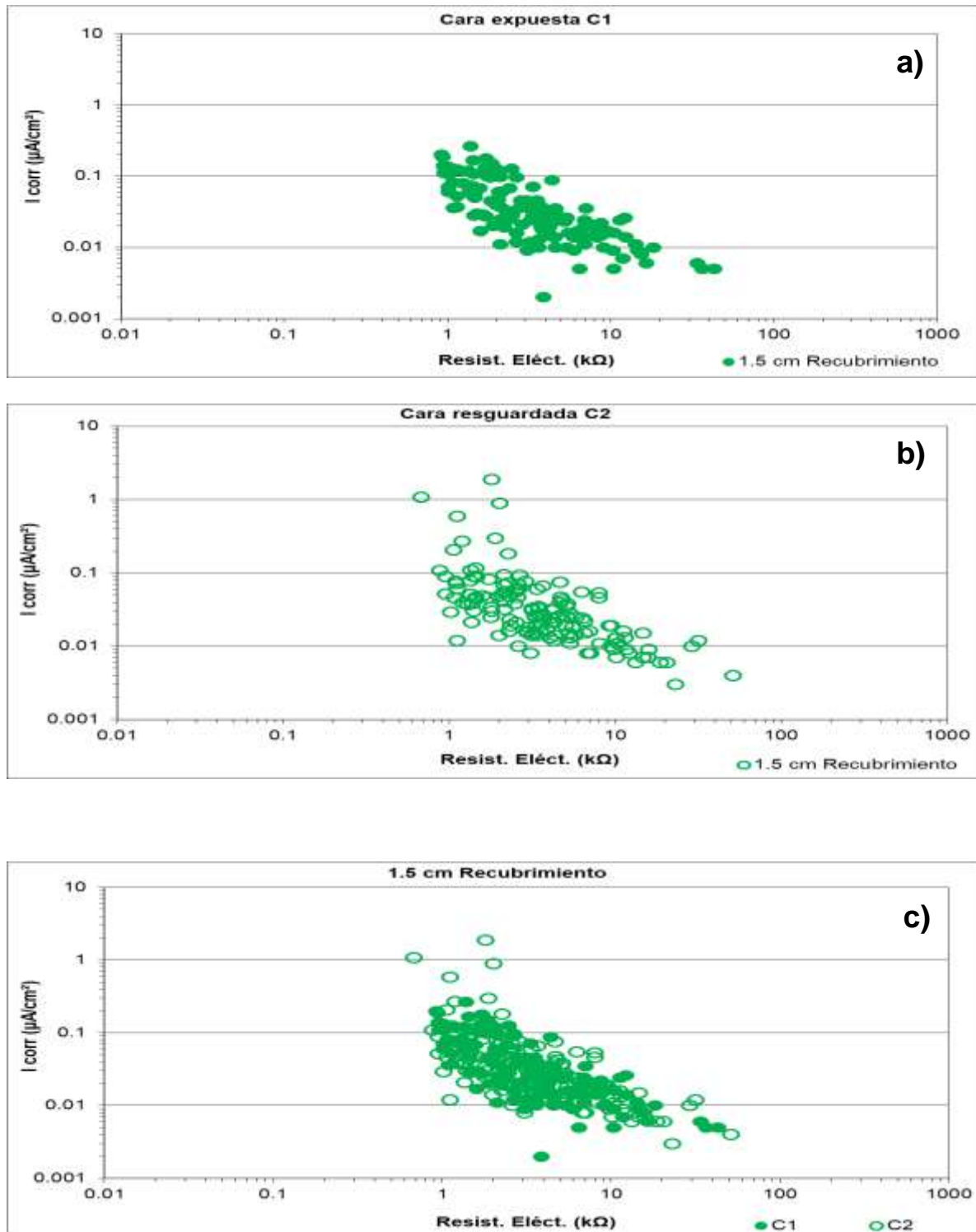


Figura 5.7 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

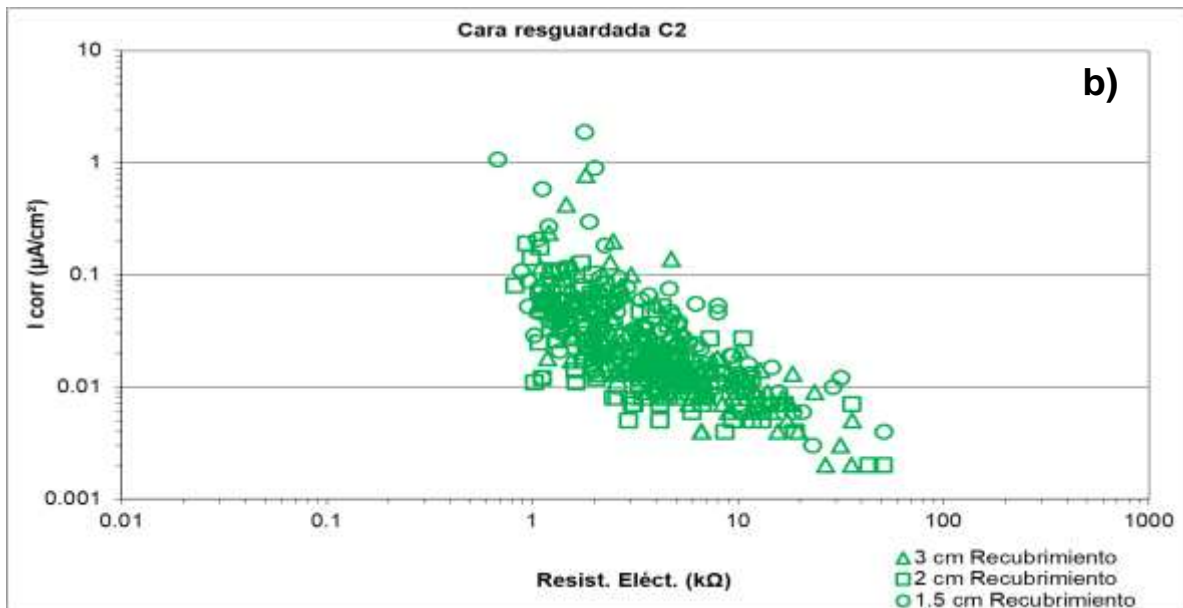
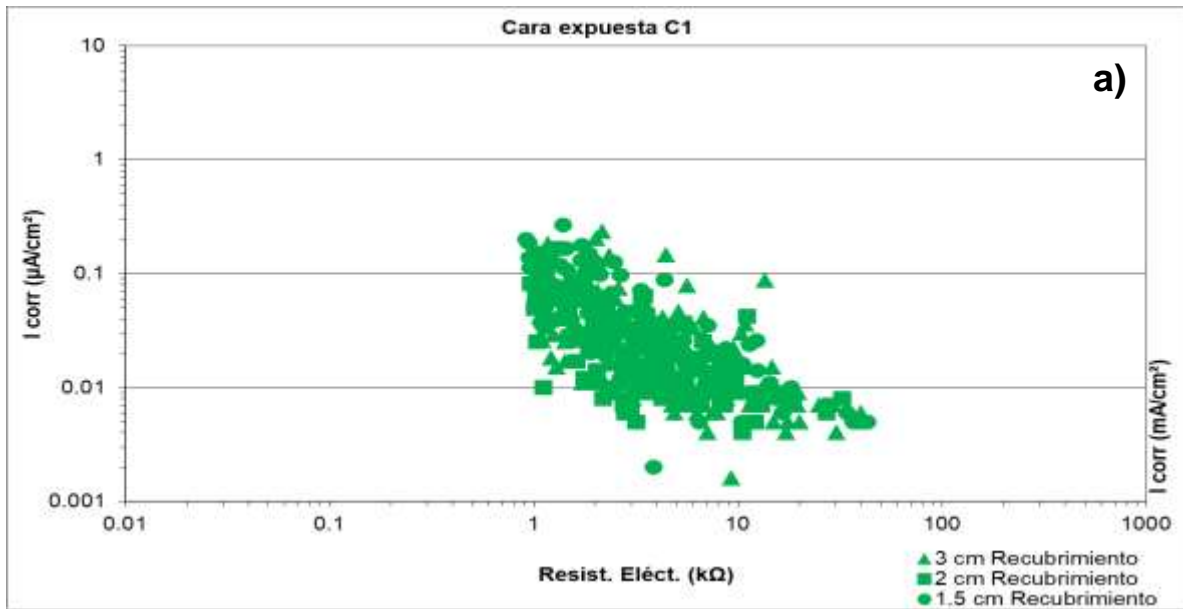


Figura 5.8 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

5.1.1.2 Ecorr vs. Re

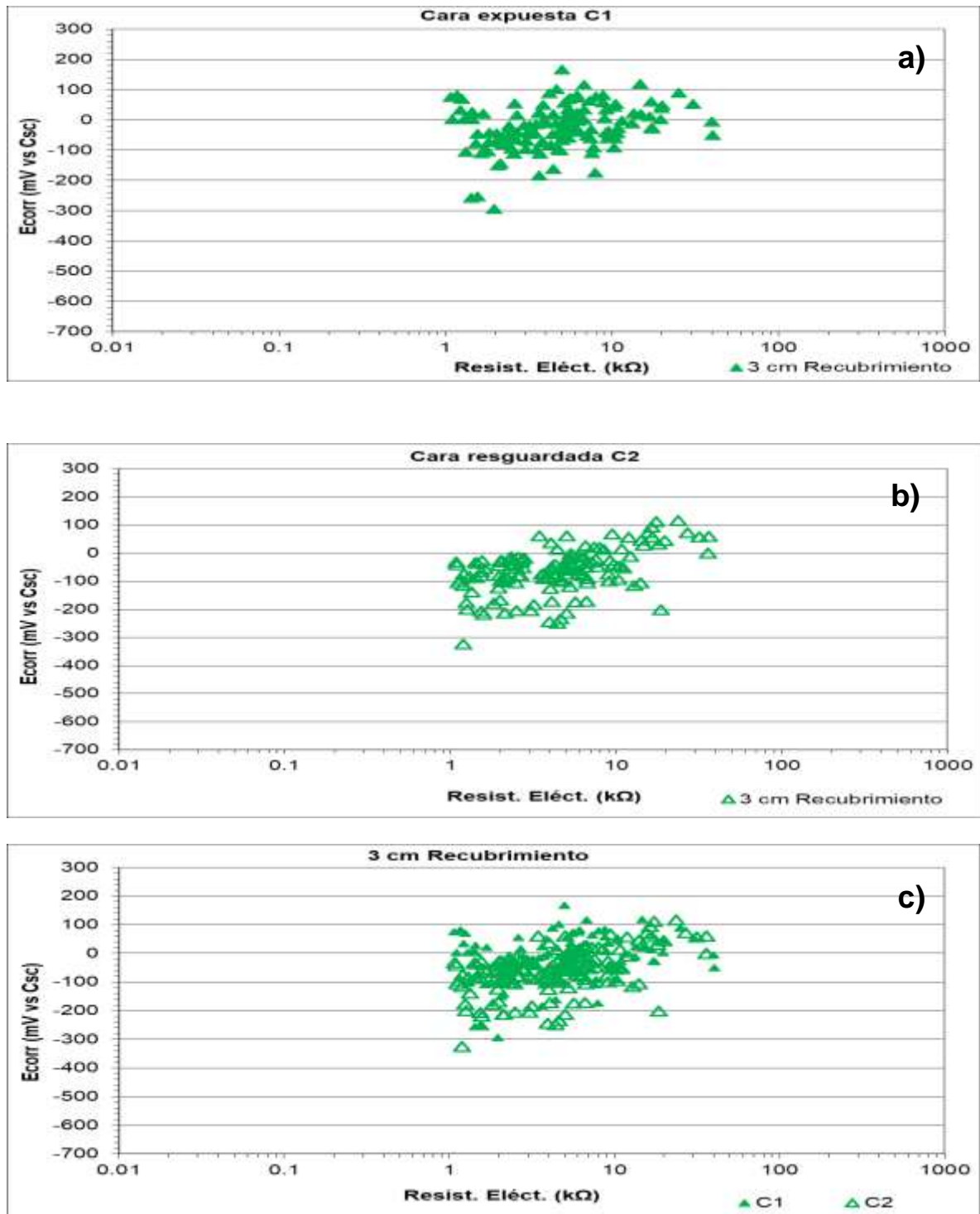


Figura 5.9 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

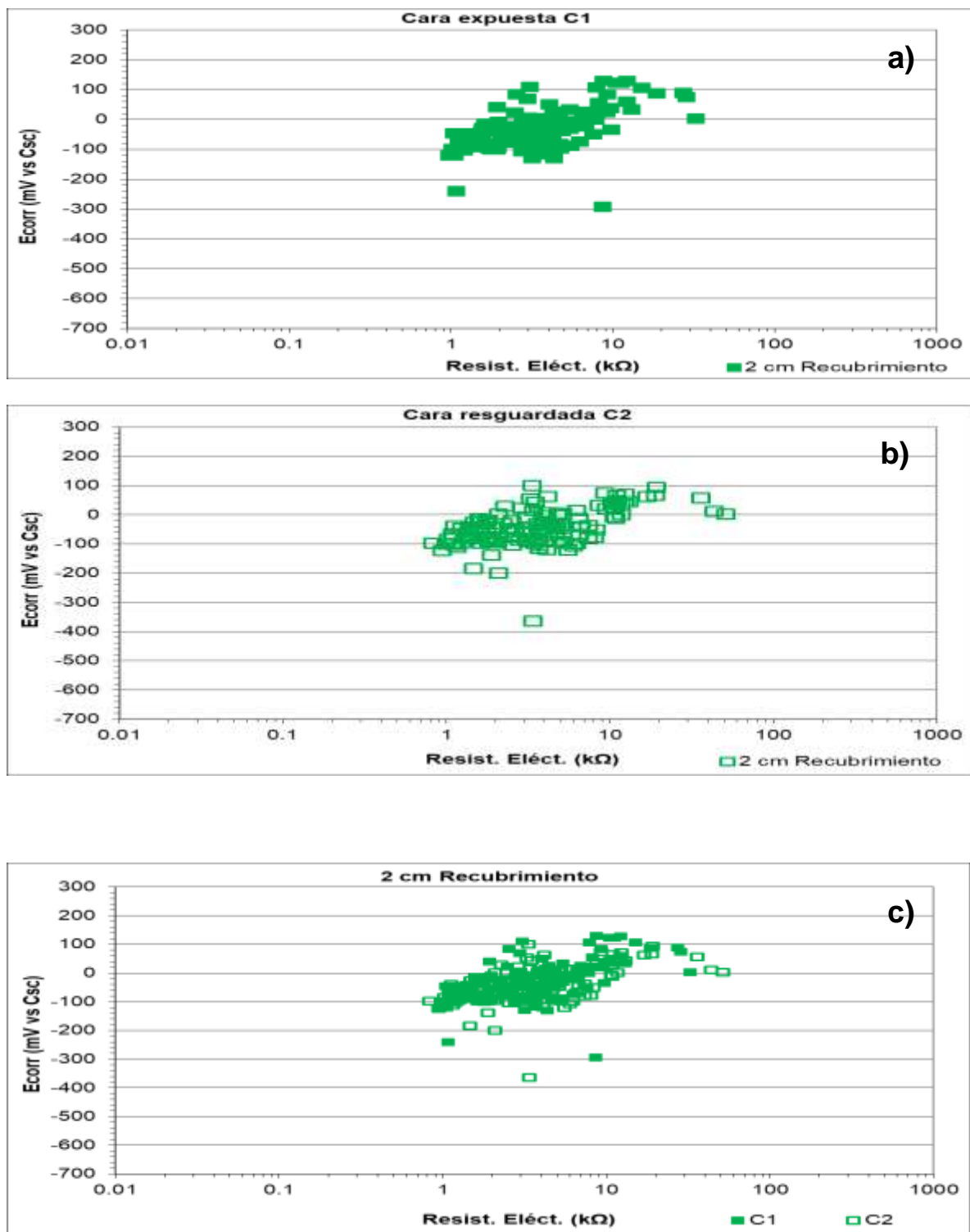


Figura 5.10 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

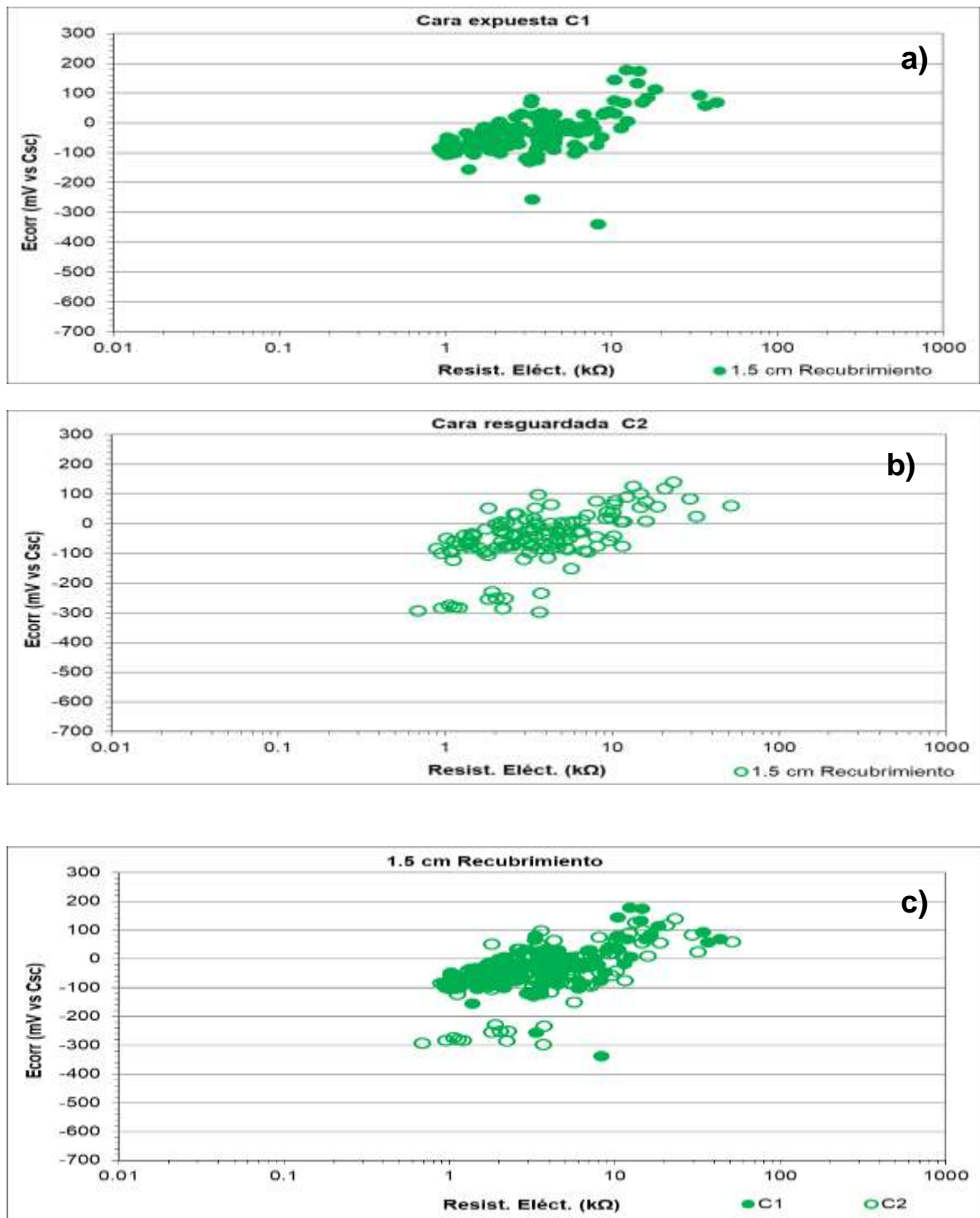


Figura 5.11 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

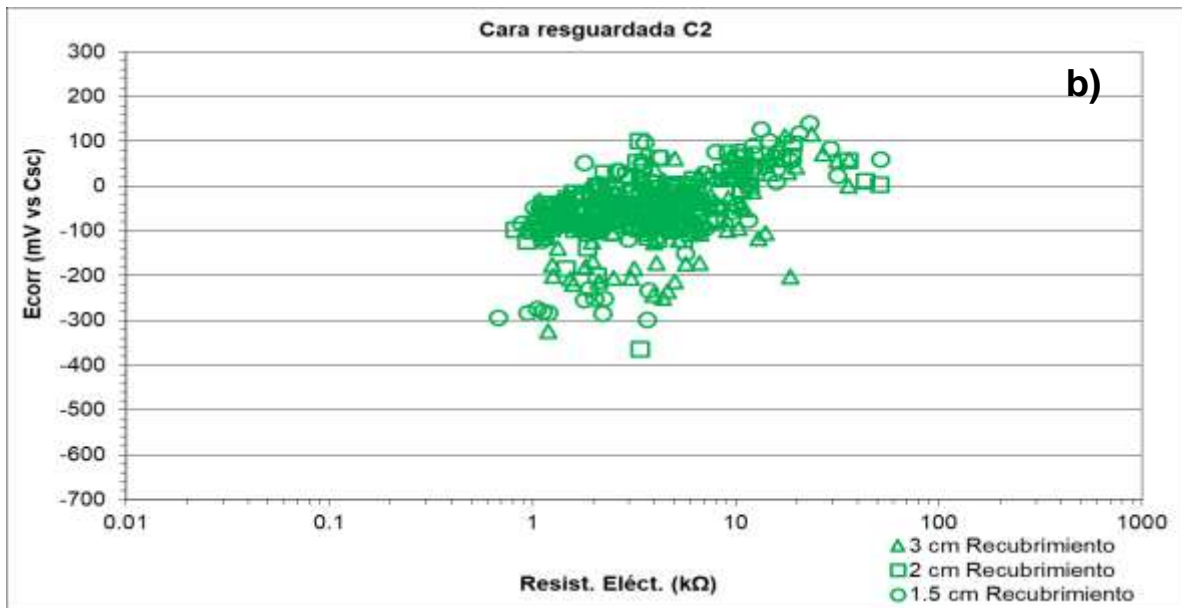
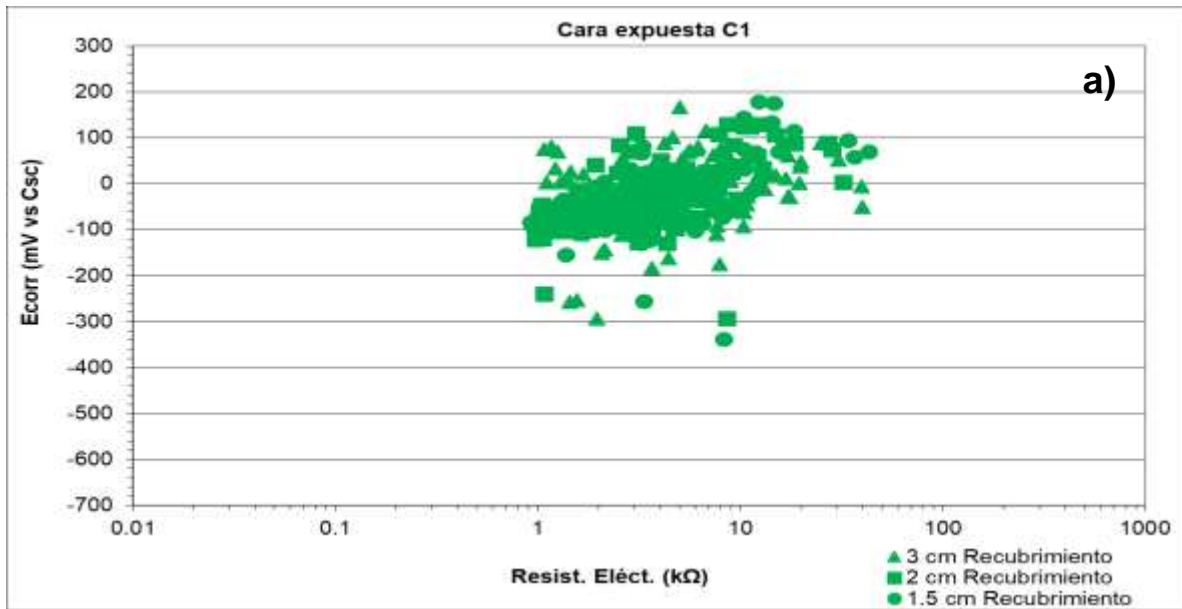


Figura 5.12 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

5.1.2 Estación Veracruz

En las figuras 5.13 a 5.23, se muestran las correlaciones empíricas entre los datos electroquímicos obtenidos de la estación Veracruz durante el tiempo de exposición de este proyecto (2003 a 2017).

La primera correlación mostrada corresponde a E_{corr} vs. i_{corr} , la cual se observa en las figuras 5.13 a 5.15. En estas gráficas, se puede observar una tendencia casi horizontal, de igual manera como se observó en los resultados de la estación de Querétaro. Aunque los valores de E_{corr} son un poco más negativos que los de Querétaro, de todas maneras se encuentra la mayoría entre los valores que caracterizan un acero pasivo en concreto.

La siguiente correlación generada es entre E_{corr} vs. Re para esta misma estación Veracruz y se muestran en las figuras 5.16 a 5.19. Ahora se observa una correlación más marcada que la anterior, incluso más marcada que lo observado en los valores de la estación de Querétaro: se observa una pendiente más pronunciada de E_{corr} vs. Re .

Por último, la correlación i_{corr} vs. Re se muestra en las figuras 5.20 a 5.23. Las gráficas de esta nueva correlación siguen la tendencia de las observadas entre E_{corr} vs. i_{corr} : poca variación de E_{corr} con Re .

De nuevo, como lo observado en la estación de Querétaro, en todas estas correlaciones (E_{corr} vs. i_{corr} , E_{corr} vs. Re y Re vs. E_{corr} vs. Re), no se observan diferencias entre los valores de cara resguardada vs. cara expuesta o espesor de recubrimiento. Pareciera que no existen diferencias entre estos dos parámetros que pudieran afectar el comportamiento electroquímico.

5.1.2.1 Ecorr vs. icorr

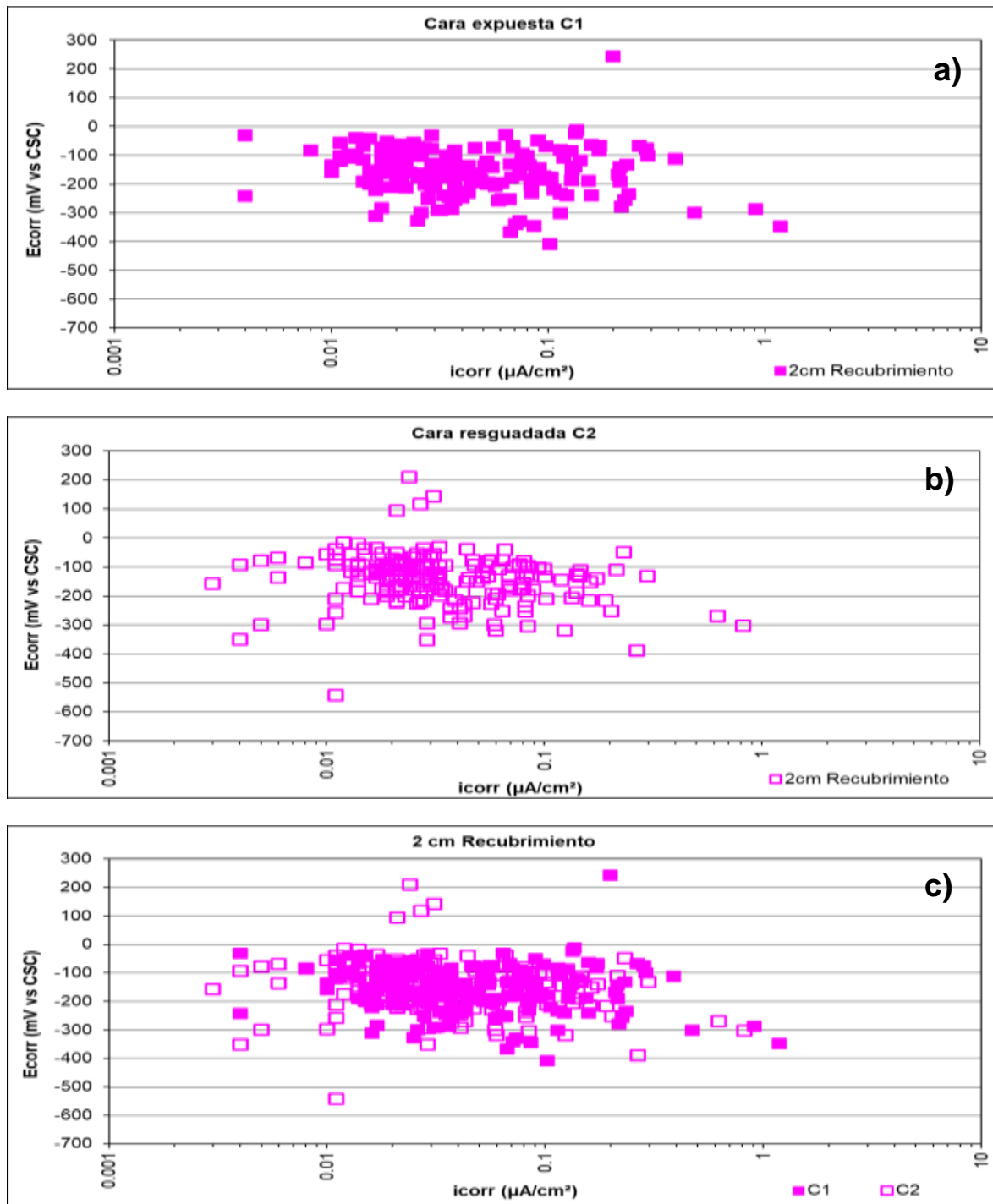


Figura 5.13 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 2 cm: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

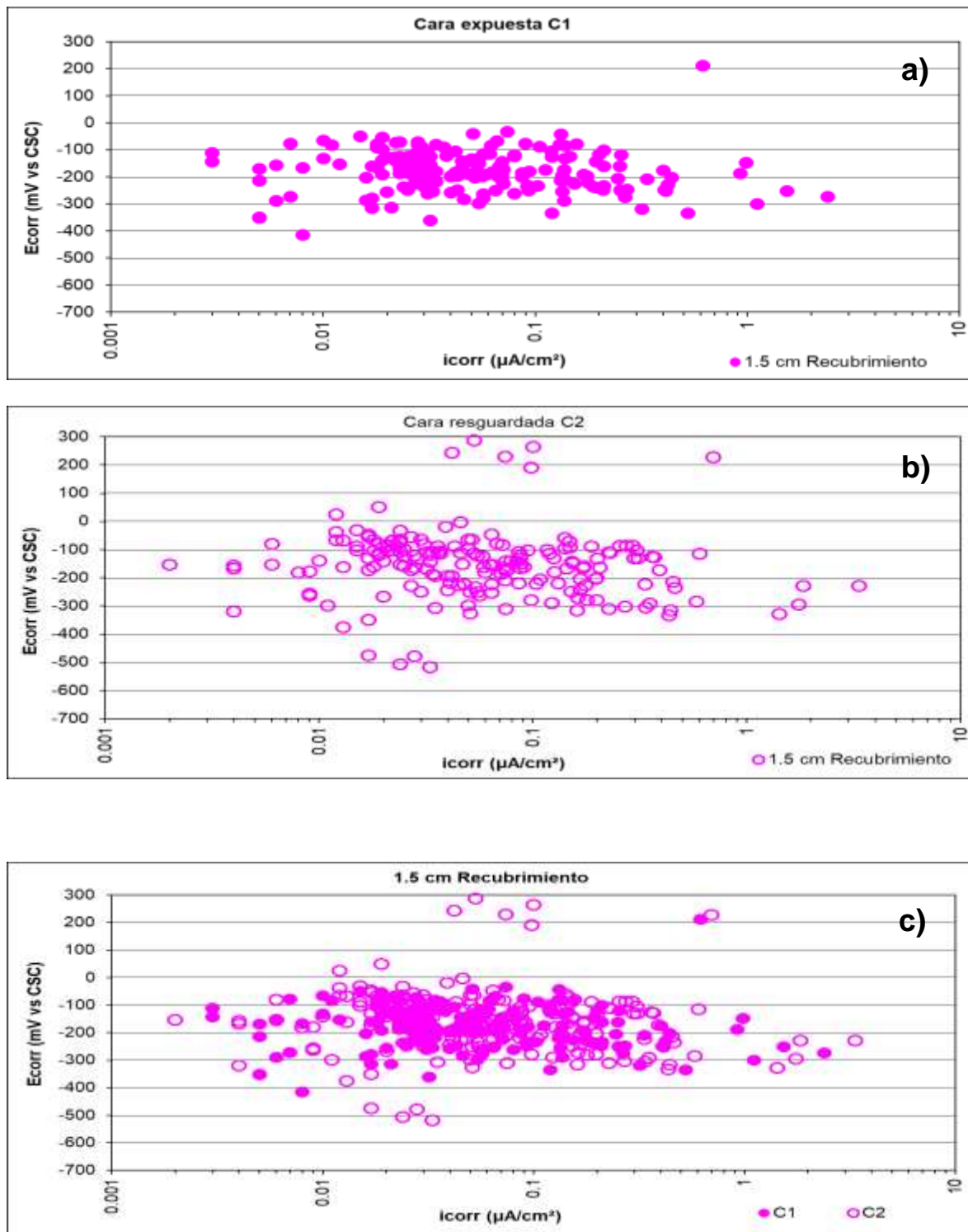


Figura 5.14 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

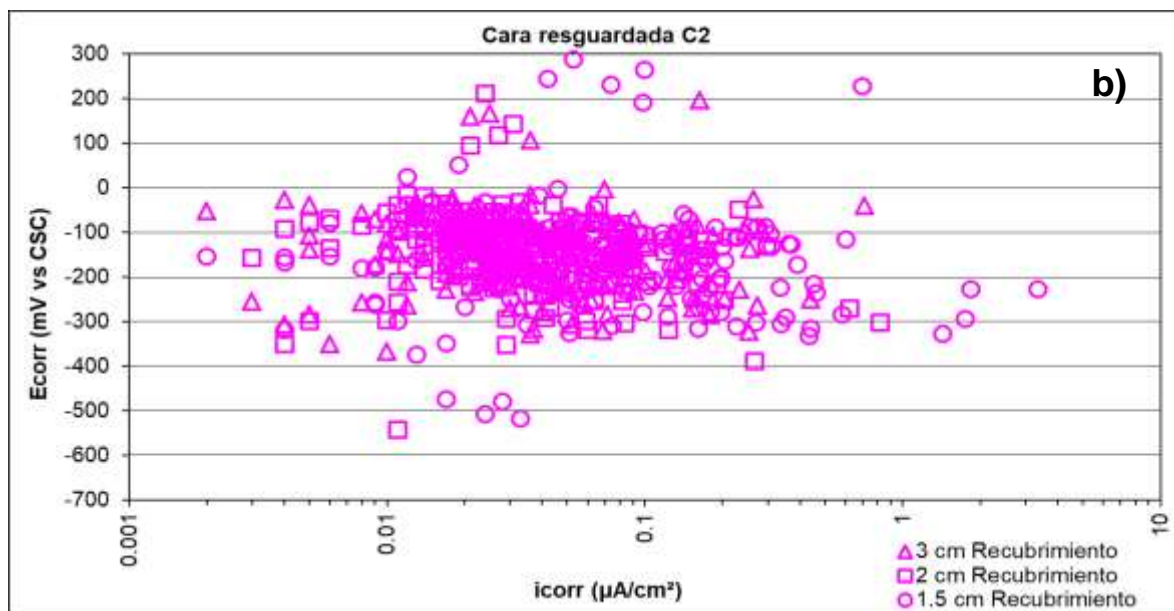
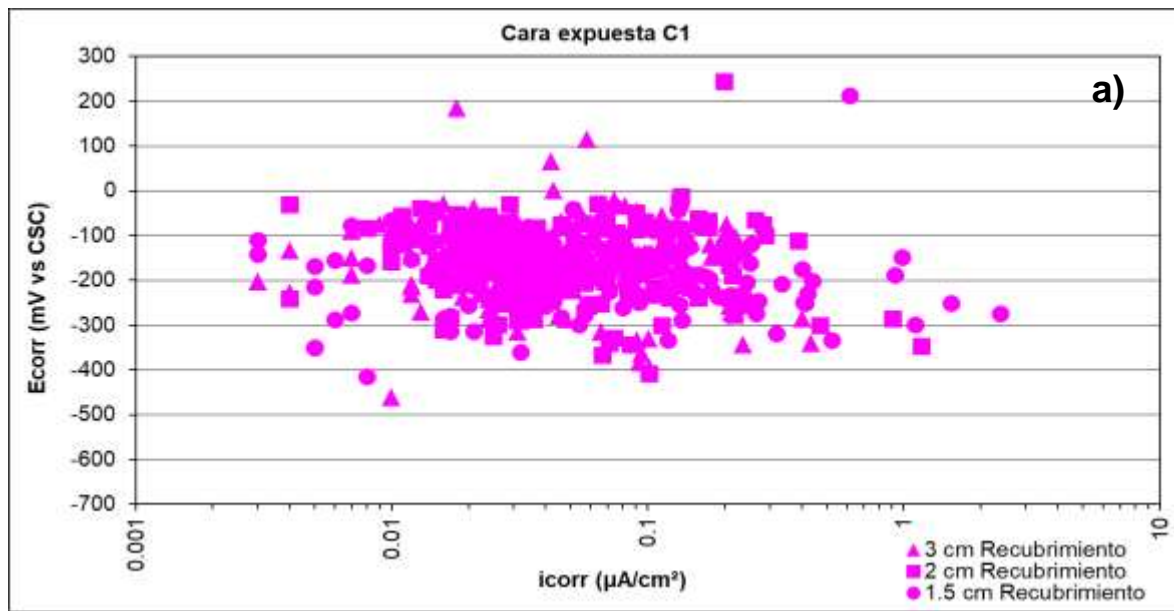


Figura 5.15 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

5.1.2.2 i_{corr} vs. R_e

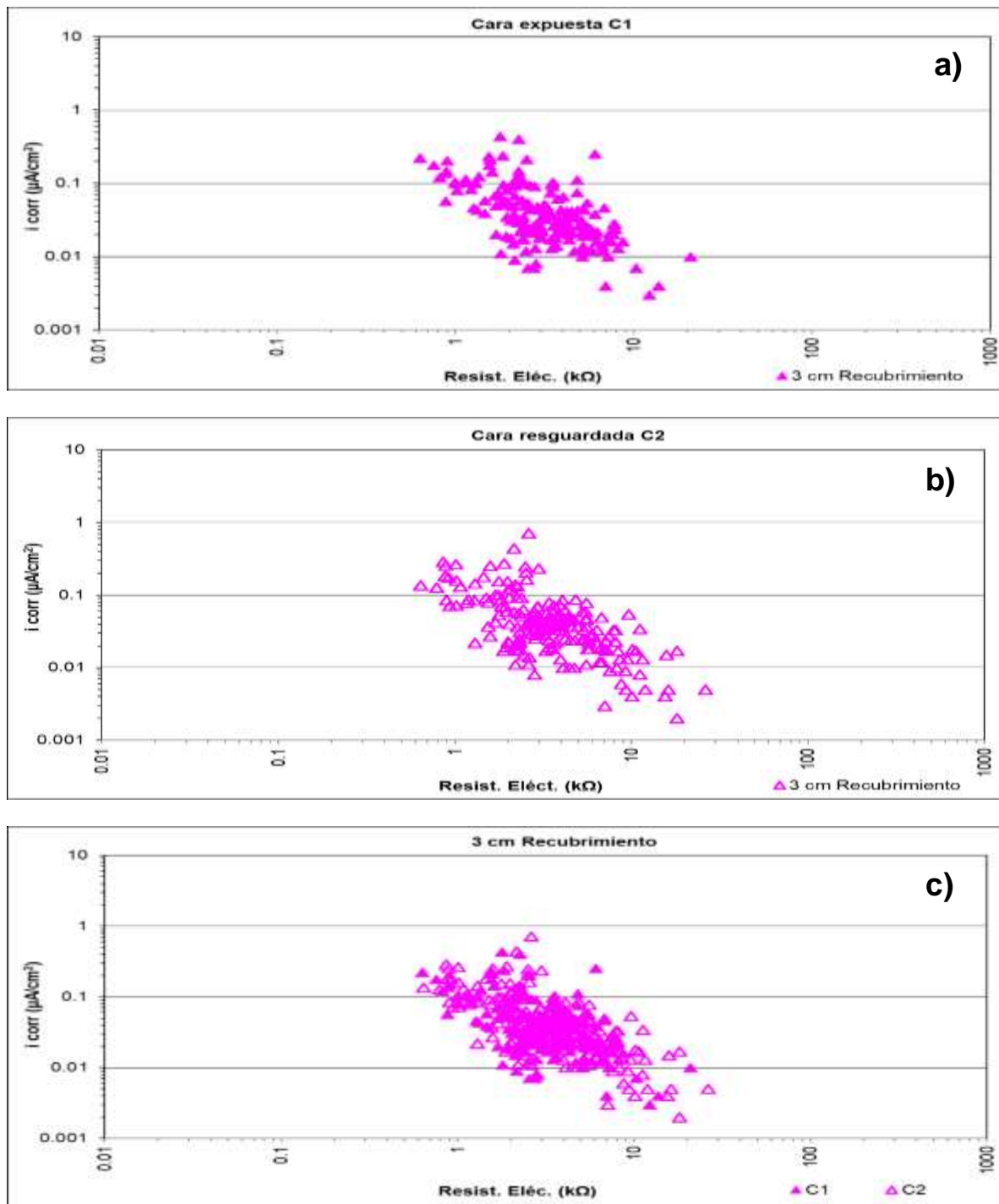


Figura 5.16 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléc.) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

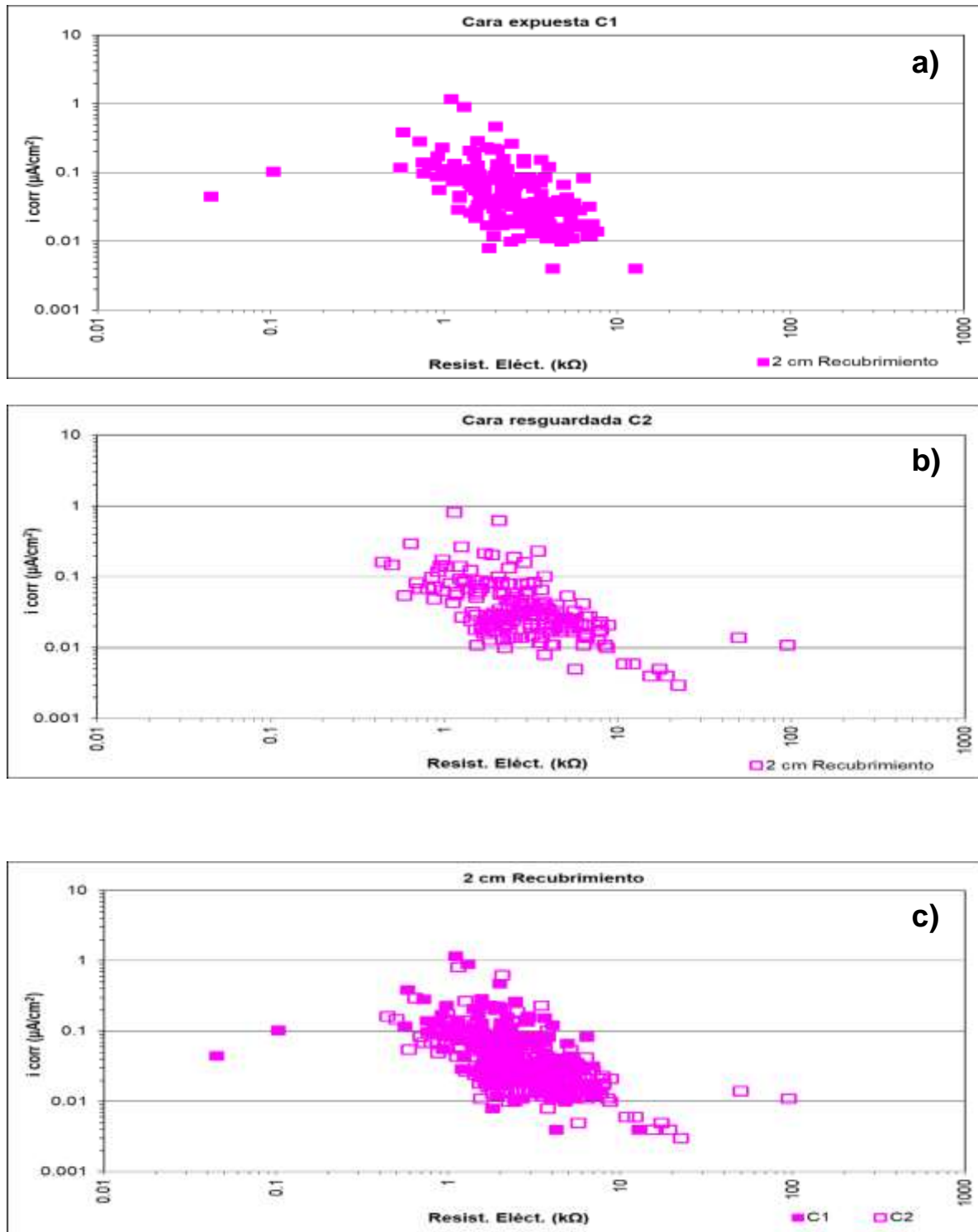


Figura 5.17 Velocidad de corrosión (i_{cor}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

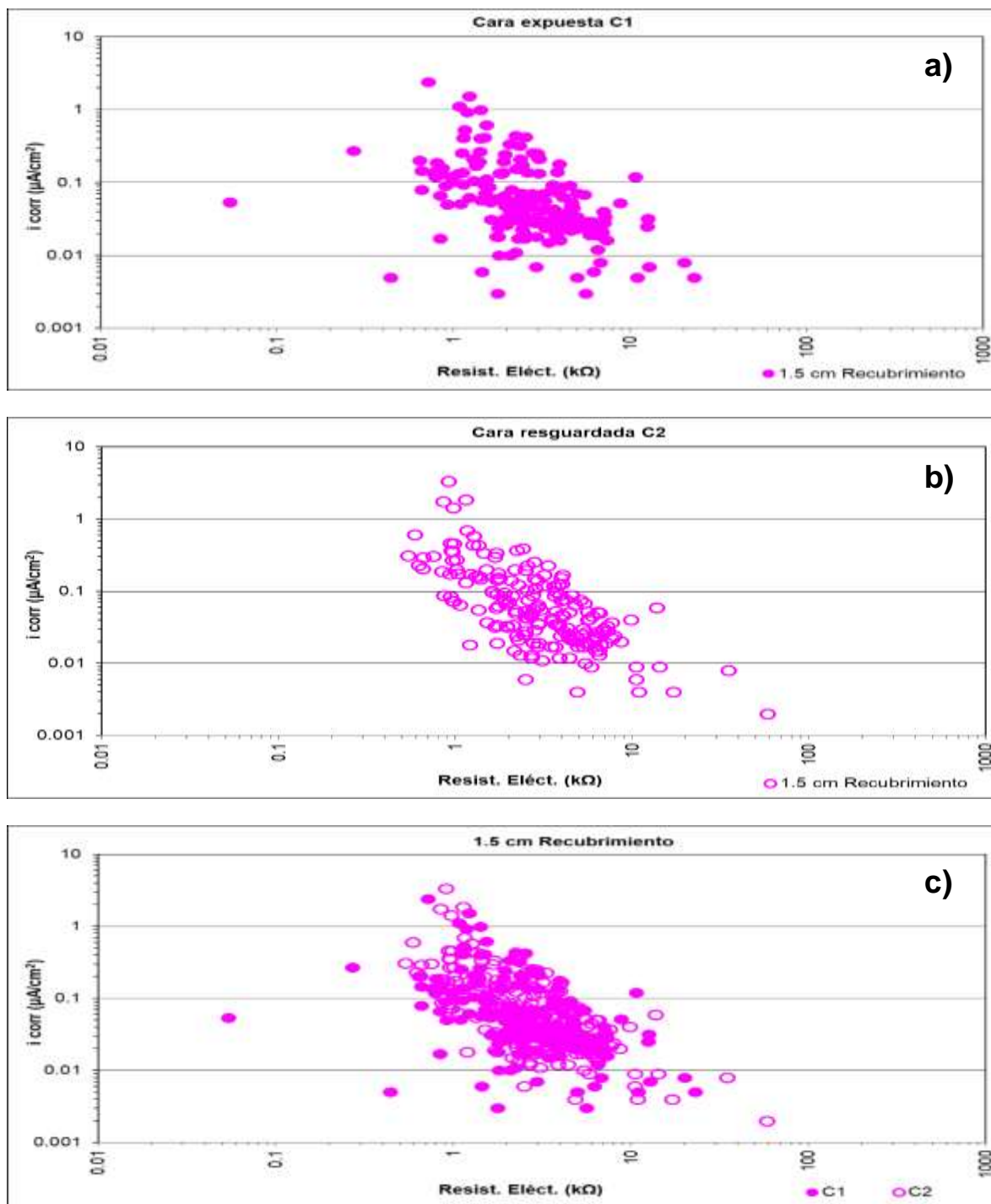


Figura 5.18 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

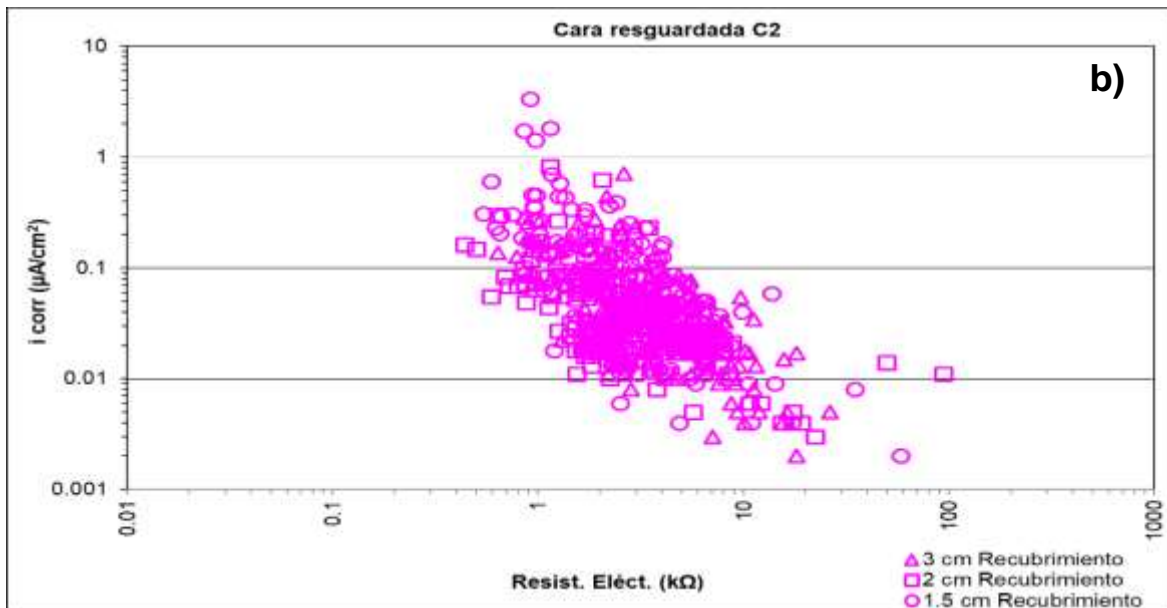
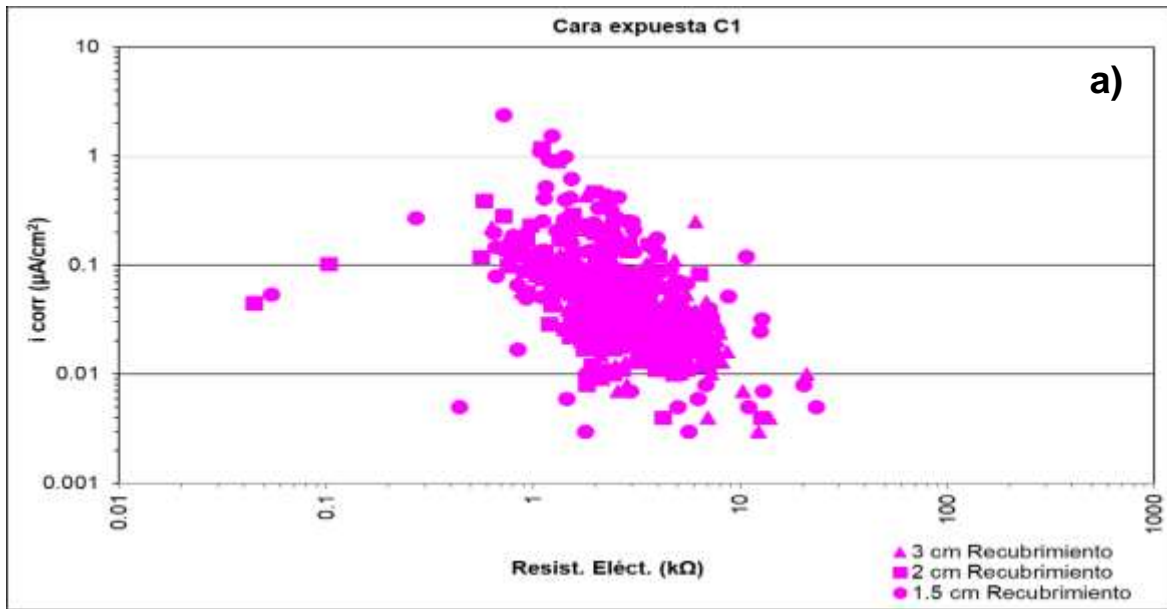


Figura 5.19 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

5.1.2.3 Ecorr vs. Re

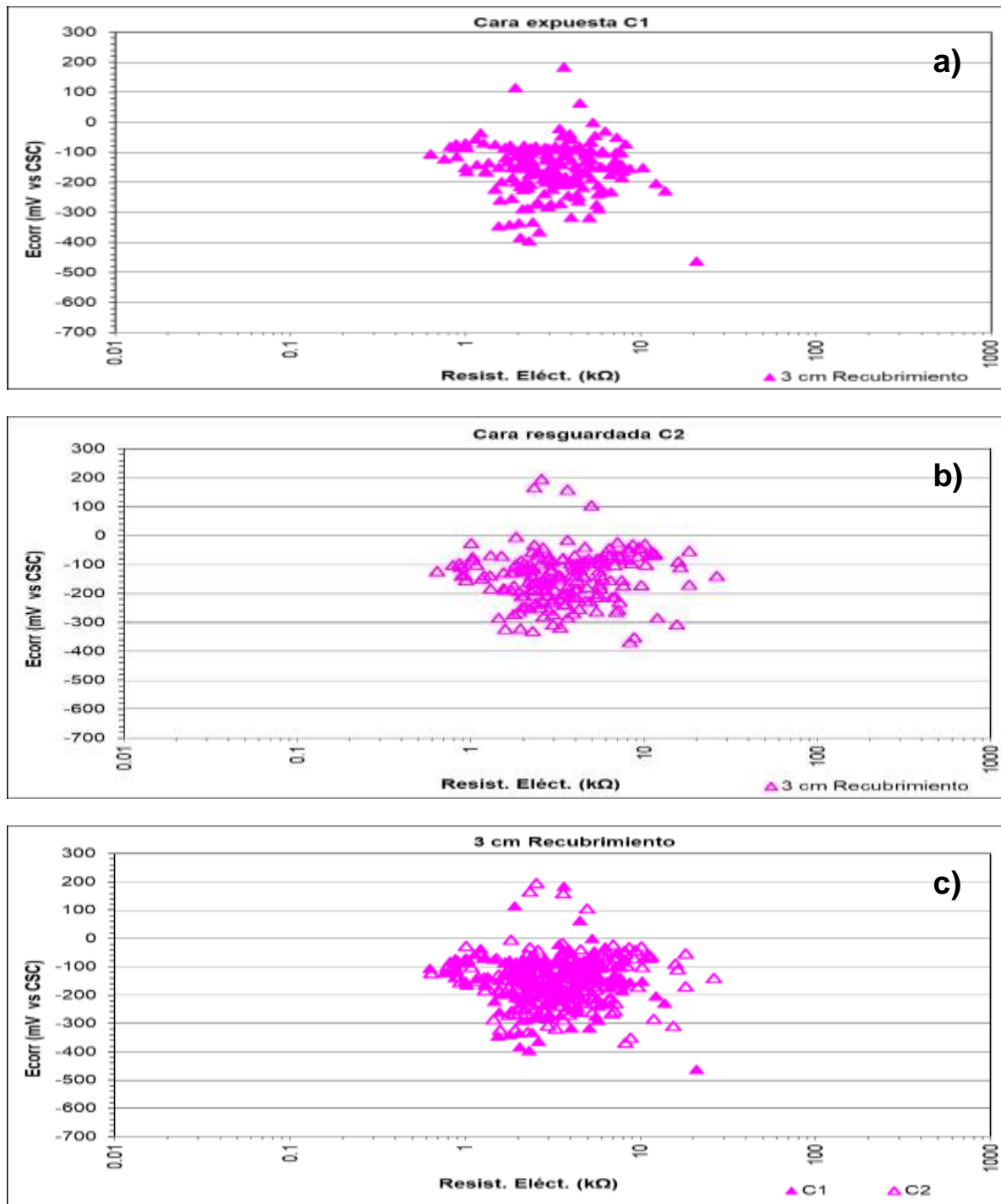


Figura 5.20 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

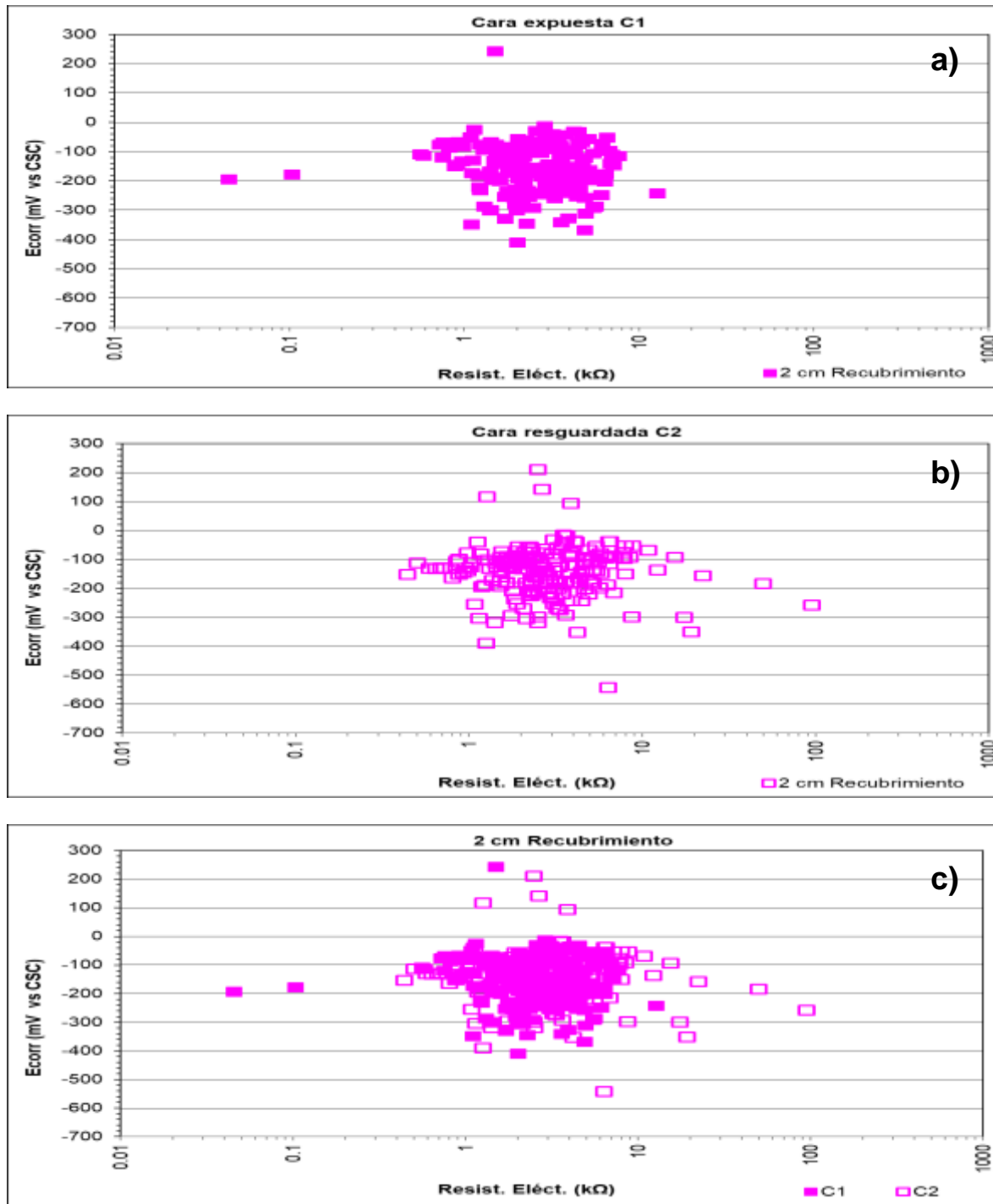


Figura 5.21 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

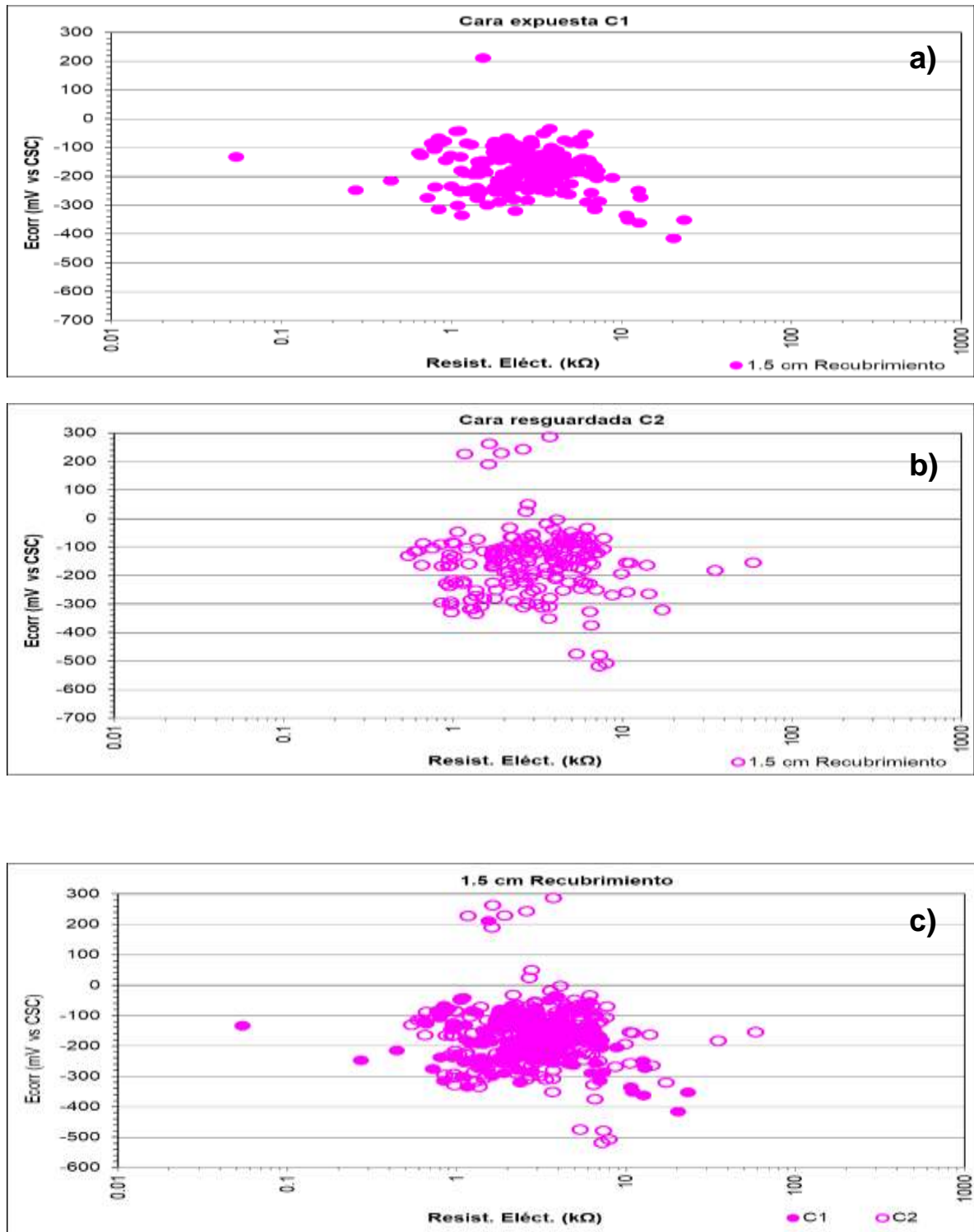


Figura 5.22 Potencial de corrosión (Ecorr) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

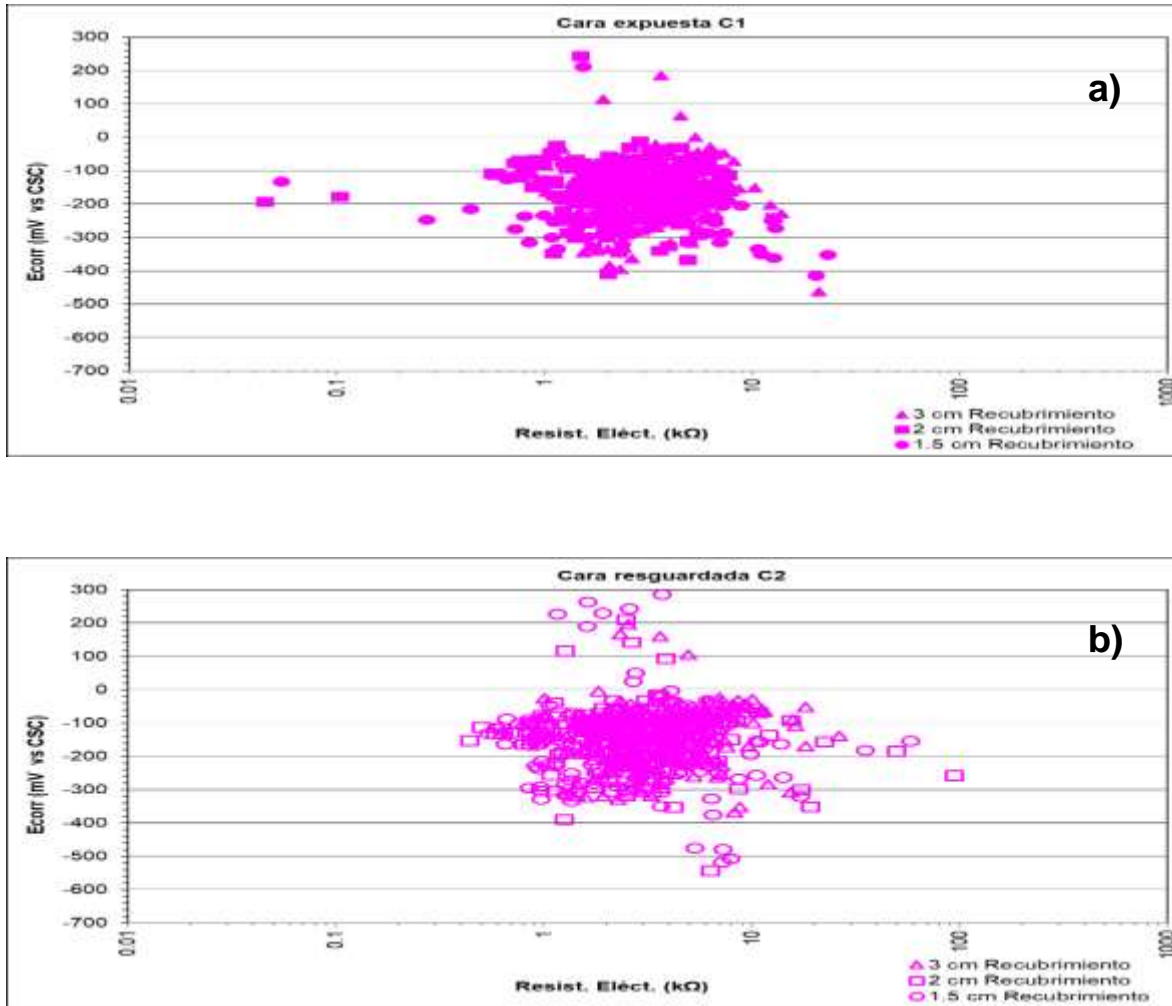


Figura 5.23 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

5.2 Resultado de las correlaciones entre todas las estaciones de exposición mexicanas

Reuniendo todos los valores electroquímicos obtenidos de las diez estaciones evaluadas, se generan las siguientes gráficas de correlación entre estos parámetros, separándose únicamente por tipo de recubrimiento (1.5, 2.0 y 3.0 cm) de la siguiente manera:

- Figuras 5.24 a la 5.26: E_{corr} vs. i_{corr}
- Figuras 5.27 a la 5.29: i_{corr} vs. R_e
- Figuras 5.30 a la E_{corr} vs. R_e

A todas estas gráficas se colocaron líneas punteadas de color verde y rojo para delimitar los criterios de evaluación de la corrosión de acero de refuerzo de acuerdo con las tablas 1.1 y 1.2, dependiendo de los valores de E_{corr} , i_{corr} y R_e .

Se puede observar de las gráficas de E_{corr} vs. i_{corr} que, la gran mayoría (92%) de los datos se encuentra en los rangos de acero pasivo ($E_{corr} > -200$ mV vs. CSC; $i_{corr} < 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). También se observa que no existen diferencias entre los valores obtenidos de las estaciones urbanas (ocho estaciones) y las marinas (dos estaciones), ya que todos los puntos están unos sobre otros sin ninguna tendencia bien definida.

Para las gráficas de i_{corr} vs. R_e , se alcanza a apreciar una separación de los datos electroquímicos para los especímenes ubicados en Progreso y Mexicali, y algunos de Progreso y Oaxaca. Esta separación se debe a un incremento de los valores de R_e en estas cuatro estaciones de monitoreo. Revisando los datos meteorológicos en estas cuatro estaciones, se puede observar que la humedad relativa es de baja a muy baja ($< 50\%$) y las épocas de lluvia también son cortas. Por ello, el concreto permanece más tiempo seco que húmedo, lo que incrementa el valor de R_e del recubrimiento del concreto.

Lo interesante es que uno pensaría que la estación de Progreso, al ser marina, el concreto podría estar contaminado por cloruros, y con justa razón los valores de R_e deberían estar en los rangos bajos ($0.1 \text{ k}\Omega < R_e < 1.0 \text{ k}\Omega$), pero no fue así. Esto podría deberse a que la estación de Progreso se encuentra en una zona de poca lluvia y lejana a la brisa marina (> 700 m), por lo que aparentemente los cloruros no afectaron el concreto al disminuirle su resistencia eléctrica. Por ello, esta estación marina podría considerarse como atípica.

Con todo lo recabado hasta el momento en cuanto a datos electroquímicos de estas 10 estaciones mexicanas, se puede concluir que, después de poco más de 15 años de estar en funcionamiento, el concreto fabricado para este proyecto ha demostrado tener las características de un concreto muy durable.

5.2.1 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. potencial de corrosión (E_{corr})

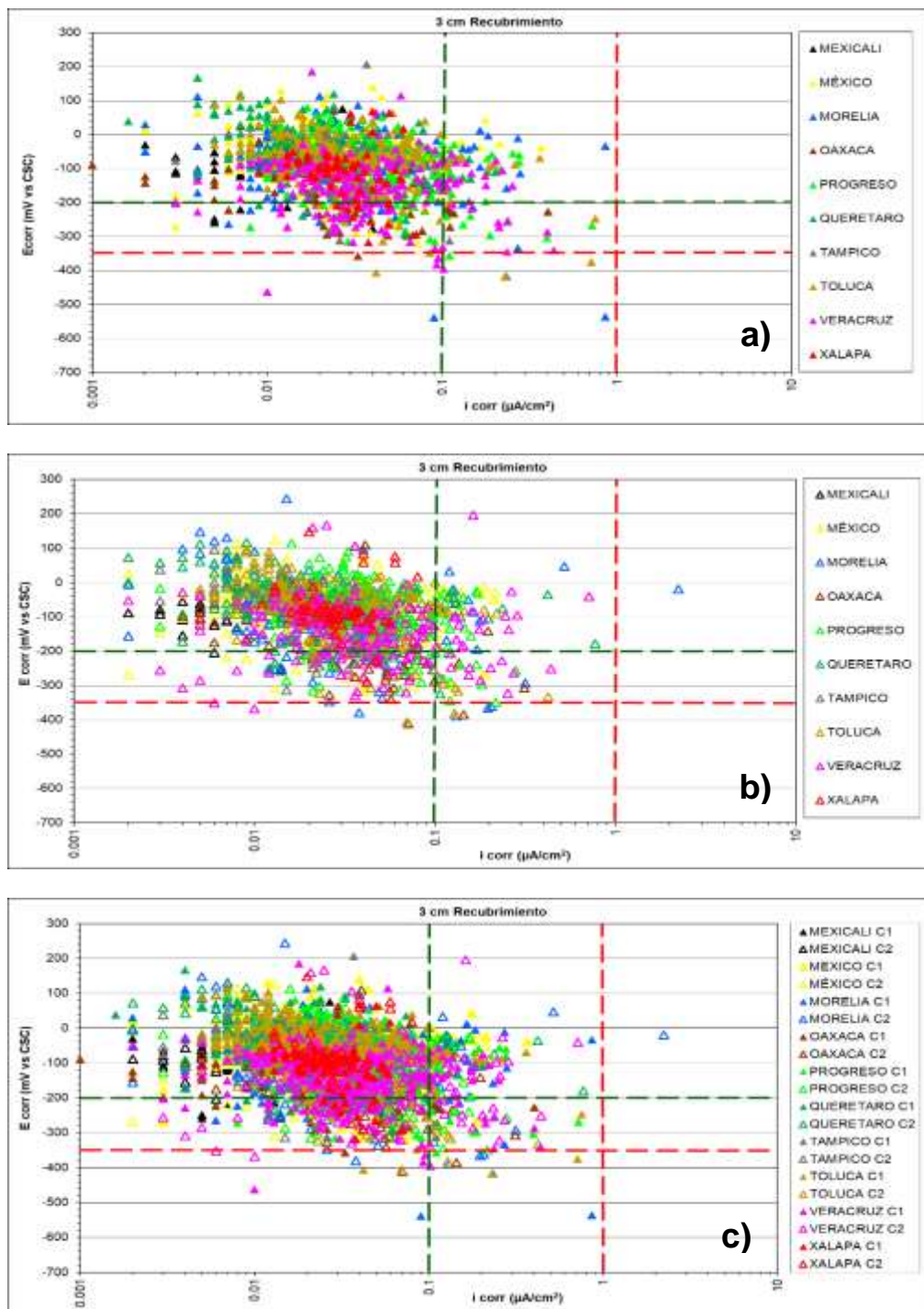


Figura 5.24 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. potencial de corrosión (E_{corr}) para 3 cm de recubrimiento de todas las estaciones de monitoreo: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

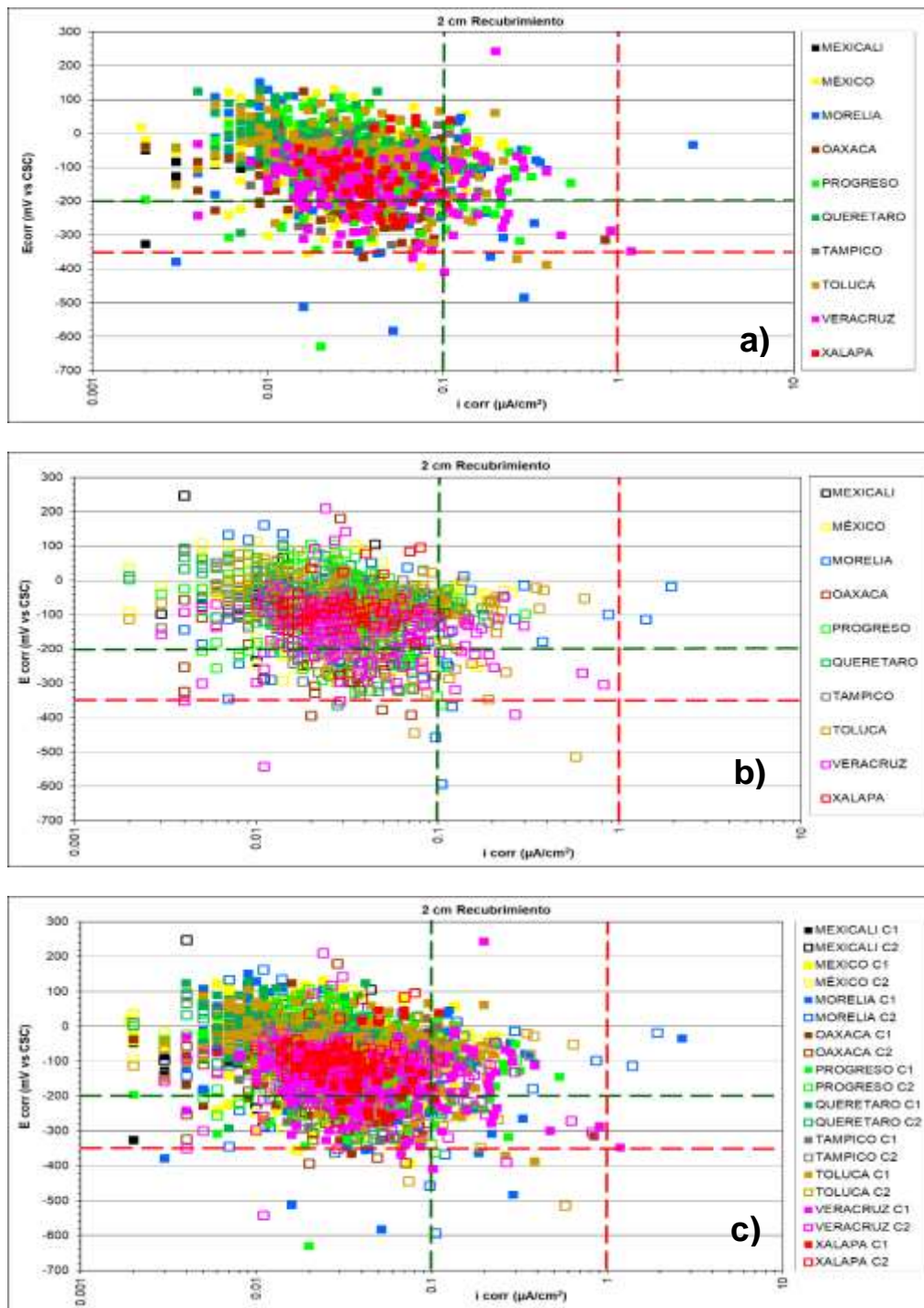


Figura 5.25 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. potencial de corrosión (E_{corr}) para 2 cm de recubrimiento de todas las estaciones de monitoreo: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

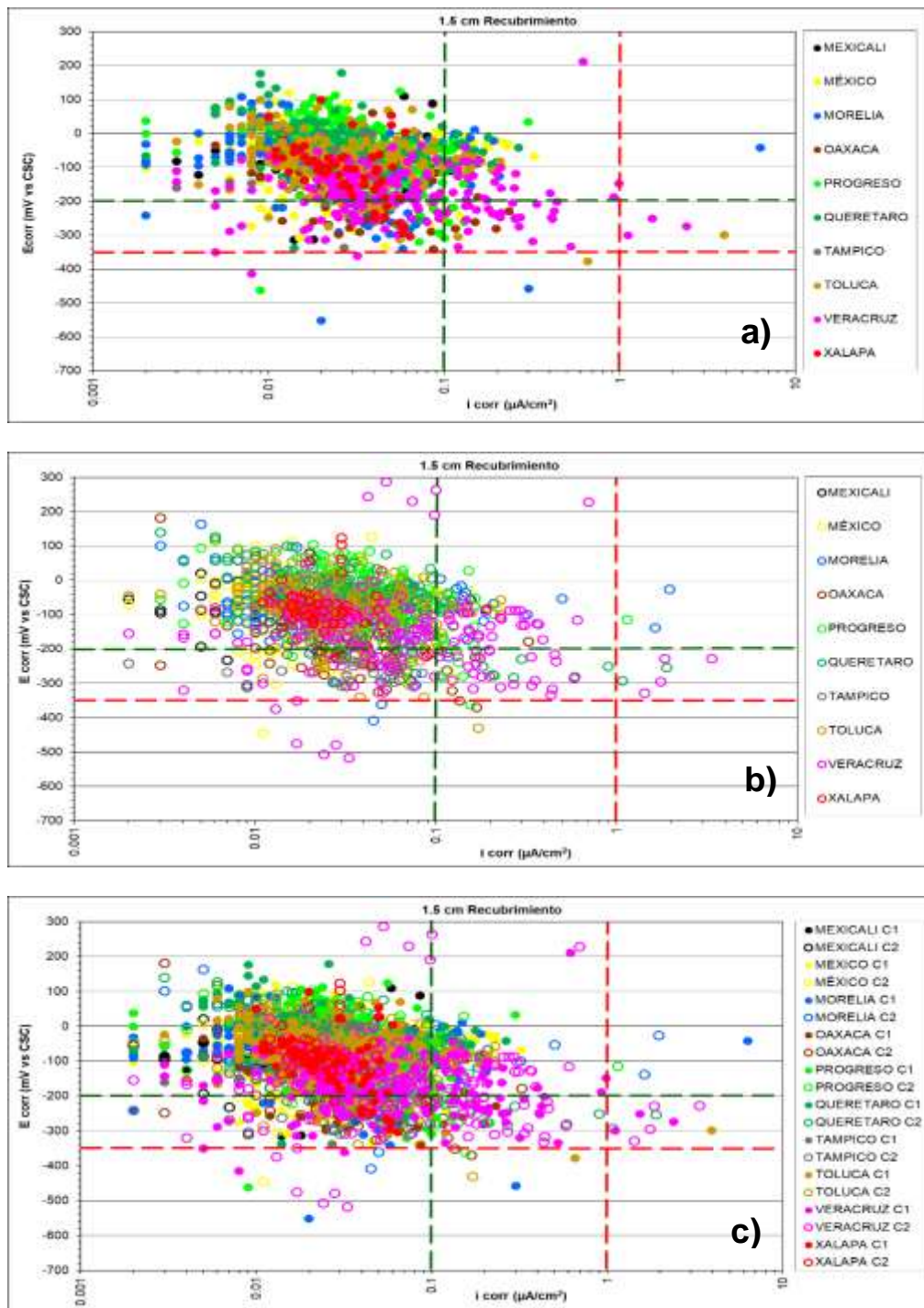


Figura 5.26 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. potencial de corrosión (E_{corr}) para 1.5 cm de recubrimiento de todas las estaciones de monitoreo: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

5.2.2 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica

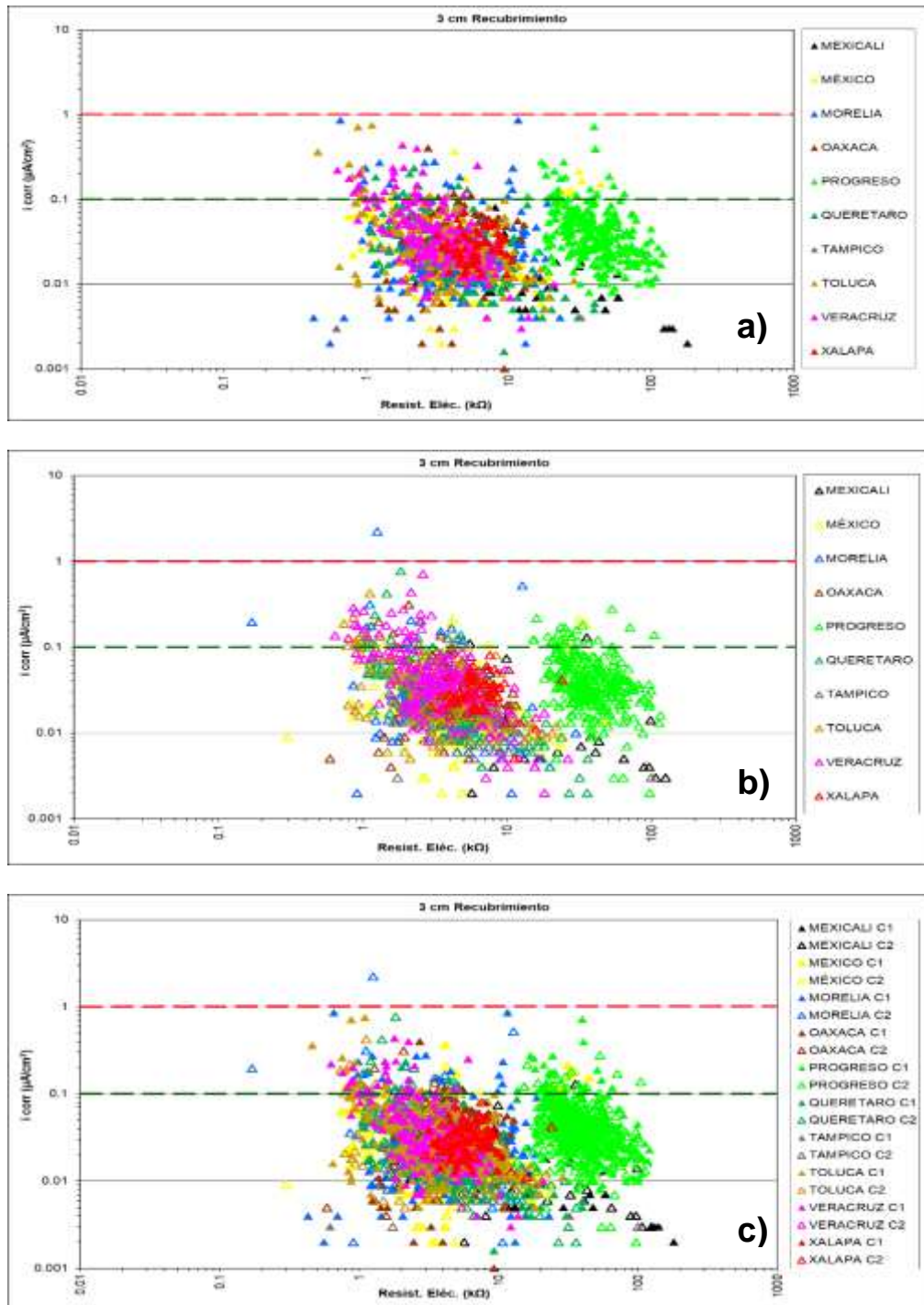


Figura 5.27 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléc.) para 3 cm de recubrimiento de todas las estaciones de monitoreo: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

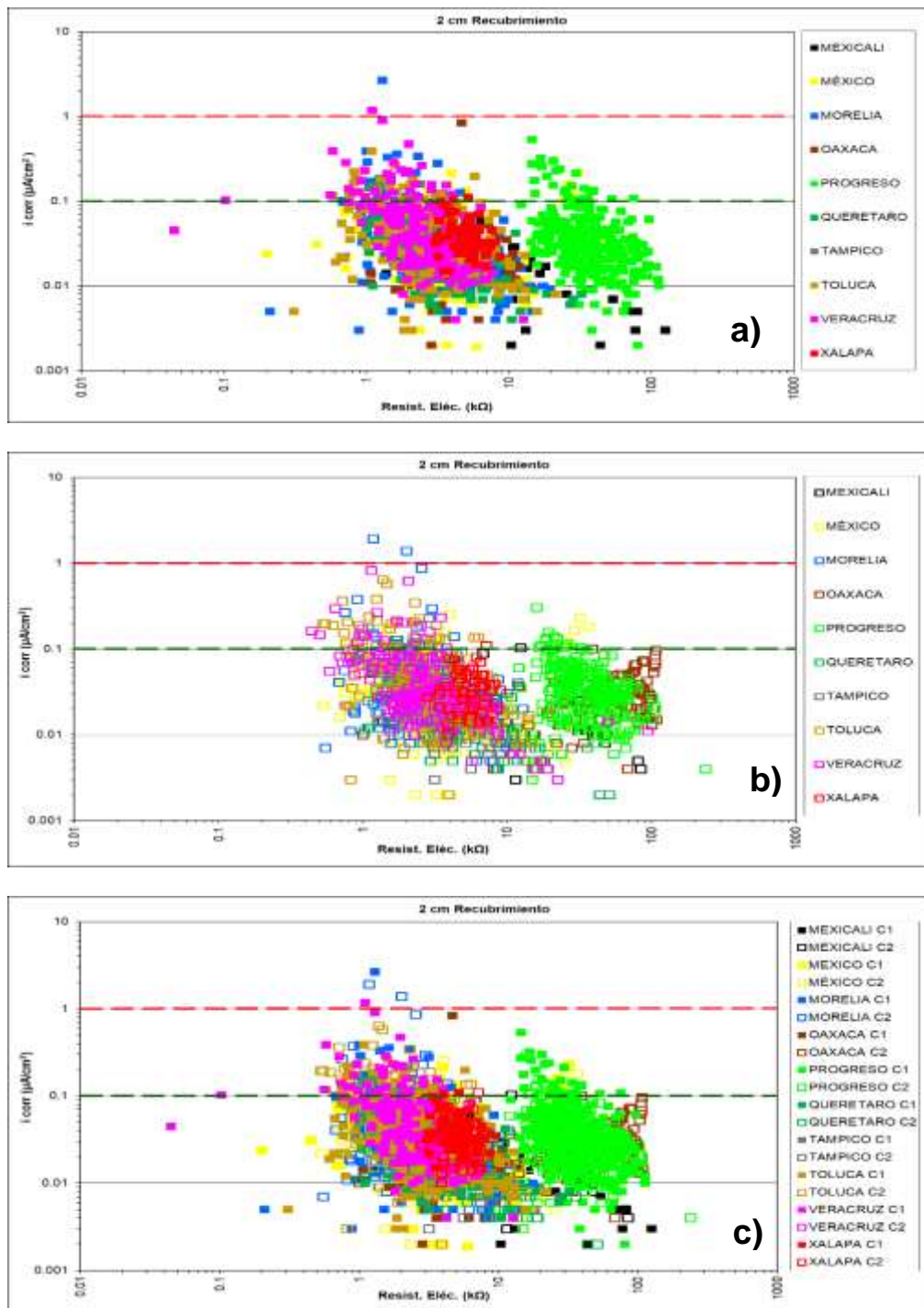


Figura 5.28 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléc.) para 2 cm de recubrimiento de todas las estaciones de monitoreo: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

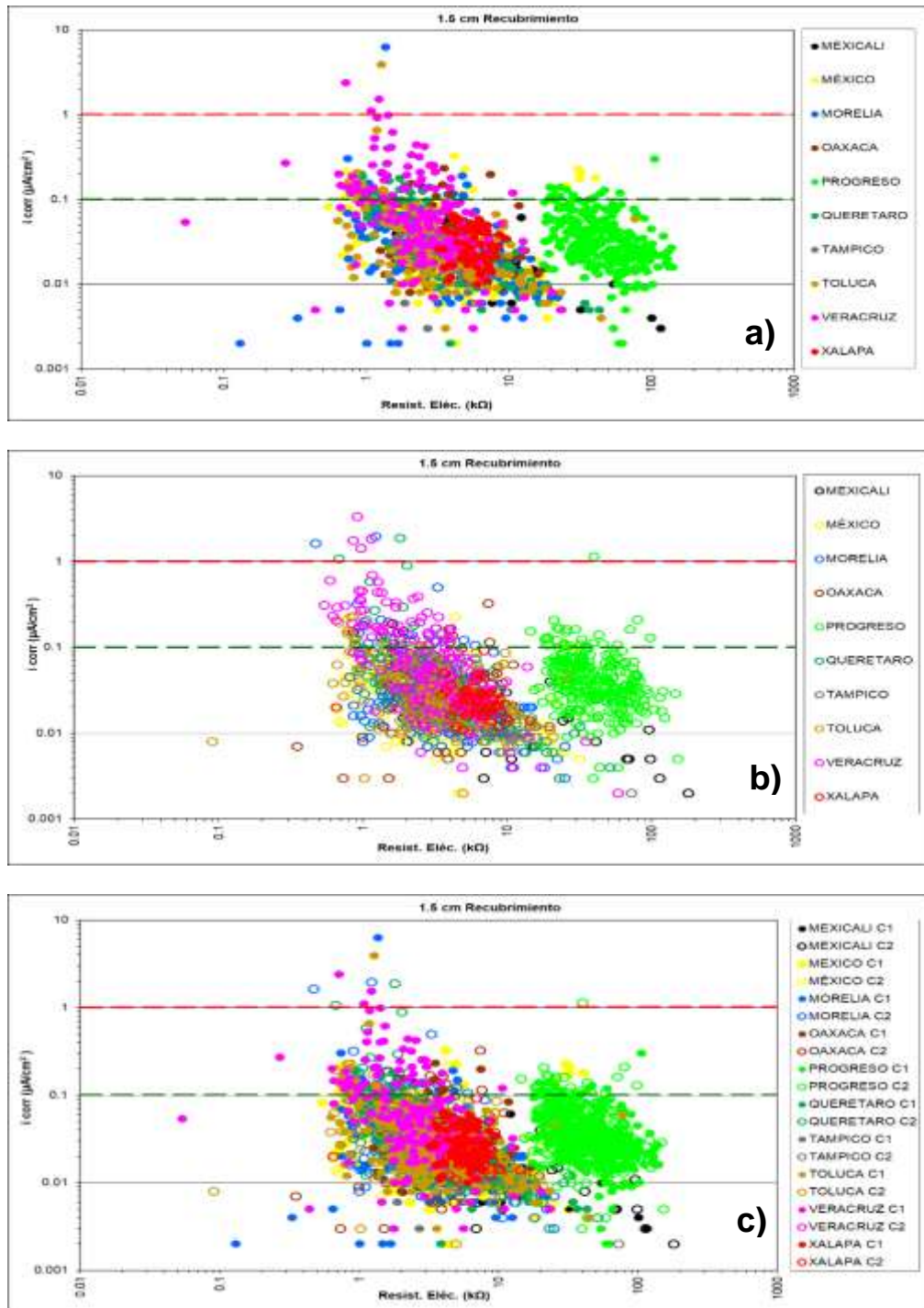


Figura 5.29 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléc.) para 1.5 cm de recubrimiento de todas las estaciones de monitoreo: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

5.2.3 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica

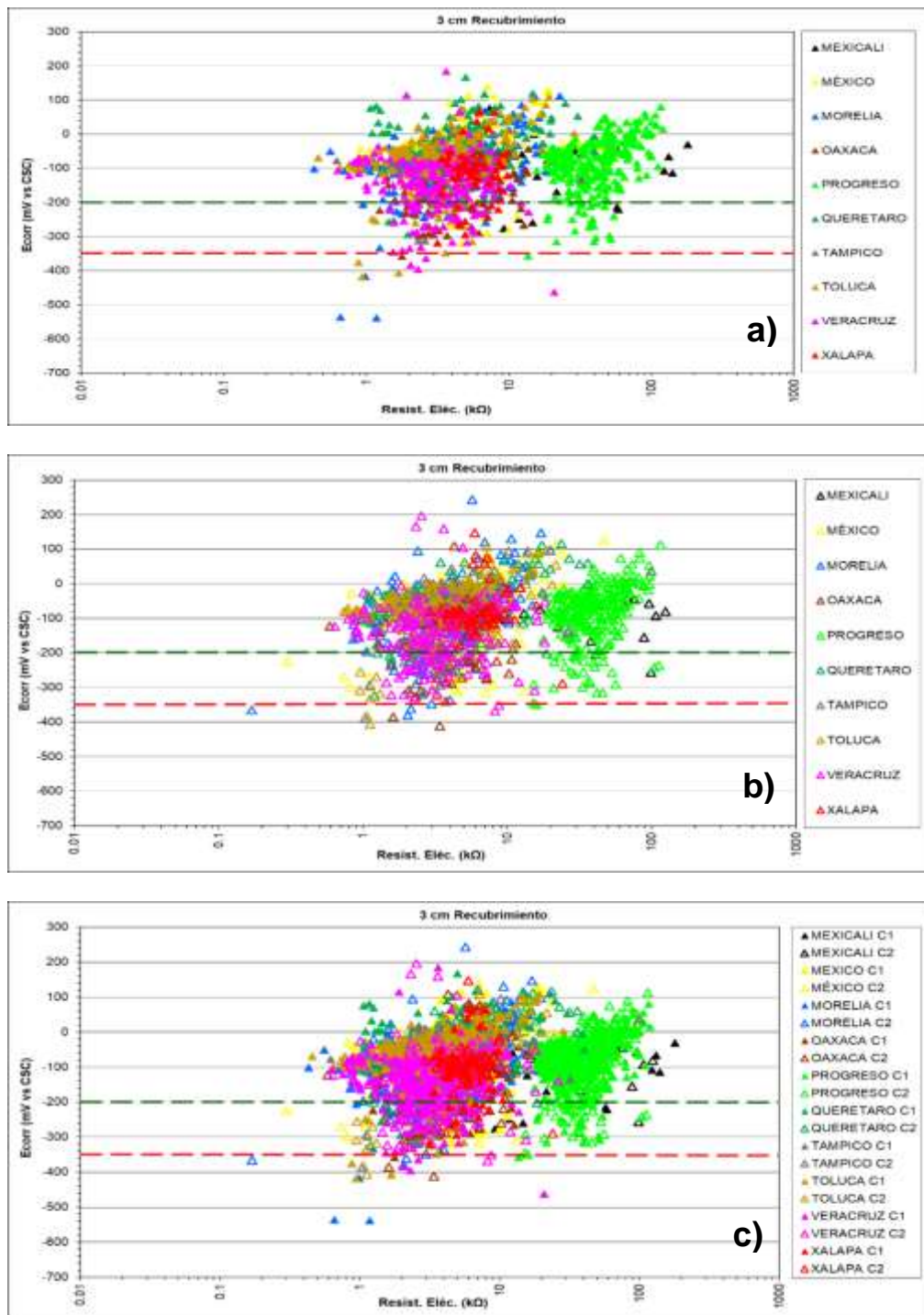


Figura 5.30 Potencial de corrosión (icorr) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléc.) para 3 cm de recubrimiento de todas las estaciones de monitoreo: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

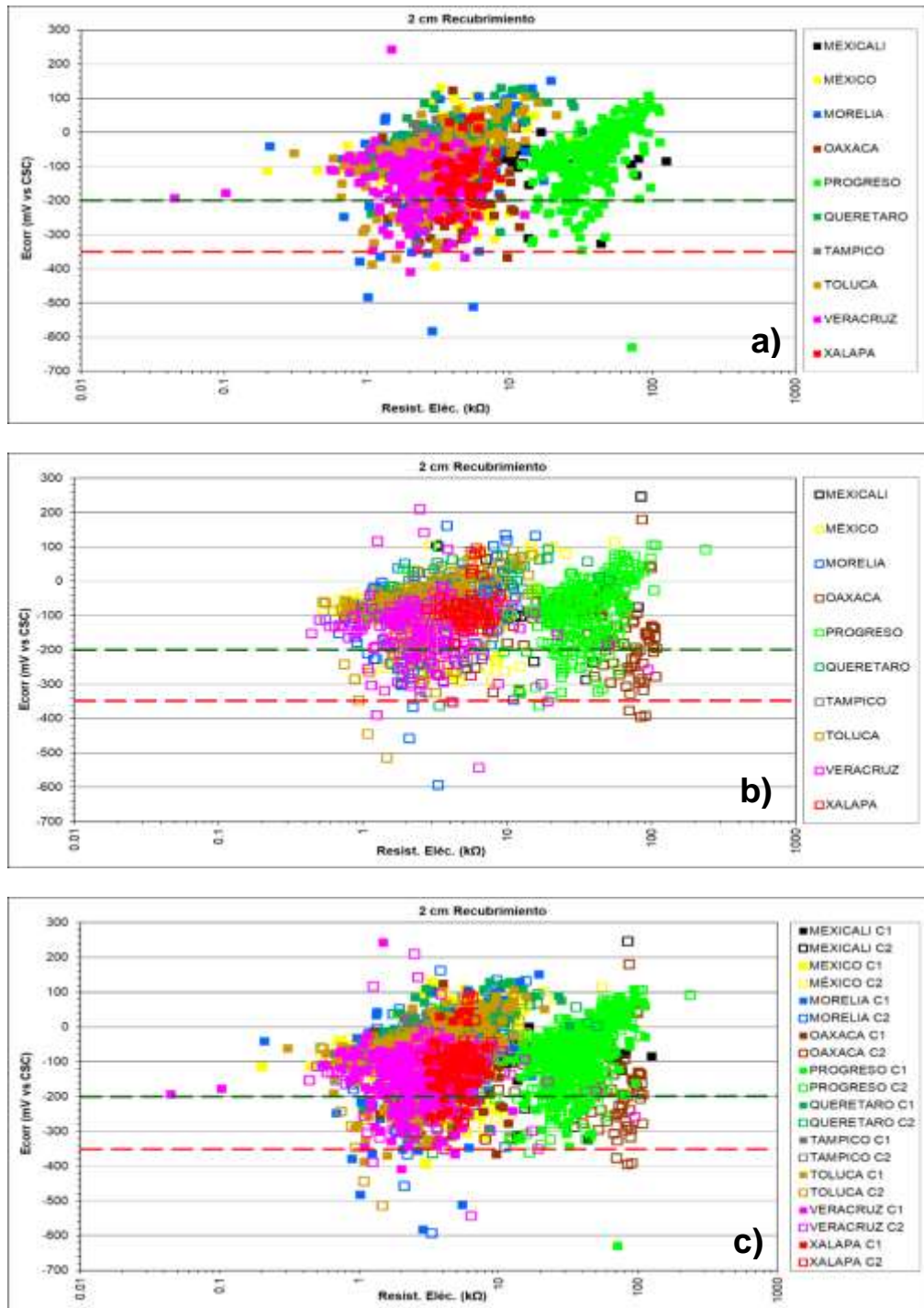


Figura 5.31 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléc.) para 2 cm de recubrimiento de todas las estaciones de monitoreo: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.

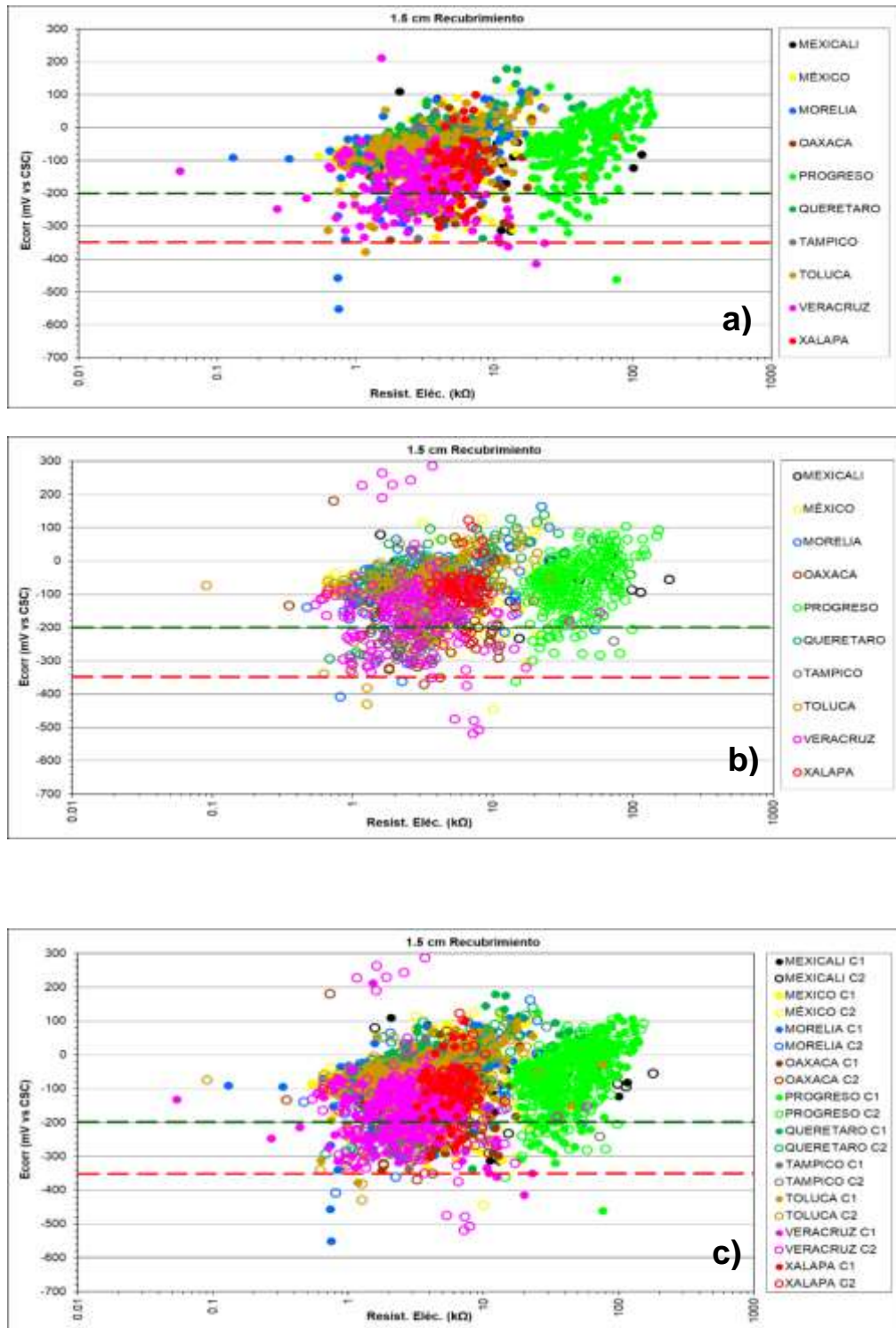


Figura 5.32 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléc.) para 1.5 cm de recubrimiento de todas las estaciones de monitoreo: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2; c) C1 vs. C2.

5.3 Velocidad de corrosión acumulada

5.3.1 Estaciones de monitoreo en zonas urbanas

En las figuras 5.33 y 5.34, se muestran gráficas con los datos correspondientes al comportamiento de velocidad de corrosión acumulada en la cara expuesta (C1) y resguardada (C2) de los especímenes con $a/c=0.45$ expuestos a un ambiente urbano, tomando como ejemplo la estación de Querétaro. En el anexo F se encuentran las gráficas de velocidad de corrosión acumulada de las estaciones urbanas restantes.

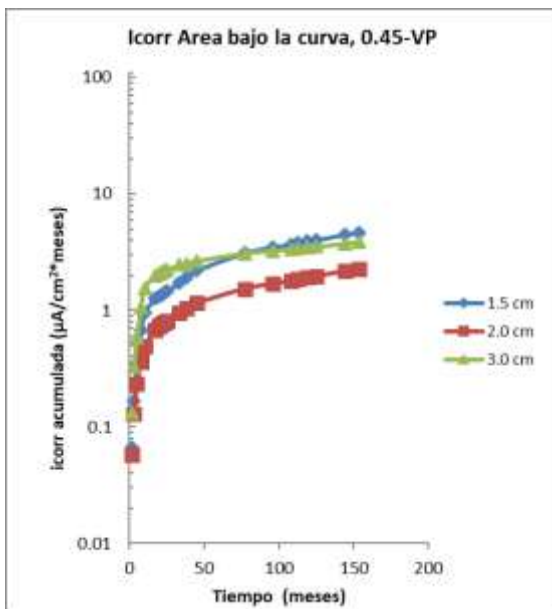


Figura 5.33 Velocidad de corrosión acumulada de la cara expuesta C1 de la estación (Mx8) Querétaro.

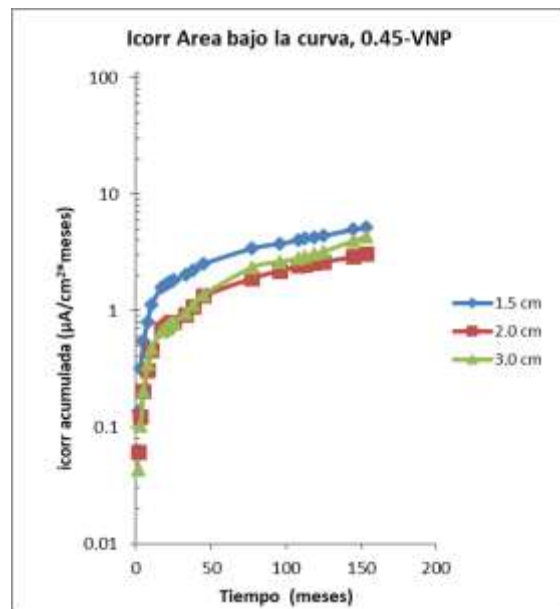


Figura 5.34 Velocidad de corrosión acumulada de la cara resguardada C2 de la estación (Mx8) Querétaro.

Se puede observar que los resultados de icorr acumulada en las estaciones urbanas inician con una tendencia asintótica, producto, aparentemente, del secado de los especímenes, ya que, en un principio, los especímenes estaban húmedos al estar en la cámara de curado por 28 días (un mes aproximadamente) y después se flejaron en cajas de madera protegidos con poliestireno dentro de ellas para evitar posibles impactos en los mismos durante el traslado a las estaciones de exposición. Esto mantuvo a los especímenes bastante húmedos hasta que se colocaron en las estaciones donde, por efecto del ambiente de exposición, el acero de refuerzo fue mostrando una pasivación paulatina al disminuir el valor de icorr y, por ende, la

pendiente de estos valores fue acercándose a un valor máximo constante. Esto se puede observar mejor en los valores de i_{corr} acumulado para las probetas con $a/c=0.65$. El acero de refuerzo con 1.5 cm de recubrimiento, cuyo cambio fue más repentino porque el secado en este recubrimiento menor fue a una mayor velocidad que los de 2 cm y 3 cm, que estuvieron con mayor tiempo de humedad antes de perderlo de igual manera que el de menor recubrimiento. De esta manera, se llegó a un valor constante de humedad interna en relación con la humedad externa de exposición, como puede observarse en las figuras 5.35 y 5.36.

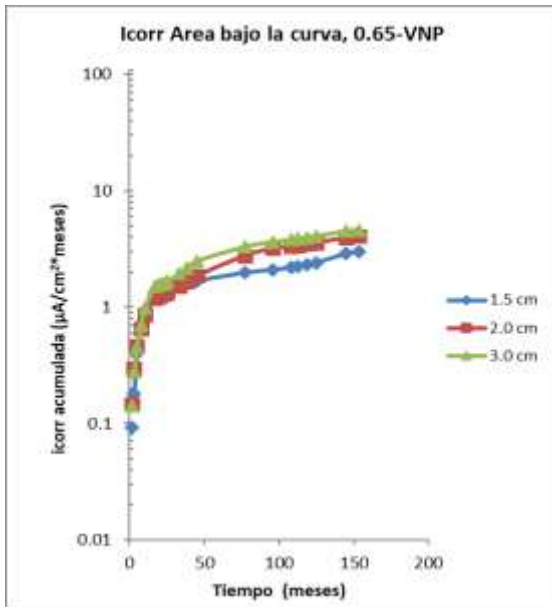


Figura 5.36 Velocidad de corrosión acumulada en la cara expuesta de la estación (Mx8) Querétaro.

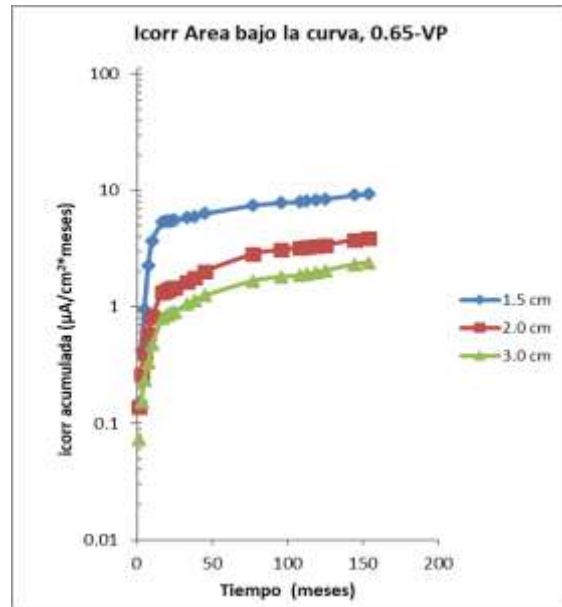


Figura 5.35 Velocidad de corrosión acumulada en la cara resguardada de la estación (Mx8) Querétaro.

5.3.2 Estaciones de monitoreo en zonas marinas

En las figuras 5.37 y 5.38, se muestran los datos correspondientes al comportamiento de velocidad de corrosión acumulada en la cara expuesta (C1) y resguardada (C2) de los especímenes, con una $a/C=0.45$, expuestos a un ambiente marino, tomando como ejemplo la estación de Veracruz. En el anexo G, se encuentran las gráficas de velocidad de corrosión acumulada de las estaciones marinas restantes.

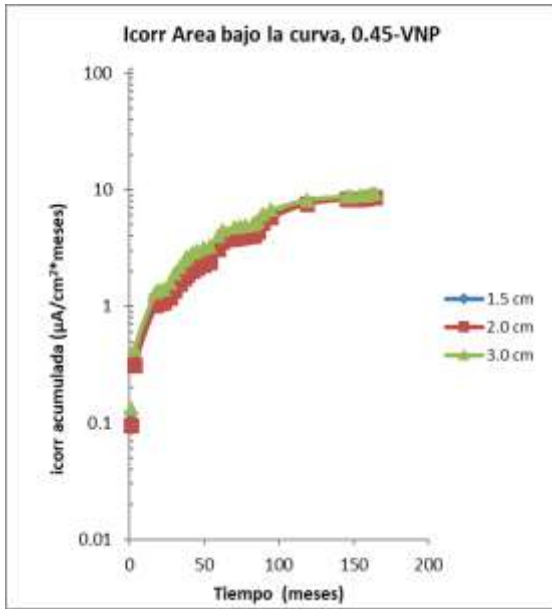


Figura 5.37 Velocidad de corrosión acumulada de la cara expuesta C1 de la estación (Mx6) Veracruz.

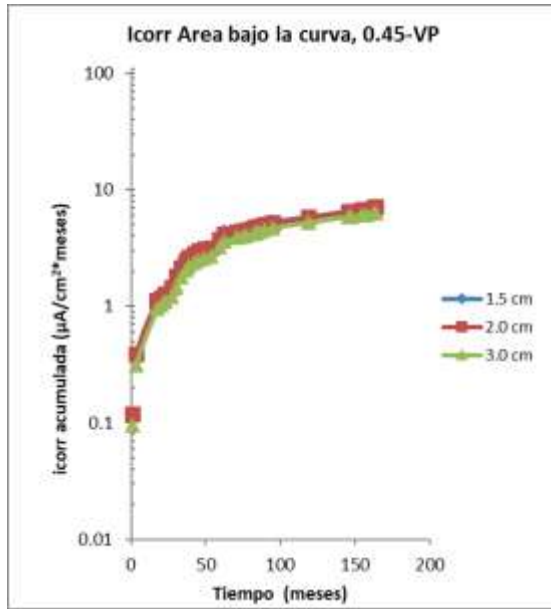


Figura 5.38 Velocidad de corrosión acumulada de la cara resguardada C2 de la estación (Mx6) Veracruz.

De nueva cuenta, En las figuras 5.37 y 5.38 se ve un comportamiento similar de esta icorr acumulada en el tiempo, como se observó en los valores de las estaciones urbanas, donde se observa una tendencia asintótica del icorr acumulado con el tiempo de exposición.

Para las probetas con una $a/c = 0.65$ (figuras 5.39 y 5.40), se observa que la tasa de cambio para el icorr acumulado del acero de refuerzo con 1.5 cm de recubrimiento fue mayor, en la mayoría de los casos, que el obtenido con los valores de los refuerzos a 2 cm y 3 cm de recubrimiento.

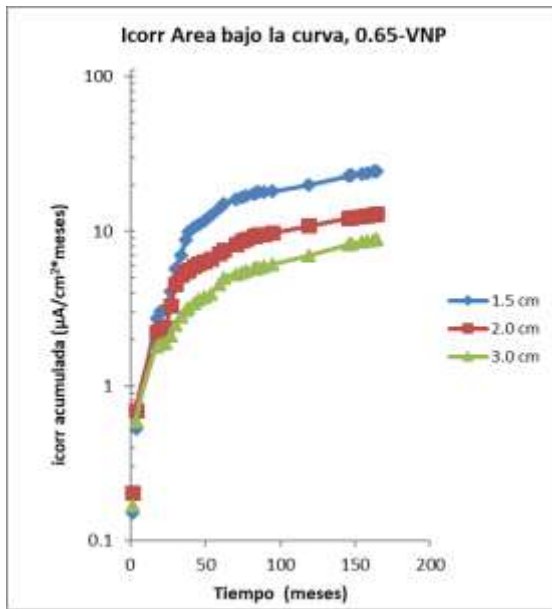


Figura 5.39 Velocidad de corrosión acumulada de la cara expuesta C1 de la estación (Mx6) Veracruz.

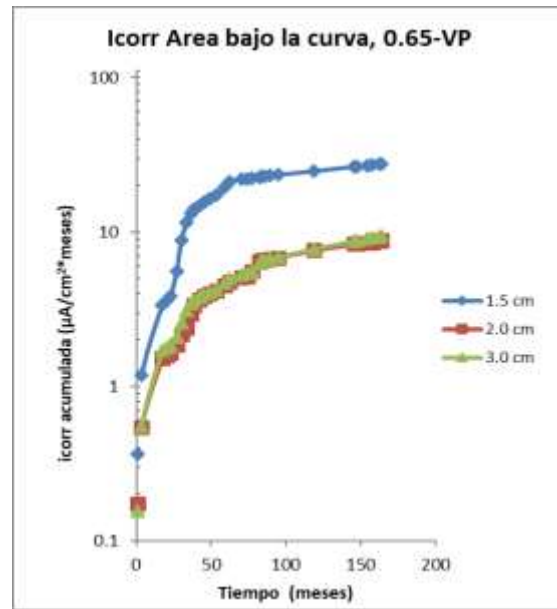


Figura 5.40 Velocidad de corrosión acumulada de la cara resguardada C2 de la estación (Mx6) Veracruz.

6 Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos en la presente actualización de datos de los especímenes de concreto expuestos en las estaciones de DURACON México, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

Los especímenes de concreto fabricados y expuestos en las estaciones de México no muestran daños por corrosión del acero de refuerzo, aún después de poco más de 15 años de exposición. Esto demuestra que los concretos de relación agua-cemento (a/c) menores que 0.65 y fabricados con cemento tipo CPO (contenido de Clinker >95%) son durables en los ambientes de exposición seleccionados en este proyecto.

El comportamiento electroquímico de los aceros de refuerzo en las estaciones presentadas en esta investigación muestran valores que indican pasivación en la mayoría de los especímenes utilizados. Únicamente un par de ellos —en las estaciones de Morelia y Veracruz— mostraron indicios de una incipiente corrosión en algunas de las varillas de acero colocadas en los especímenes, pero mostraron activación en las fechas de humedad alta o en época de lluvias, y después se volvieron a pasivar en época de poca precipitación pluvial.

Las gráficas de E_{corr} vs. i_{corr} , i_{corr} vs. R_e y de E_{corr} vs. R_e , donde se colocaron todos los valores de las 10 estaciones evaluadas en esta investigación, mostraron encontrarse en las zonas de pasivación o corrosión incipiente, por lo que se continuará con el monitoreo de estas estaciones en la continuación del proyecto.

Las gráficas de velocidad de corrosión (i_{corr}) acumuladas muestran también valores incipientes en comparación con resultados mostrados en publicaciones anteriores producto de las evaluaciones hechas en las estaciones marinas del Proyecto DURACON Internacional, lo que corrobora que es necesario continuar con el monitoreo de estas estaciones por un periodo mayor en espera de que alguna de ellas muestre indicios de activación por corrosión del acero de refuerzo en los concretos fabricados en México.

Bibliografía

ACI Committee 201 (1982), *Guide to durable concrete*. Report ACI 201R, American Concrete Institute, Detroit, EUA.

American Society for Testing and Materials (1991), *ASTM C 876-91: Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. ASTM, Filadelfia, EUA.

Del Valle M., A.; T. Pérez López, y M. Martínez (2001), *El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado*. Publicación técnica 182. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte. México, D.F.

Giancoli, C. D. (2006), *FÍSICA. Principios con aplicaciones*. 6ª Ed. Pearson Educación. México, D.F.

IMTA (2009), *Conocimiento y tecnología para la gestión sustentable del agua. Informe anual 2009*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México, D.F.

López Celis, R. et al., (2006). *Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México*. Publicación técnica 292. Secretaría de Comunicaciones y Transportes; Instituto Mexicano del Transporte. México, D.F.

McCormac, J. (2011). *Diseño de concreto reforzado*. Alfaomega. México. D.F.

Red DURAR. (2000). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*, CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Subprograma XV Corrosión/Impacto Ambiental sobre Materiales, CYTED, Maracaibo, 1997.

Rojas M., G. (2008). *Evaluación de estructuras de concreto por corrosión*. Tecnología en Marcha, Vol. 21, N.º 4, Octubre-Diciembre 2008, pp.69-78.

Torres Acosta, A. (2001). *Durabilidad de estructuras de concreto expuestas a un ambiente marino. Parte 1-periodo de iniciación de la corrosión (T1)*, Construcción y Tecnología, Vol. 13 No. 157, Junio 2001, pp 24-35, IMCYC. México D.F.

Torres Acosta, A. y M. Martínez M., (2001). *Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad*. Publicación técnica 181. Secretaría de Comunicaciones y Transportes; Instituto Mexicano del Transporte. México, D.F.

Troconis de Rincón, O.; Montenegro, J. C.; Vera, R.; Carvajal, A. M.; de Gutiérrez, R. M.; Del Vasto, S.; Saborio, E.; Torres Acosta, A.; Pérez Quiroz, J.; Martínez Madrid, M.; Lomelí González, G.; Araujo Arreola, N.; Martínez Molina, W.; Alonso Guzmán, E.; Castro Borges, P.; Balancán Zapata, M.; Pérez López, T.; Sosa Bas, M.; Baltazar Zamora, M.; Genesca Llongueras, J.; Salta, M.; de Melo, A. P.; Martínez, I.; Rebolledo, N.; Rodríguez, G.; Pedrón, M.; Millano, V.; Sánchez, M.; de

Partidas, E., y Mendoza, K. (2016). "Reinforced Concrete Durability in Marine Environments DURACON Project: Long-Term Exposure", *Corrosion*, vol. 72, N.º.6, pp. 824-833, ISSN: 0010-9312.

Troconis de Rincón, O.; Montenegro, J. C.; Vera, R.; Carvajal, A. M.; de Gutiérrez, R. M.; Del Vasto, S.; Saborio, E.; Torres Acosta, A.; Pérez Quiroz, J.; Martínez Madrid, M.; Martínez Molina, W.; Alonso Guzmán, E.; Castro Borges, P.; Moreno, E. I.; Almeraya, F.; Gaona Tiburcio, C.; Pérez López, T.; Salta, M.; de Melo, A. P.; Martínez, I.; Rebolledo, N.; Rodríguez, G.; Pedrón, M.; Millano, V.; Sánchez, M., y de Partidas, E. (2015). "Concrete Carbonation in Ibero-American Countries DURACON Project: Six-year Evaluation", *Corrosion*, vol. 71, N.º.4, pp. 546-555, ISSN: 0010-9312.

Troconis de Rincón, O.; Sánchez, M.; Millano, V.; Fernández, R.; de Partidas, E. A.; Andrade, C.; Martínez, I.; Castellote, M.; Barboza, M.; Irassar, F.; Montenegro, J. C.; Vera, R.; Carvajal, A. M.; de Gutiérrez, R. M.; Maldonado, J.; Guerrero, C.; Saborio Leiva, E.; Villalobos, A. C.; Tres Calvo, G.; Torres Acosta, A.; Pérez Quiroz, J.; Martínez Madrid, M.; Almeraya Calderón, F.; Castro Borges, P.; Moreno, E. I.; Pérez López, T.; Salta, M.; de Melo, A. P.; Rodríguez, G.; Pedrón, M., y Derrégibus, M. (2007). "Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in Iberoamerican countries: DURACON project/CYTED", *Corrosion Science*, vol. 49, pp. 2832-2843, ISSN: 0010-938X.

ANEXOS

Anexo A. Datos meteorológicos

Anexo A.1 Estación Mexicali (Mx10)

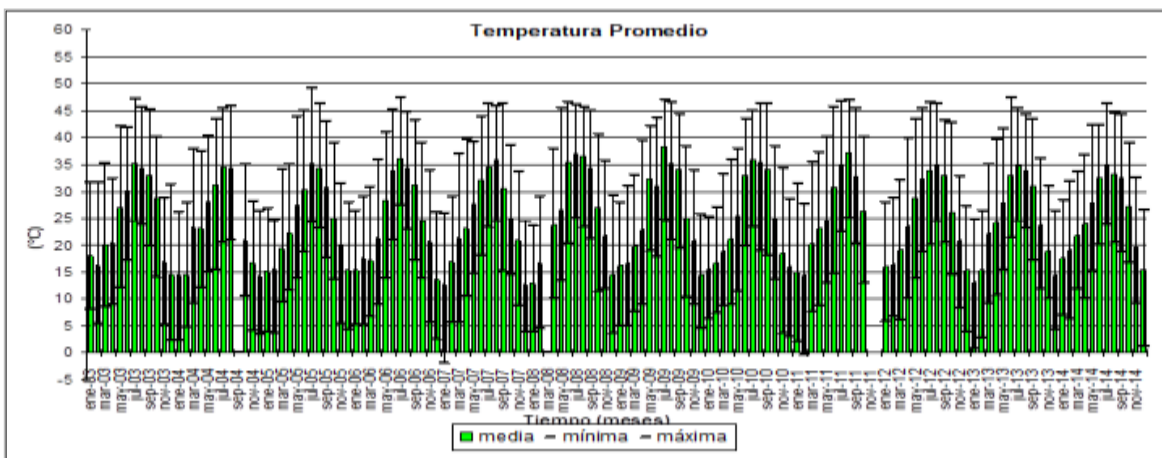


Figura A.1.1 Valores mensuales de la temperatura promedio de la estación (Mx10) Mexicali

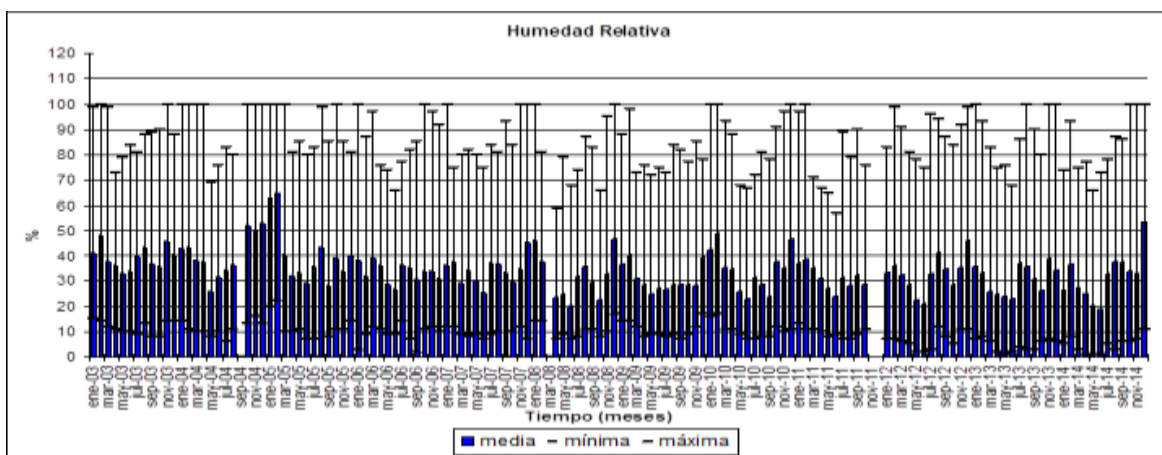


Figura A.1.2 Valores mensuales de la humedad relativa de la estación (Mx10) Mexicali

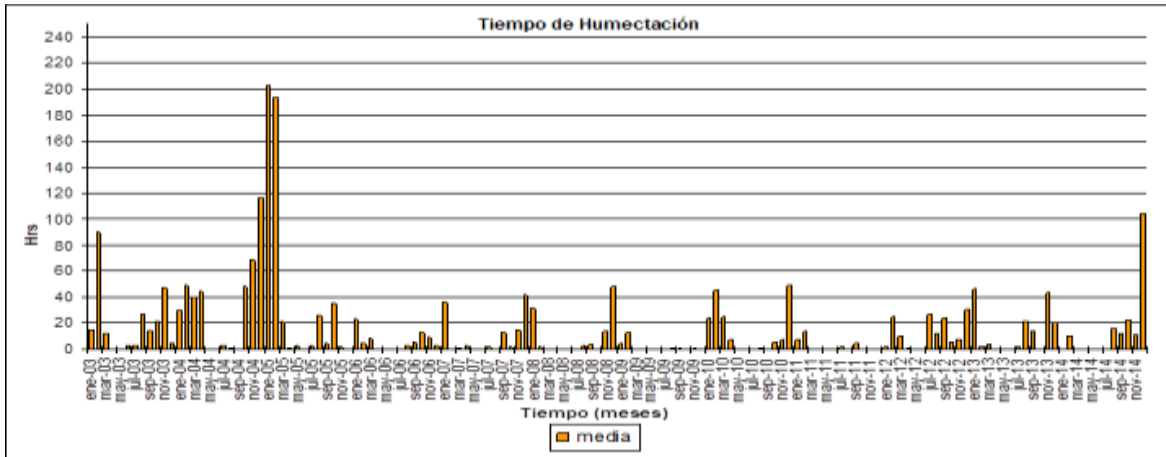


Figura A.1.3 Valores mensuales del tiempo de humectación de la estación (Mx10) Mexicali

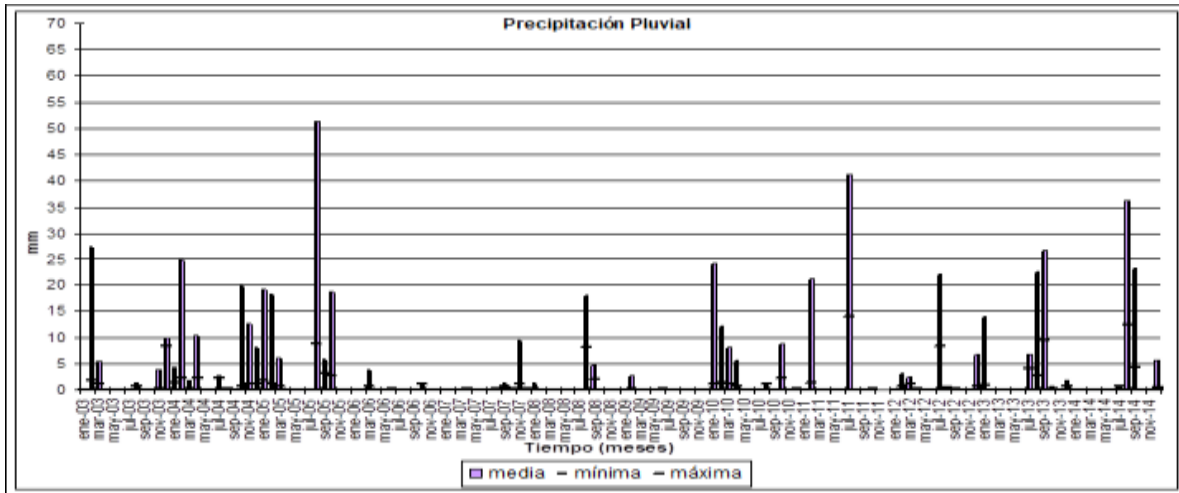


Figura A.1.4 Valores mensuales de la precipitación pluvial de la estación (Mx10) Mexicali

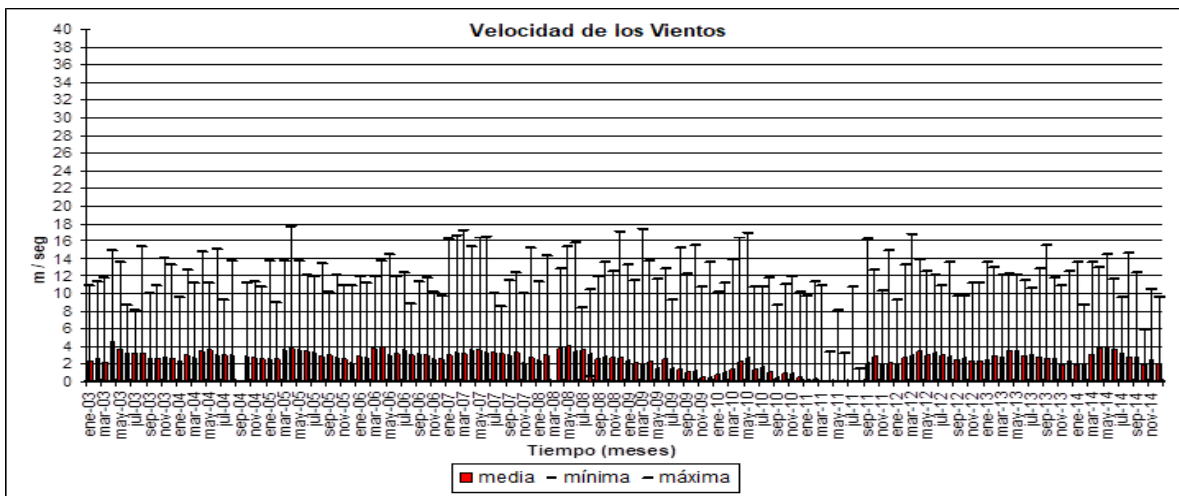


Figura A.1.5 Valores mensuales de la velocidad de los vientos de la estación (Mx10) Mexicali

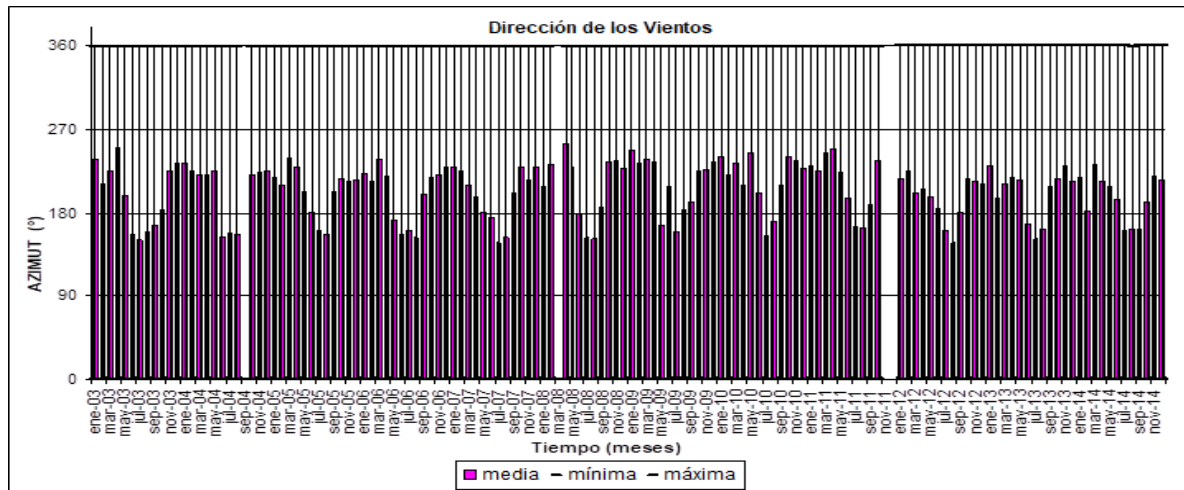


Figura A.1.6 Valores mensuales de la dirección de los vientos de la estación (Mx10) Mexicali

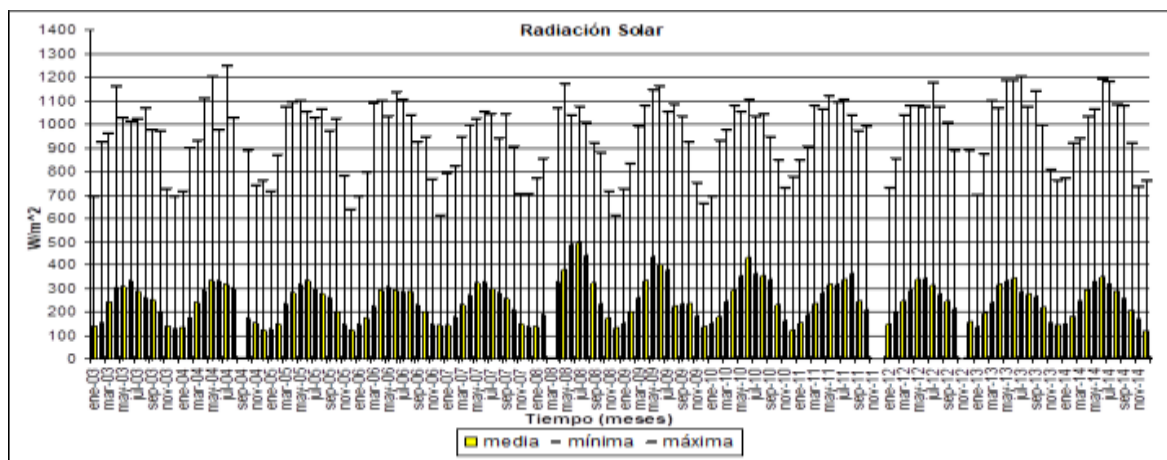


Figura A.1.7 Valores mensuales de la radiación solar de la estación (Mx10) Mexicali

Anexo A.2 Estación México D.F. (Mx7)

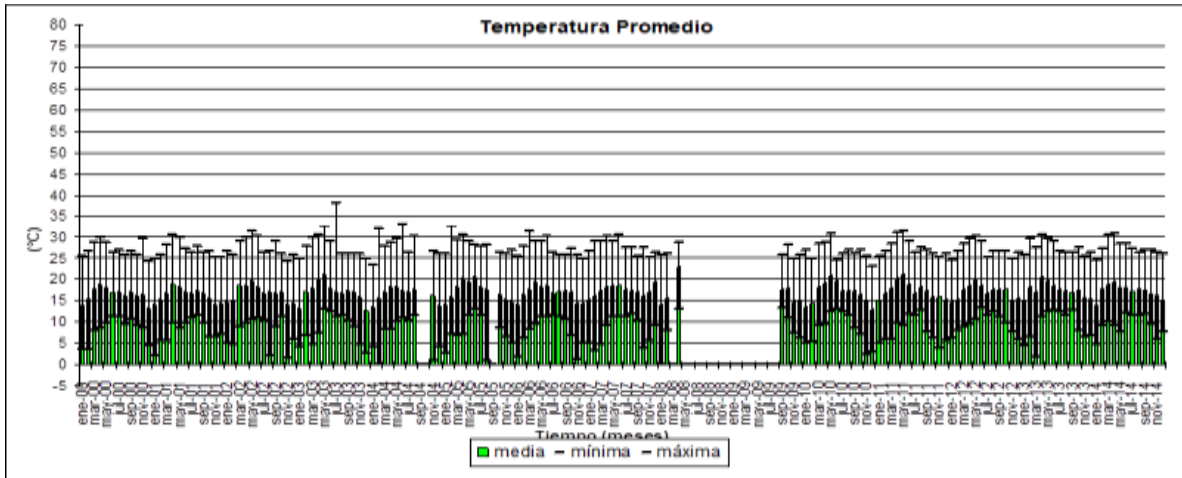


Figura A.2.1 Valores mensuales de la temperatura promedio de la estación (Mx7) México

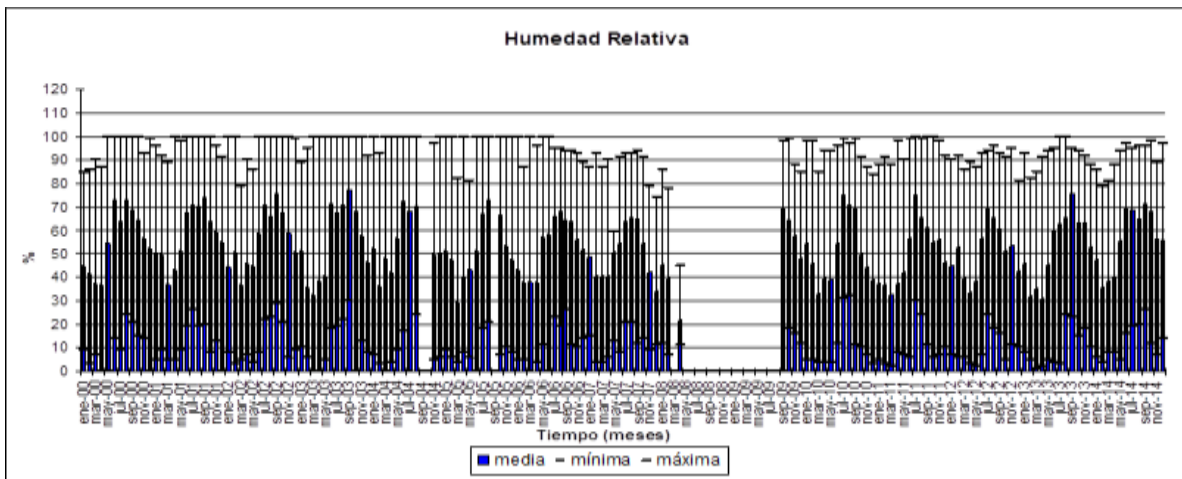


Figura A.2.2 Valores mensuales de la humedad relativa de la estación (Mx7) México

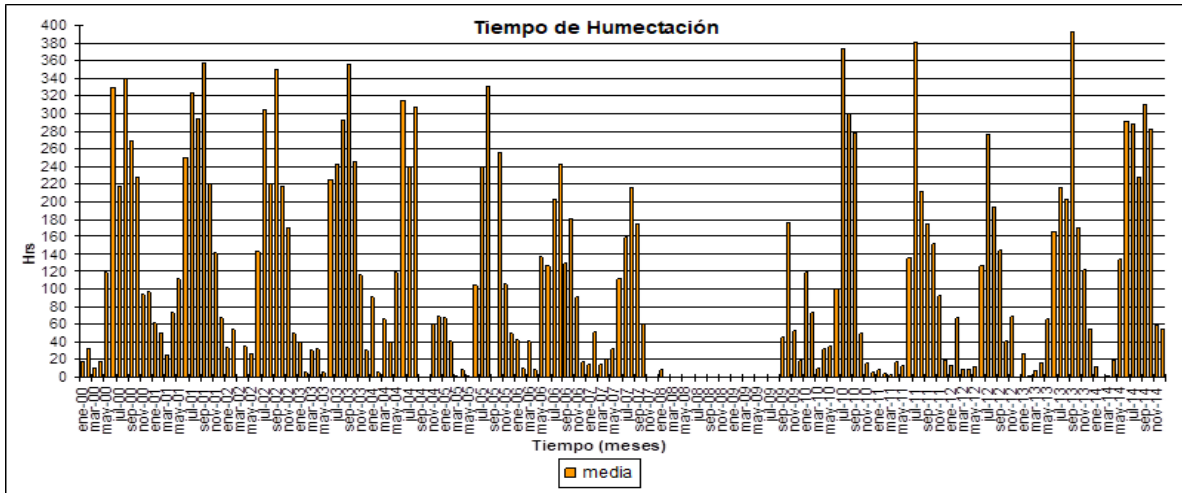


Figura A.2.3 Valores mensuales del tiempo de humectación de la estación (Mx7) México

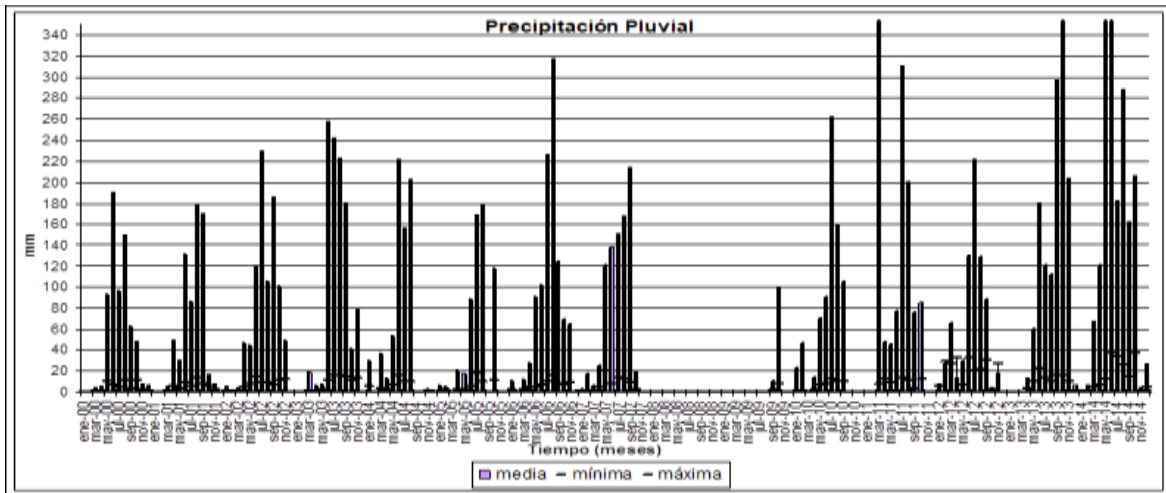


Figura A.2.4 Valores mensuales de la precipitación pluvial de la estación (Mx7) México

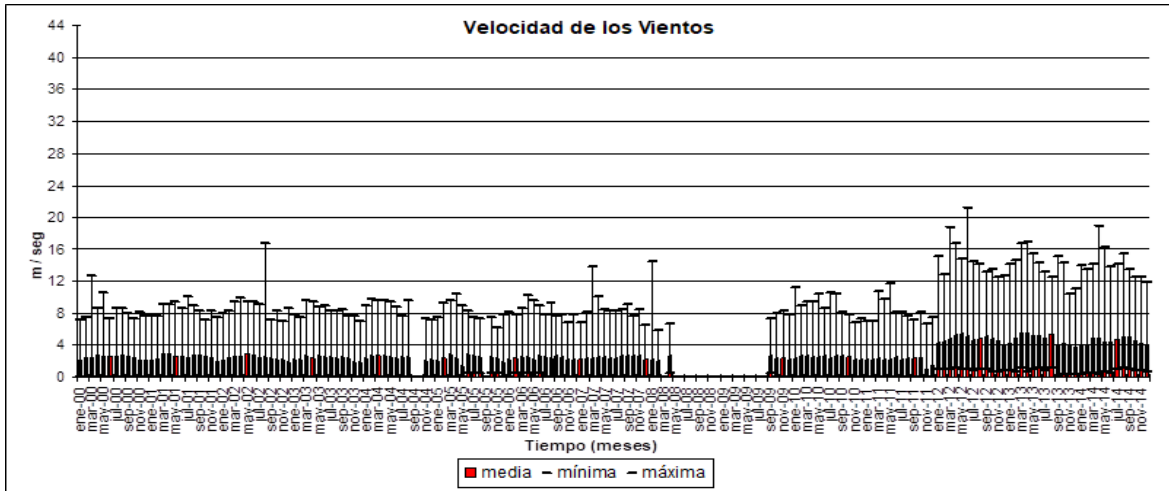


Figura A.2.5 Valores mensuales de la velocidad de los vientos de la estación (Mx7) México

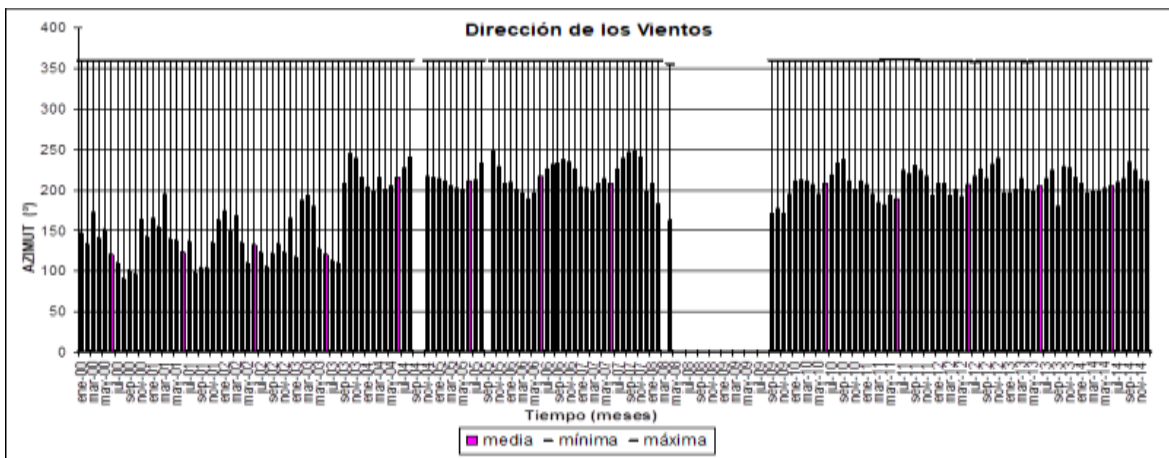


Figura A.2.6 Valores mensuales de la dirección de los vientos de la estación (Mx7) México

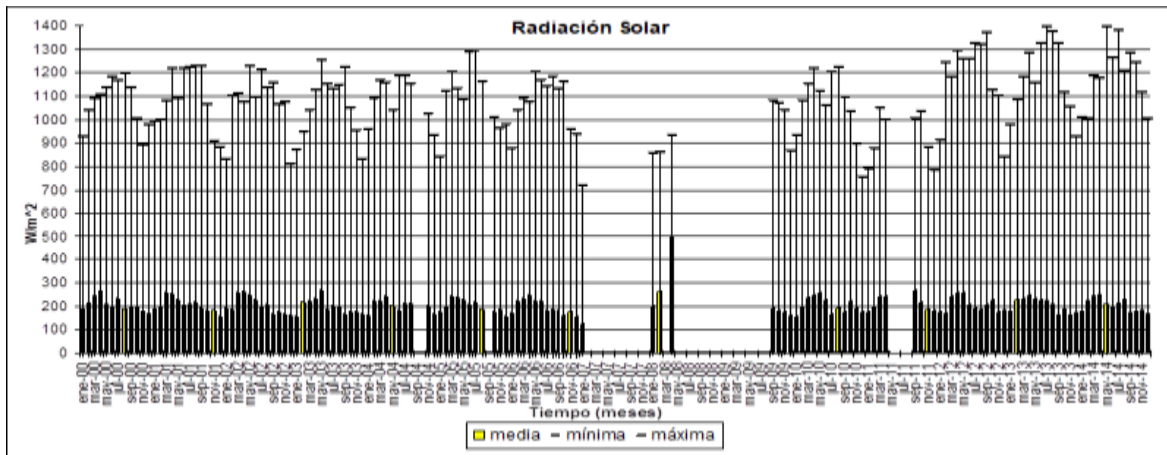


Figura A.2.7 Valores mensuales de la radiación solar de la estación (Mx7) México

Anexo A.3 Estación Morelia (Mx5)

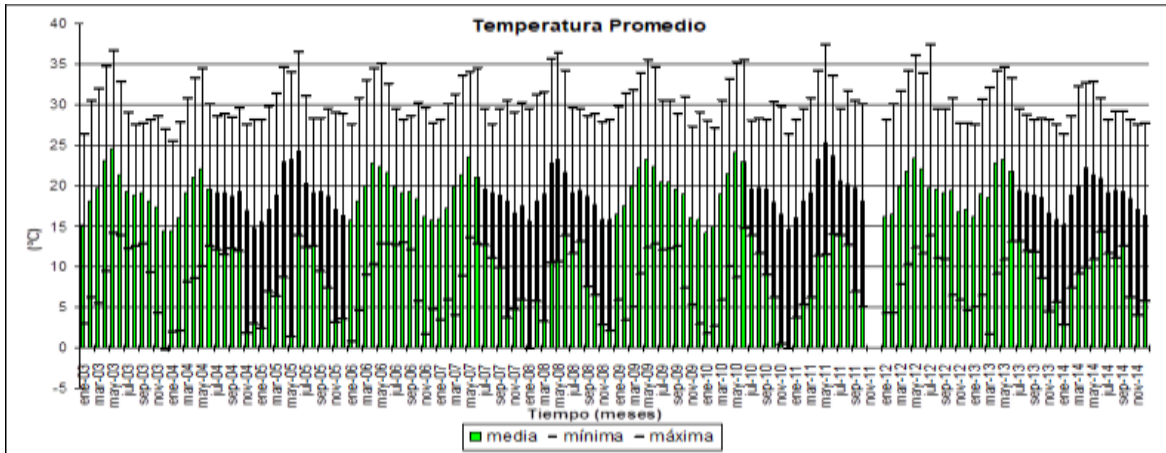


Figura A.3.1 Valores mensuales de la temperatura promedio de la estación (Mx5) Morelia

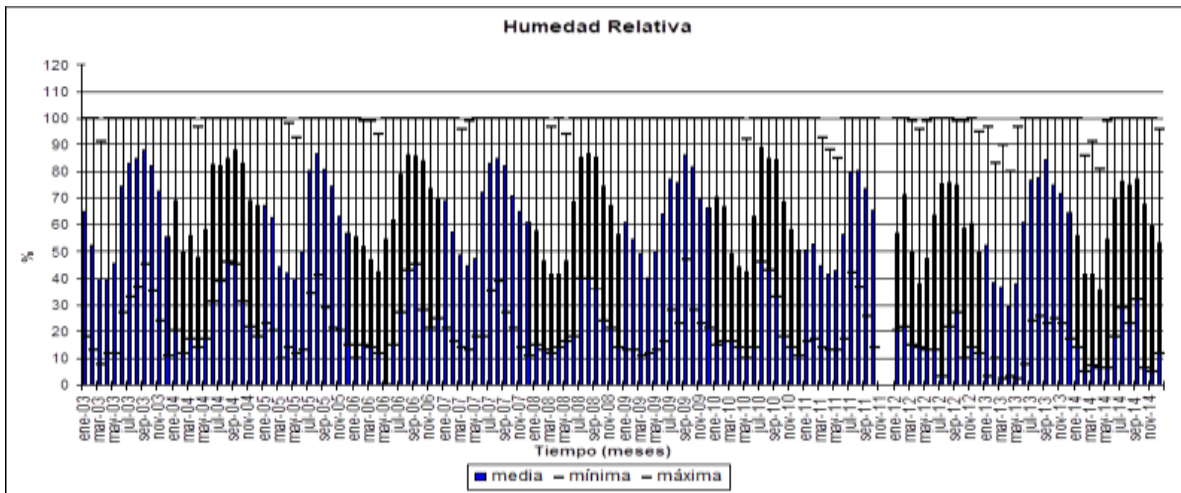


Figura A.3.2 Valores mensuales de la humedad relativa de la estación (Mx5) Morelia

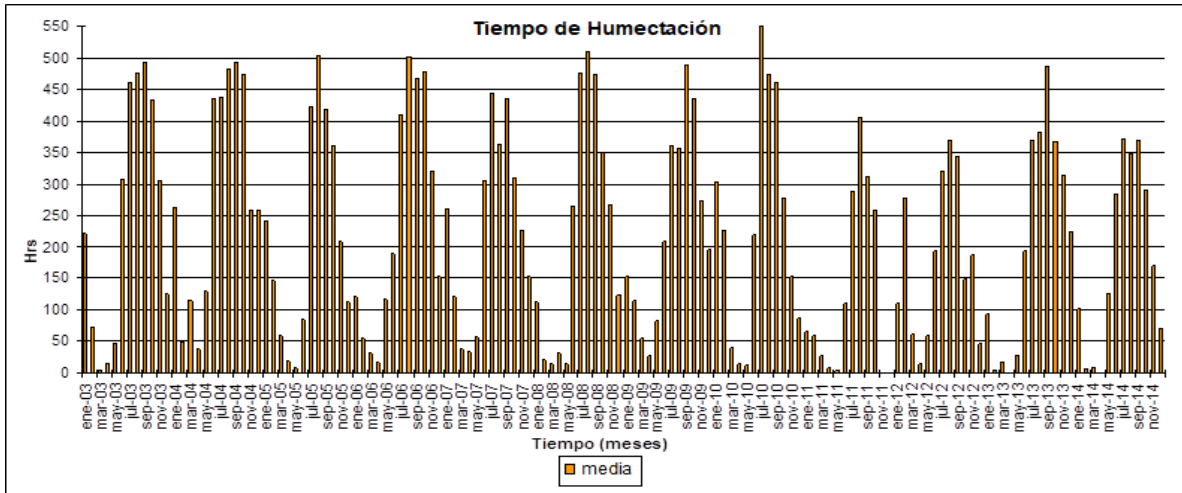


Figura A.3.3 Valores mensuales del tiempo de humectación de la estación (Mx5) Morelia

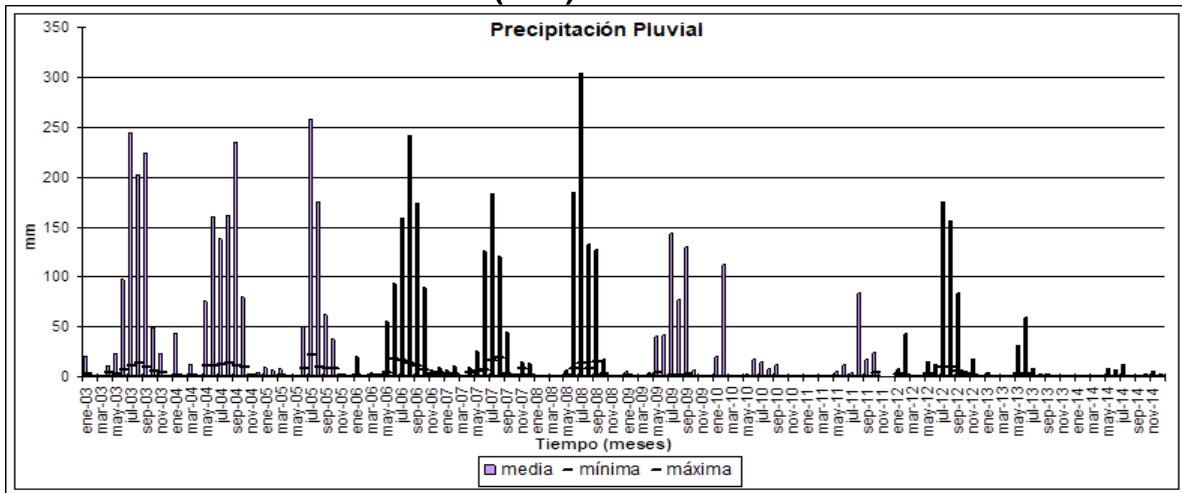


Figura A.3.4 Valores mensuales de la precipitación pluvial de la estación (Mx5) Morelia

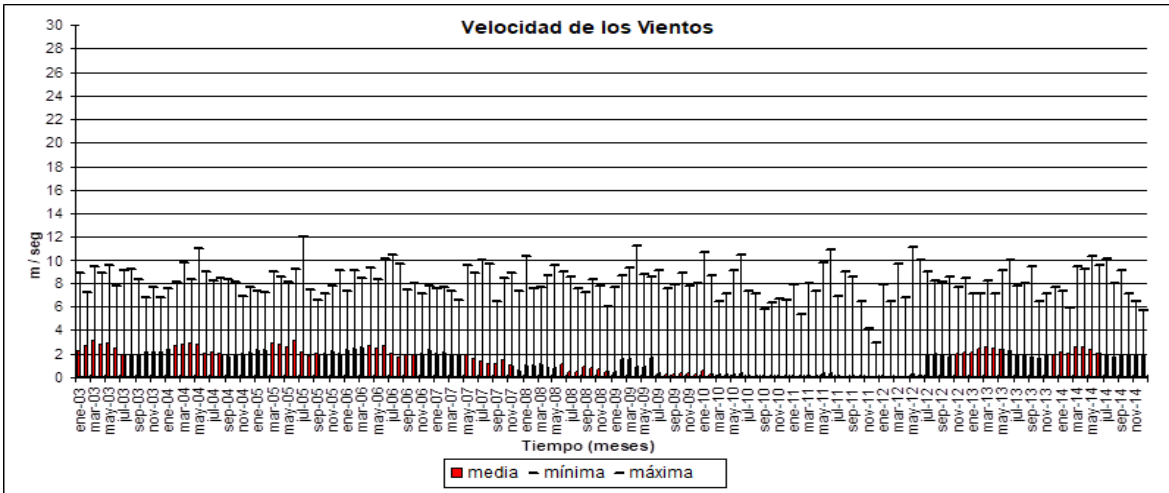


Figura A.3.5 Valores mensuales de la velocidad de los vientos de la estación (Mx5) Morelia

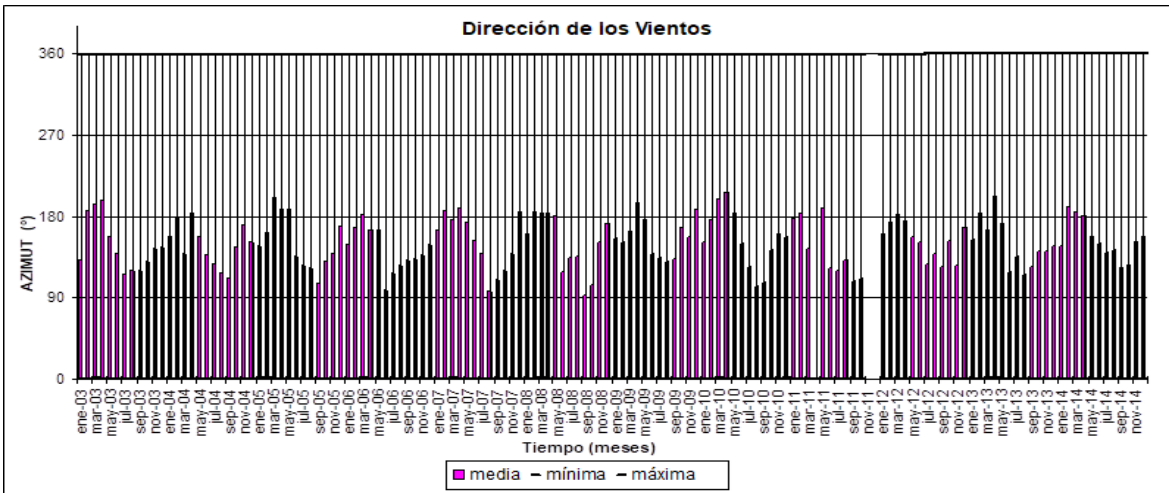


Figura A.3.6 Valores mensuales de la dirección de los vientos de la estación (Mx5) Morelia

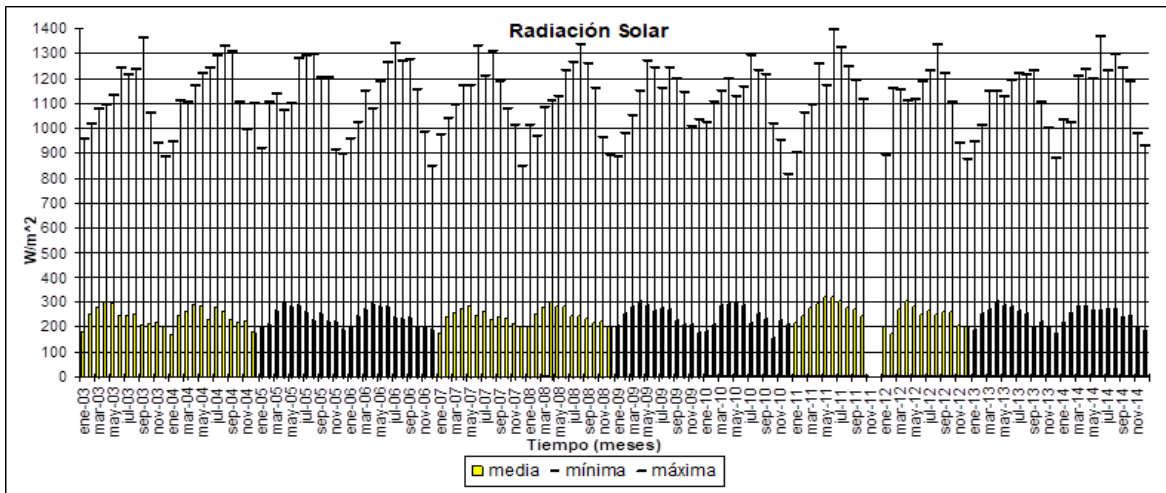


Figura A.3.7 Valores mensuales de la radiación solar de la estación (Mx5) Morelia

Anexo A.4 Estación Oaxaca (Mx4)

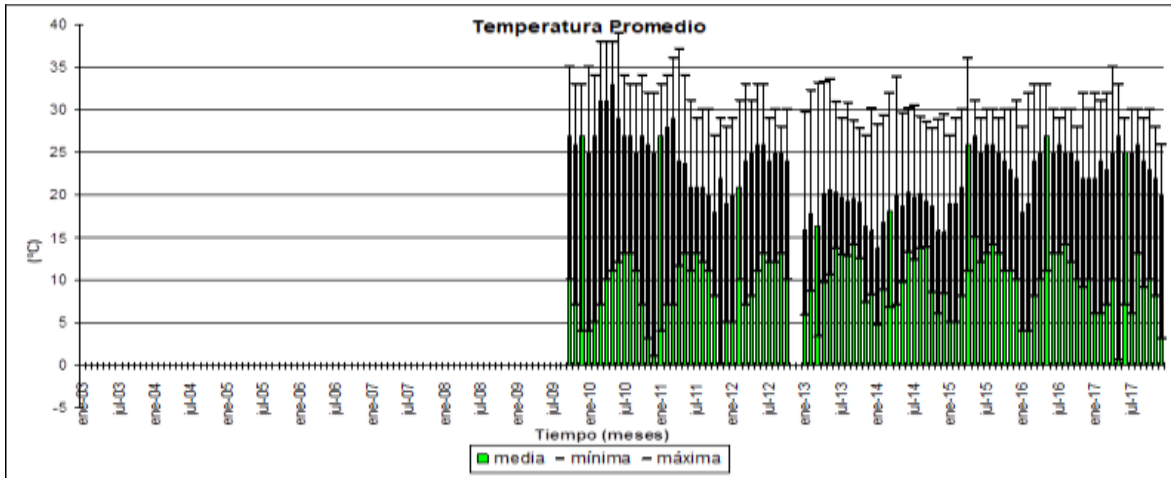


Figura A.4.1 Valores mensuales de la temperatura promedio de la estación (Mx4) Oaxaca

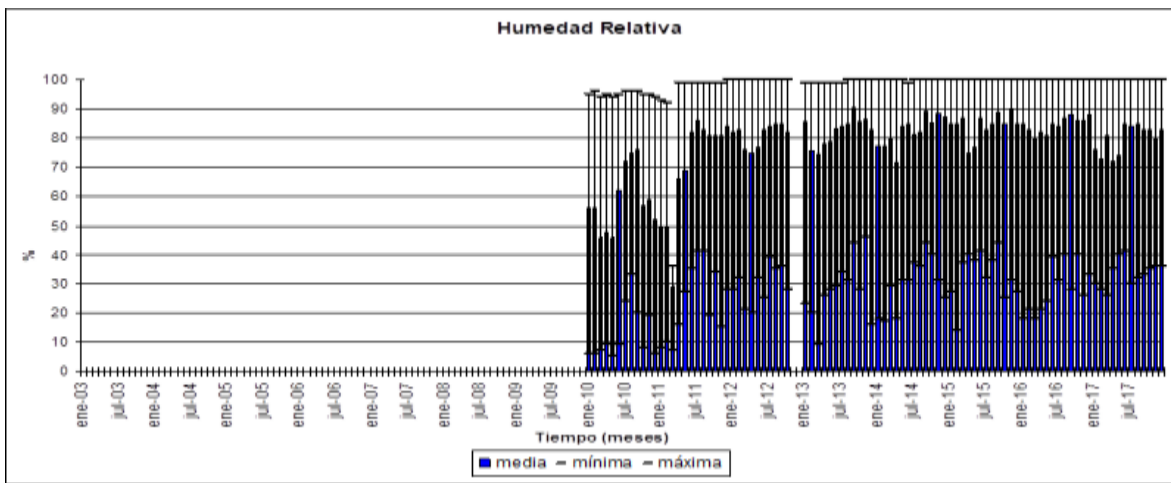


Figura A.4.2 Valores mensuales de la humedad relativa de la estación (Mx4) Oaxaca

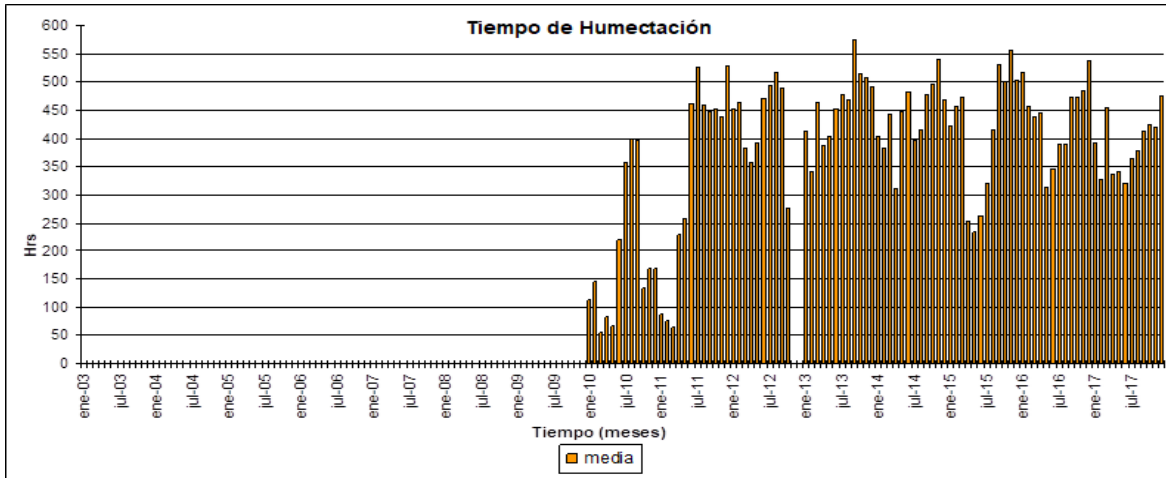


Figura A.4.3 Valores mensuales del tiempo de humectación de la estación (Mx4) Oaxaca

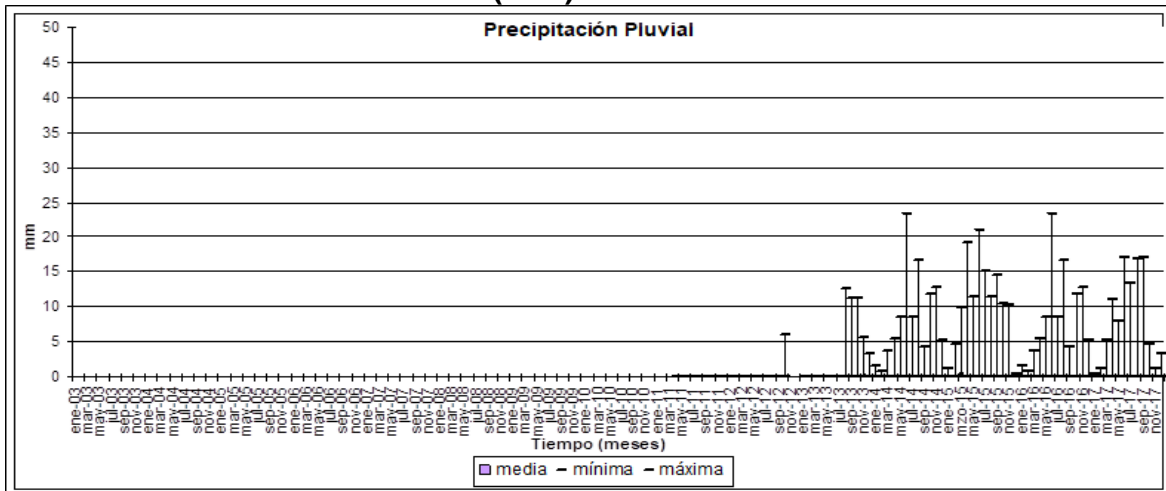


Figura A.4.4 Valores mensuales de la precipitación pluvial de la estación (Mx4) Oaxaca

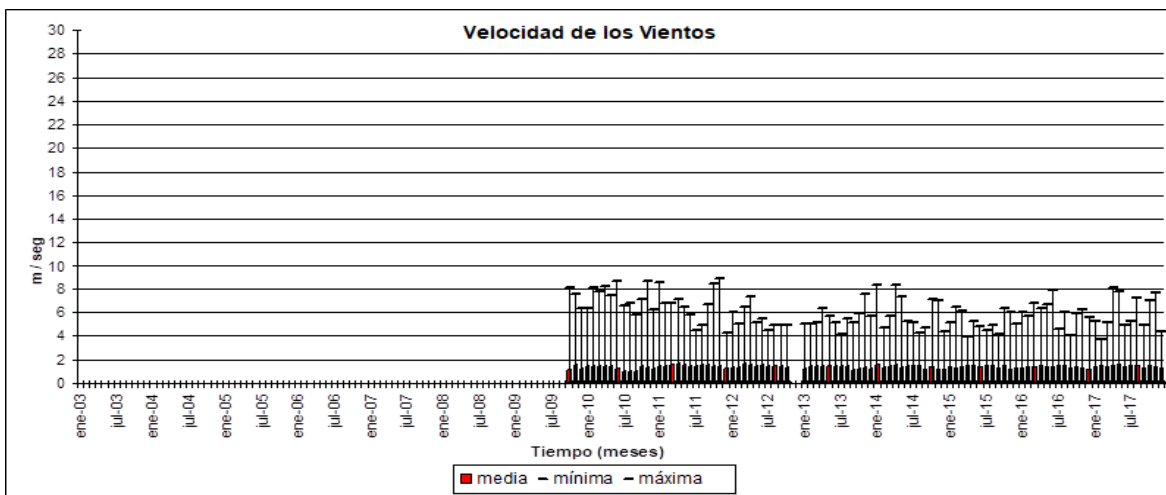


Figura A.4.5 Valores mensuales de la velocidad de los vientos de la estación (Mx4) Oaxaca

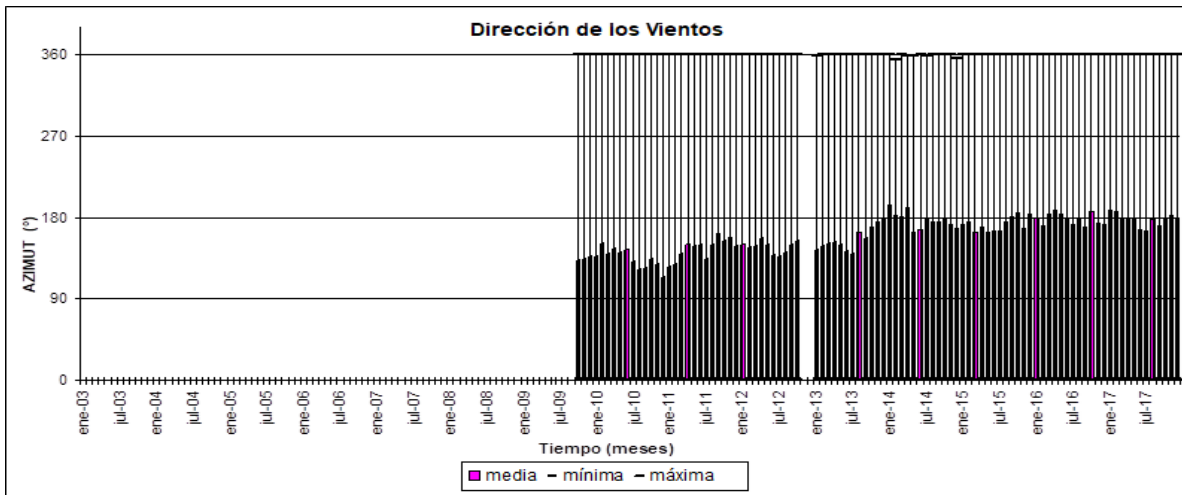


Figura A.4.6 Valores mensuales de la dirección de los vientos de la estación (Mx4) Oaxaca

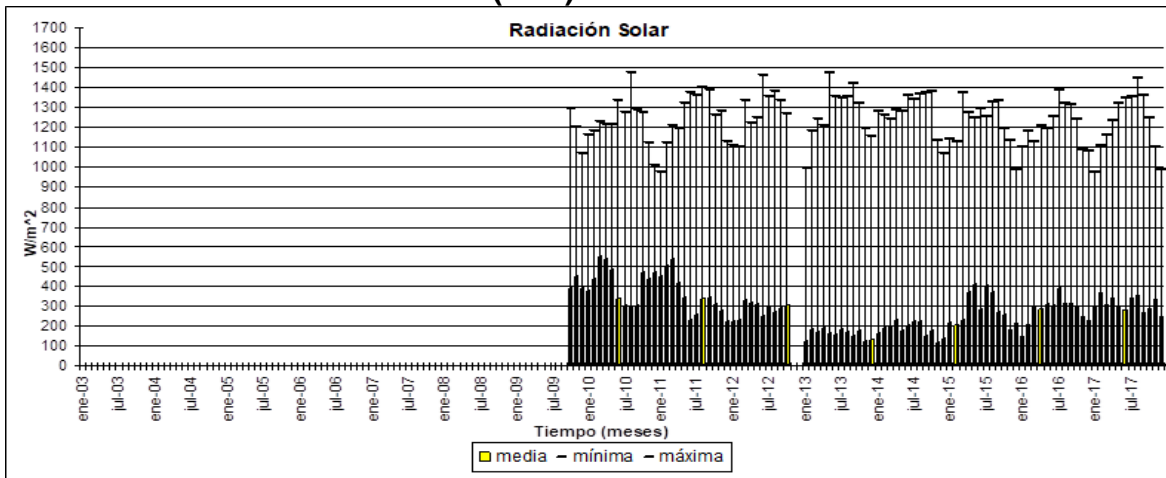


Figura A.4.7 Valores mensuales de la radiación solar de la estación (Mx4) Oaxaca

Anexo A.5 Estación Progreso (Mx2)

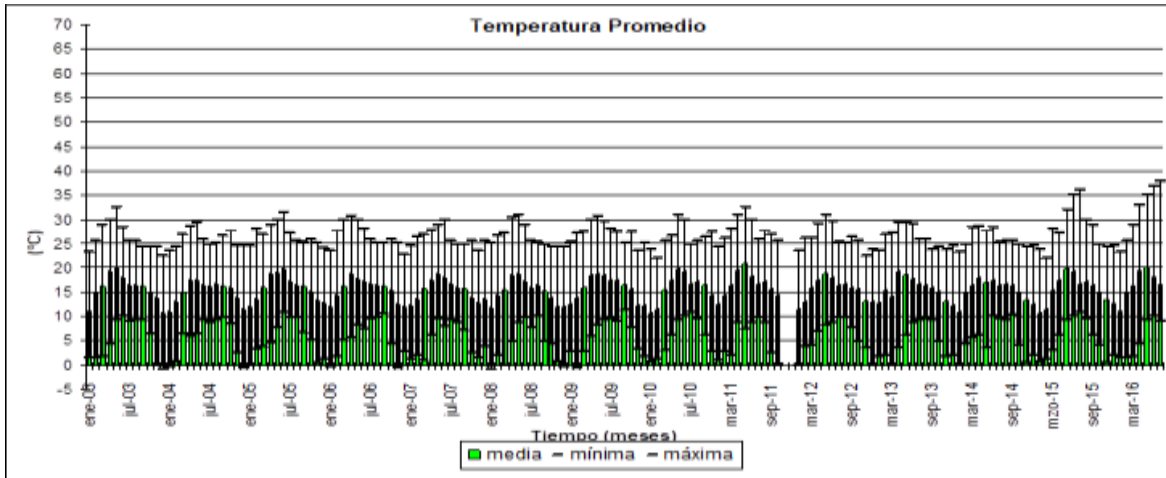


Figura A.5.1 Valores mensuales de la Temperatura Promedio de la Estación (Mx2) Progreso

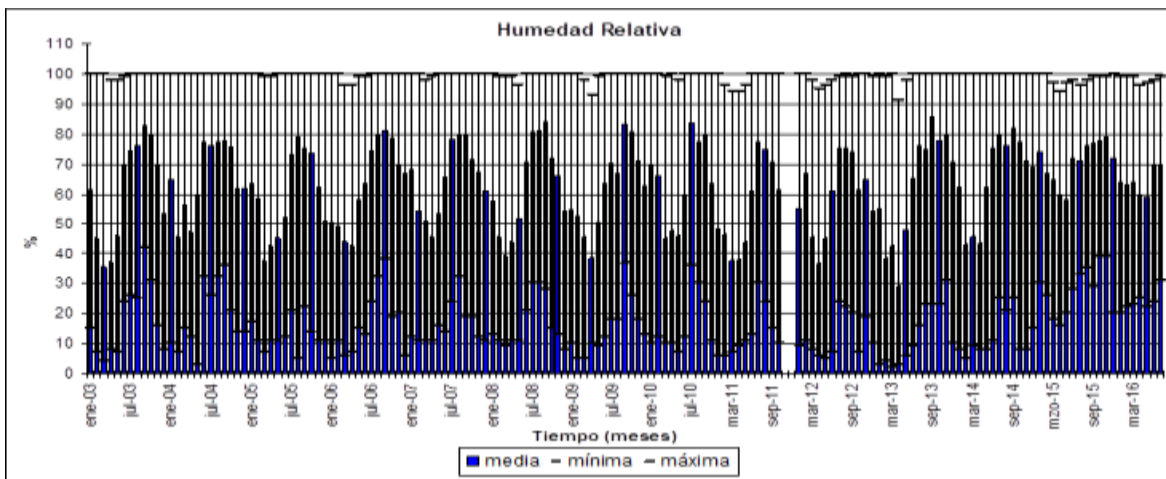


Figura A.5.2 Valores mensuales de la humedad relativa de la estación (Mx2) Progreso

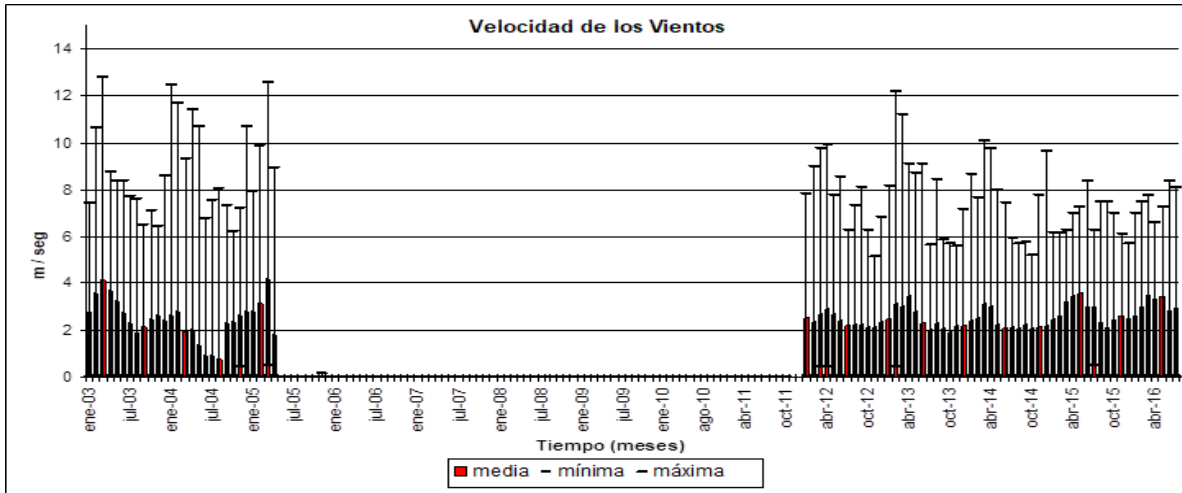


Figura A.5.5 Valores mensuales de la velocidad de los vientos de la estación (Mx2) Progreso

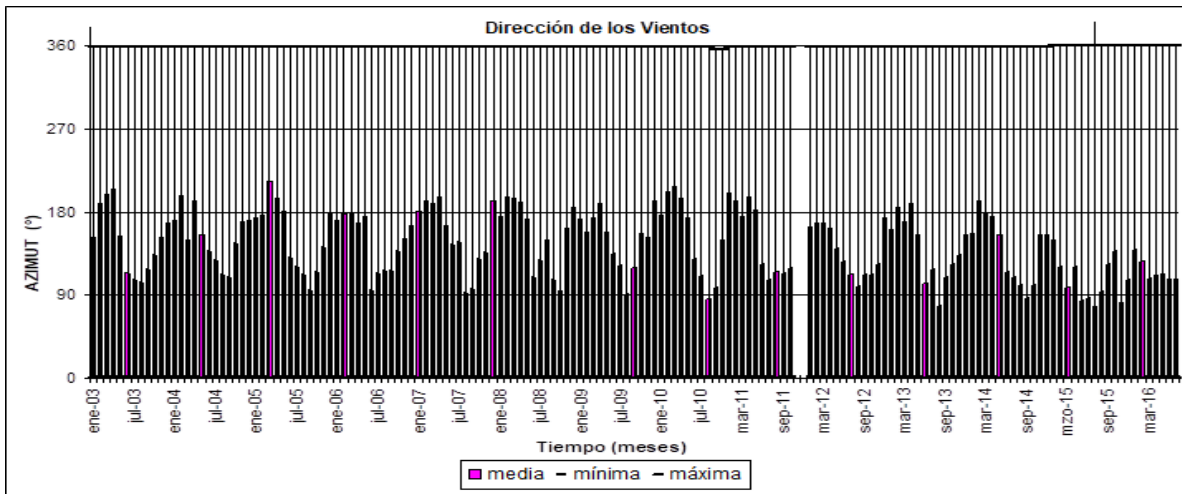


Figura A.5.6 Valores mensuales de la dirección de los vientos de la estación (Mx2) Progreso

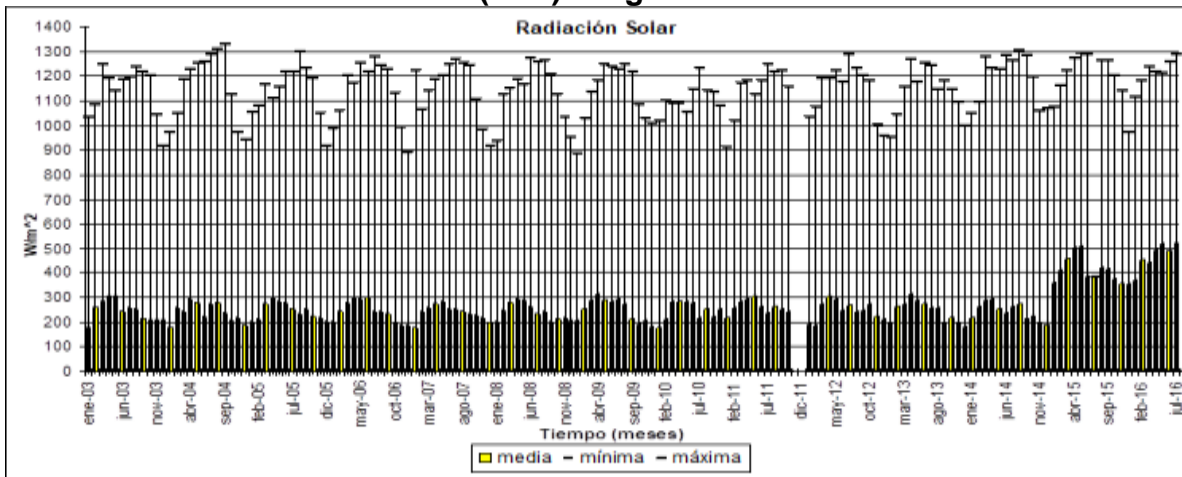


Figura A.5.7 Valores mensuales de la radiación solar de la estación (Mx2) Progreso

Anexo A.6 Estación Tampico (Mx15)

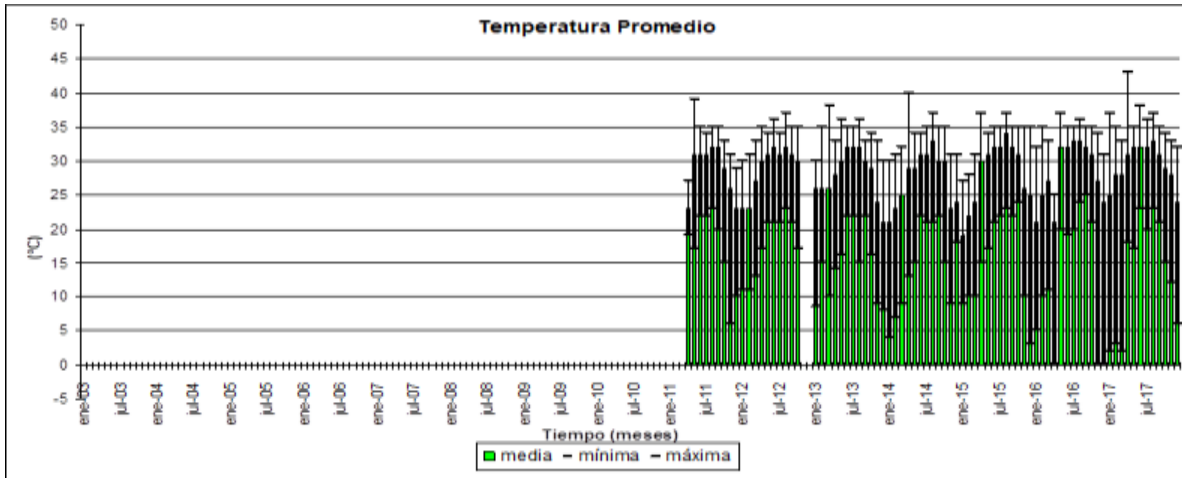


Figura A.6.1 Valores mensuales de la temperatura promedio de la estación (Mx15) Tampico

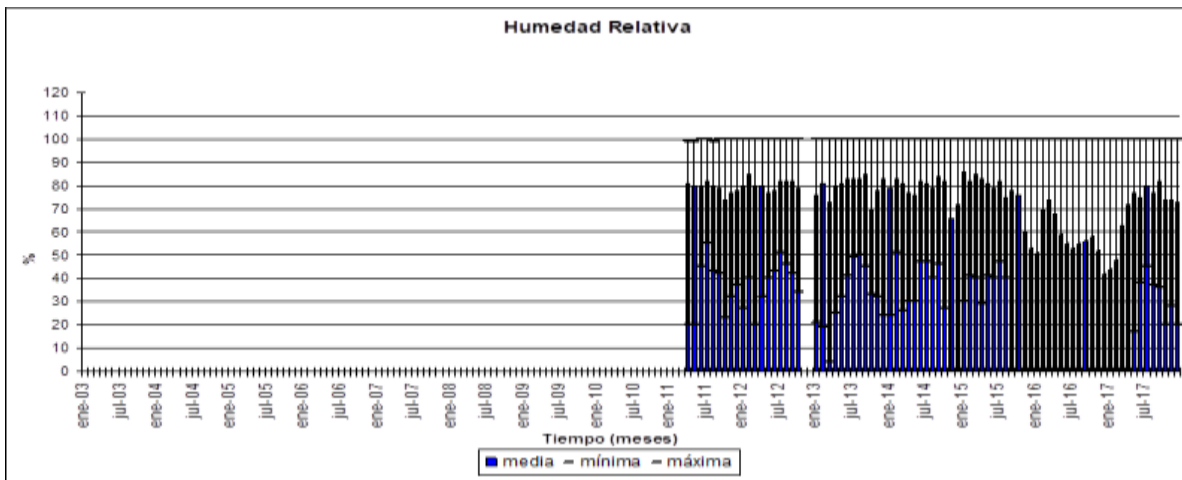


Figura A.6.2 Valores mensuales de la humedad relativa de la estación (Mx15) Tampico

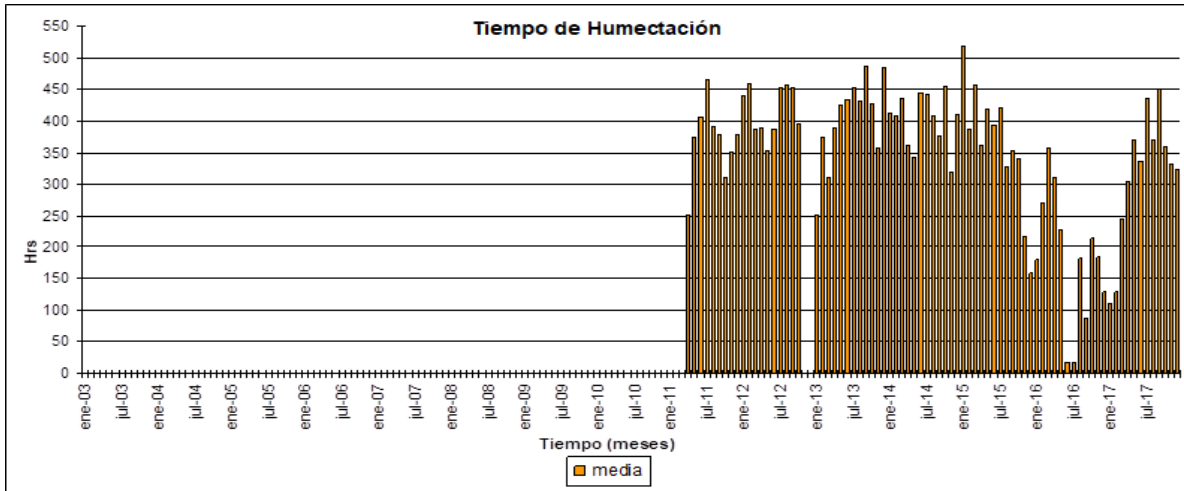


Figura A.6.3 Valores mensuales del tiempo de humectación de la estación (Mx15) Tampico

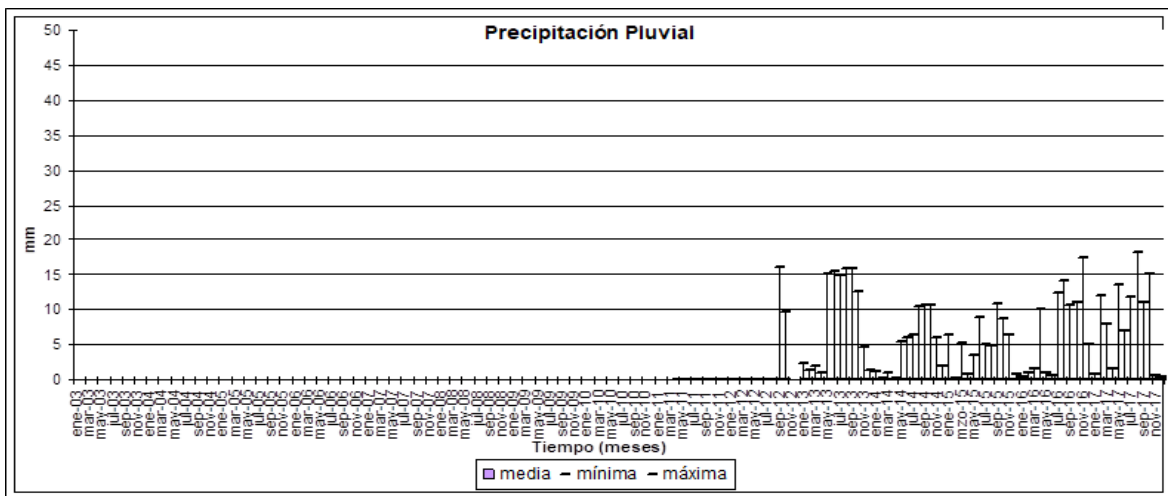


Figura A.6.4 Valores mensuales de la precipitación pluvial de la estación (Mx15) Tampico

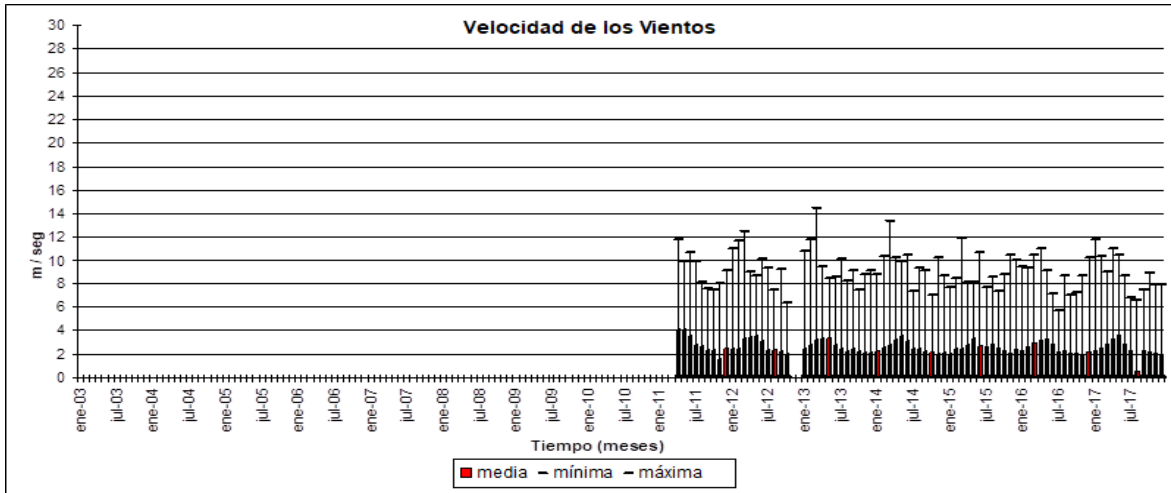


Figura A.6.5 Valores mensuales de la velocidad de los vientos de la estación (Mx15)Tampico

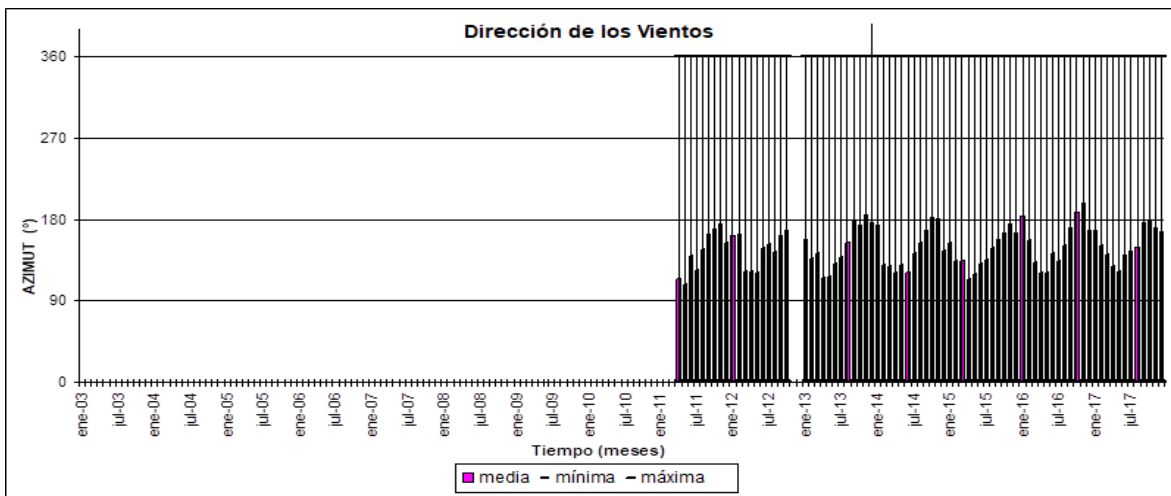


Figura A.6.6 Valores mensuales de la dirección de los vientos de la estación (Mx15) Tampico

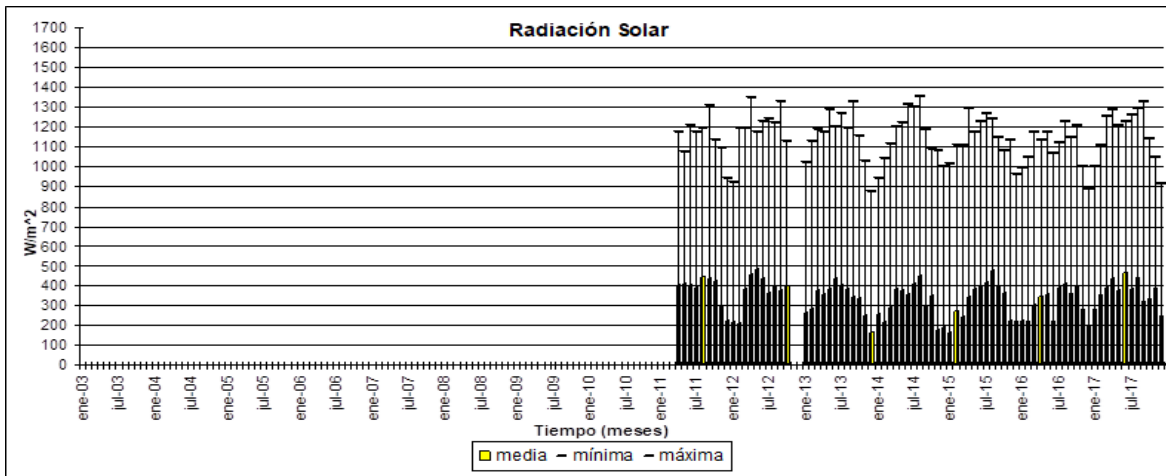


Figura A.6.7 Valores mensuales de la radiación solar de la estación (Mx15) Tampico

Anexo A.7 Estación Toluca (Mx9)

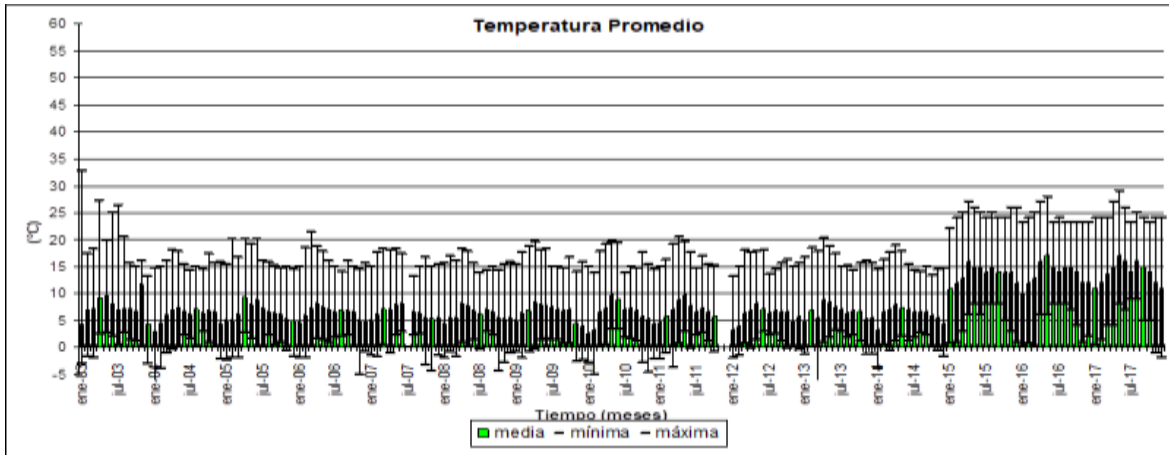


Figura A.7.1 Valores mensuales de la temperatura promedio de la estación (Mx9) Toluca

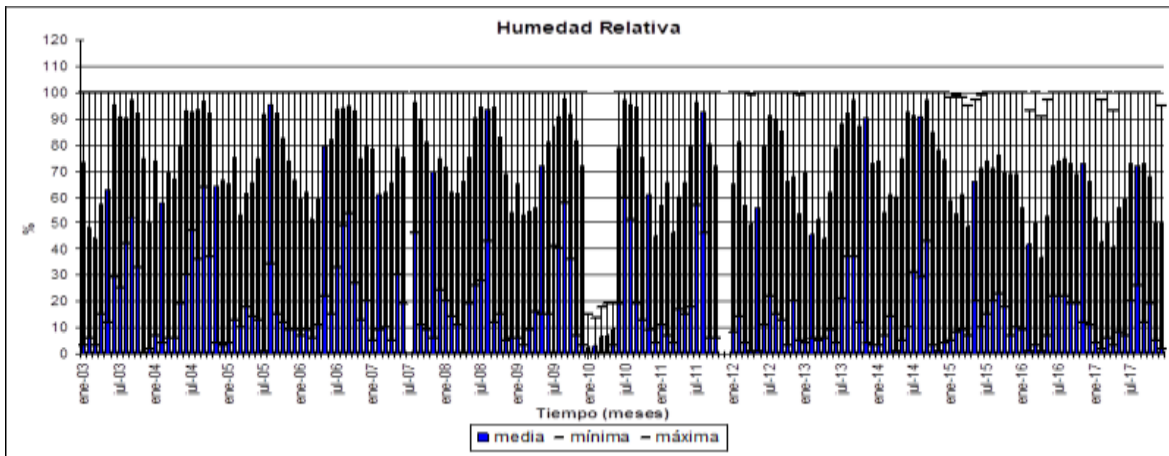


Figura A.7.2 Valores mensuales de la humedad relativa de la estación (Mx9) Toluca

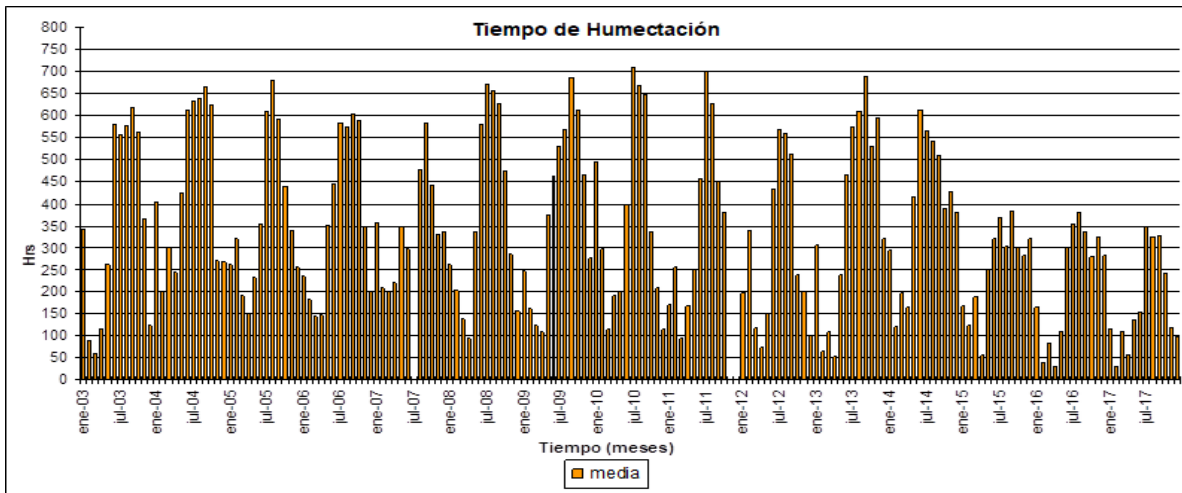


Figura A.7.3 Valores mensuales del tiempo de humectación de la estación (Mx9) Toluca

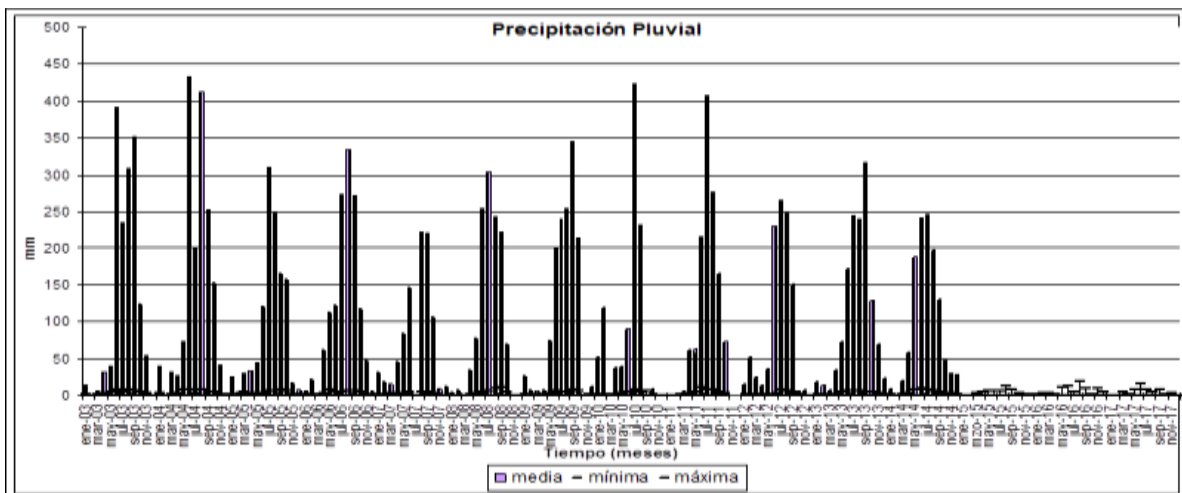


Figura A.7.4 Valores mensuales de la precipitación pluvial de la estación (Mx9) Toluca

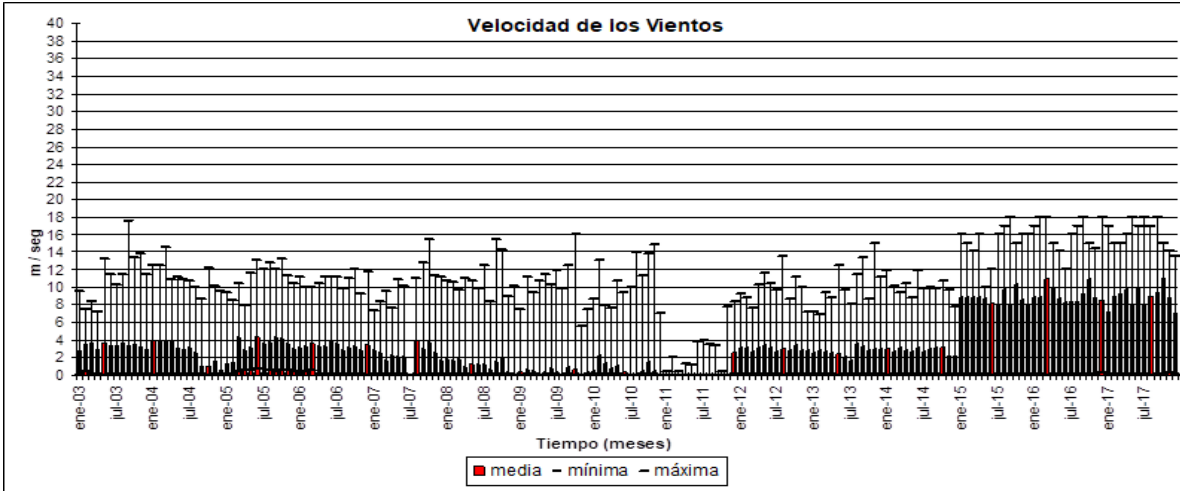


Figura A.7.5 Valores mensuales de la velocidad de los vientos de la estación (Mx9) Toluca

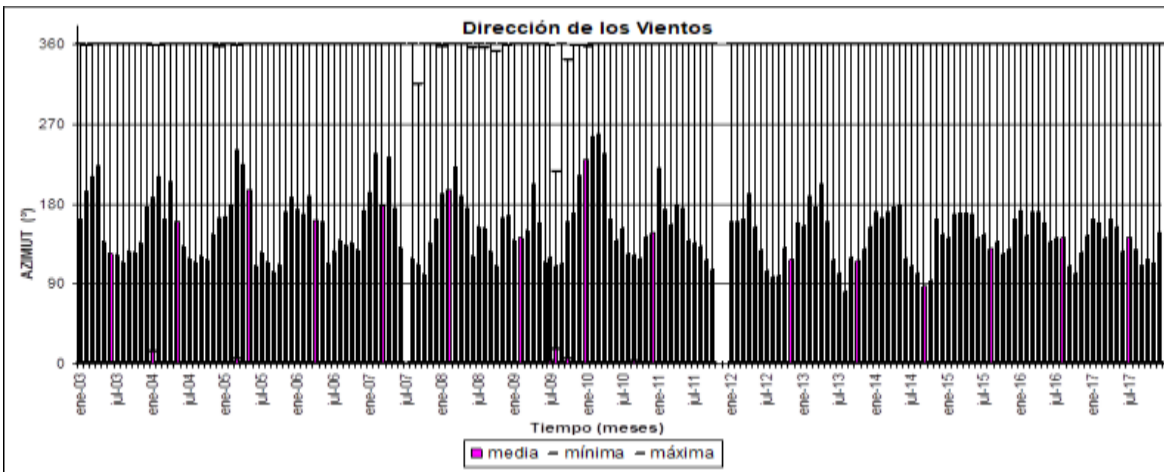


Figura A.7.6 Valores mensuales de la dirección de los vientos de la estación (Mx9) Toluca

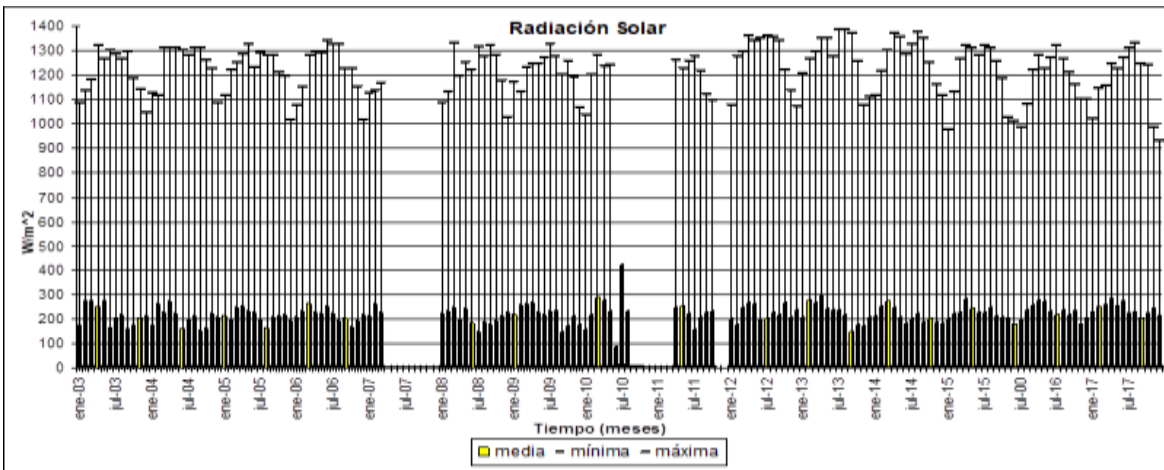


Figura A.7.7 Valores mensuales de la radiación solar de la estación (Mx9) Toluca

Anexo A.8 Estación Xalapa (Mx14)

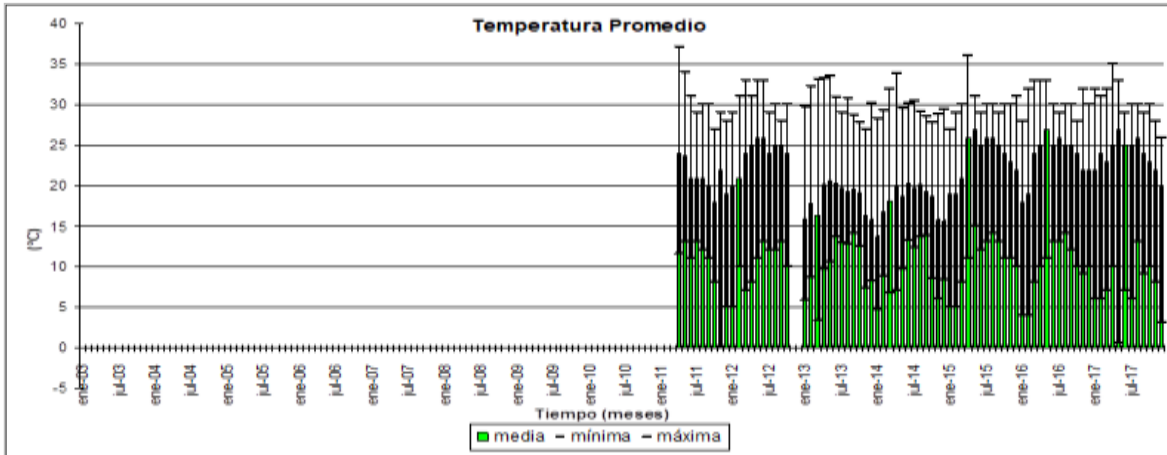


Figura A.8.1 Valores mensuales de la temperatura promedio de la estación (Mx14) Xalapa

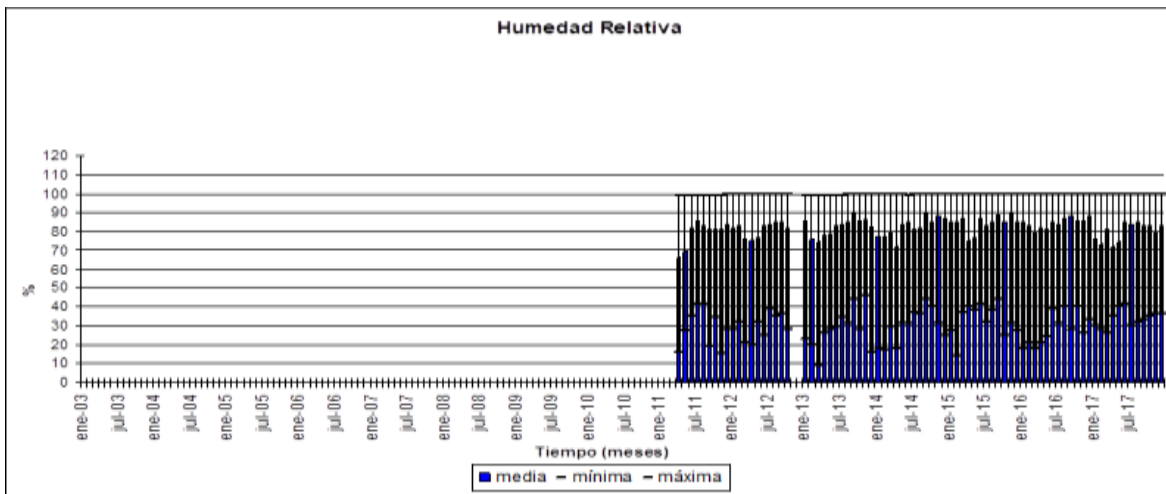


Figura A.8.2 Valores mensuales de la humedad relativa de la estación (Mx14) Xalapa

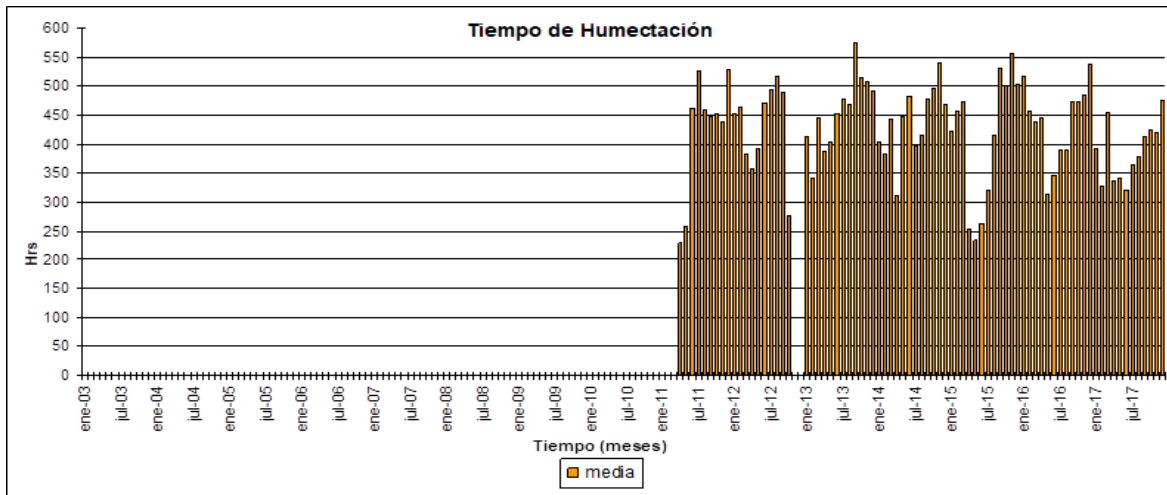


Figura A.8.3 Valores mensuales del tiempo de humectación de la estación (Mx14) Xalapa

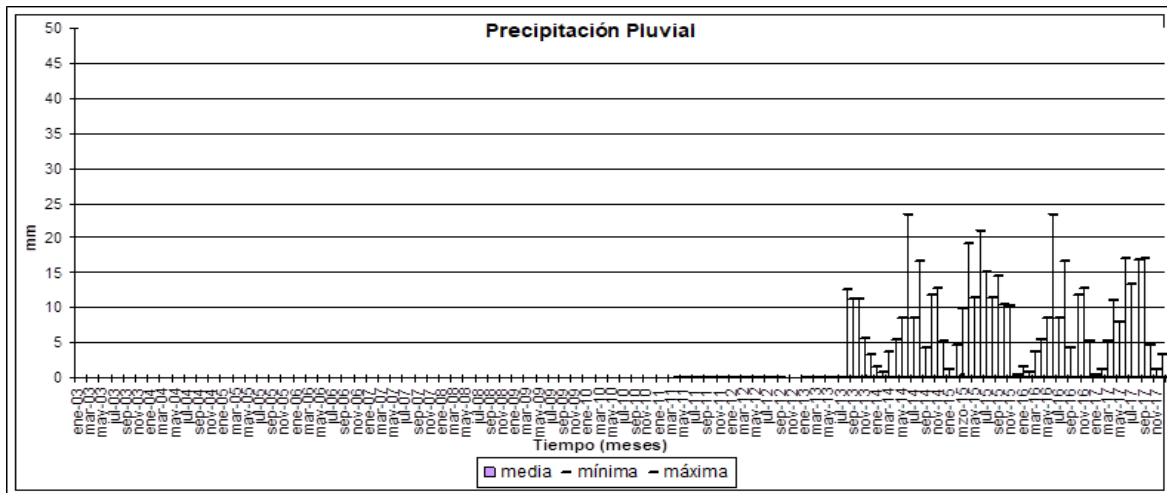


Figura A.8.4 Valores mensuales de la precipitación pluvial de la estación (Mx14) Xalapa

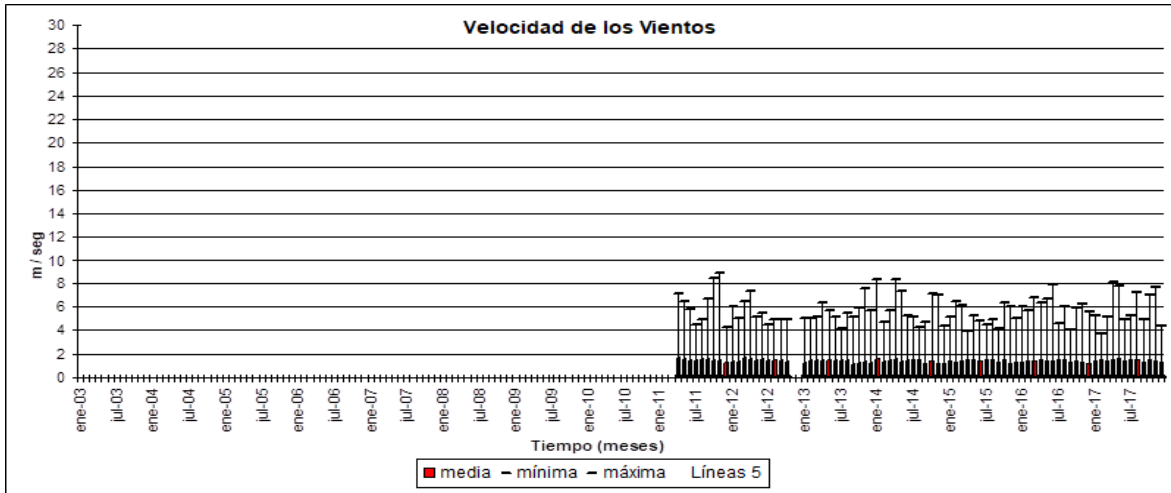


Figura A.8.5 Valores mensuales de la velocidad de los vientos de la estación (Mx14) Xalapa

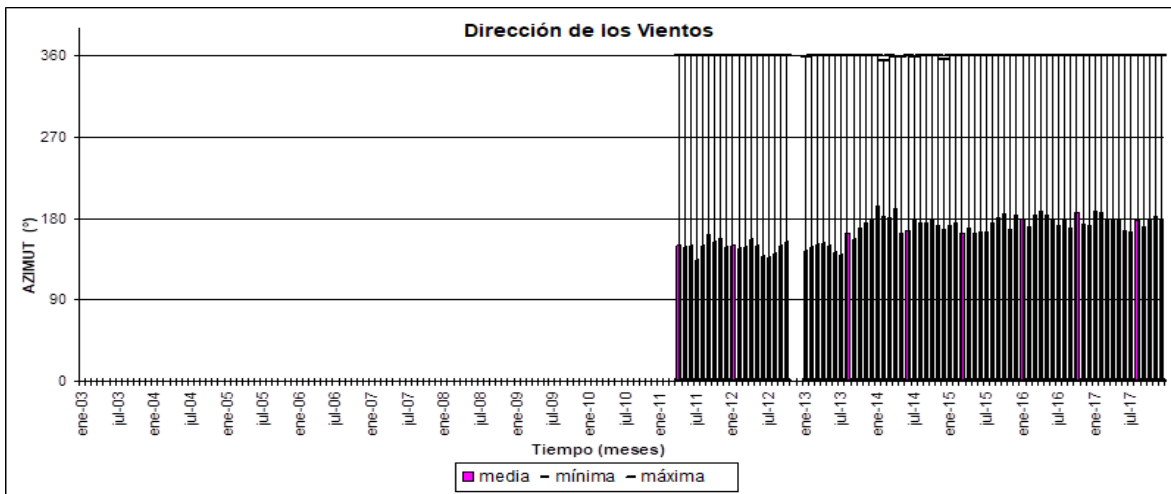


Figura A.8.6 Valores mensuales de la dirección de los vientos de la estación (Mx14) Xalapa

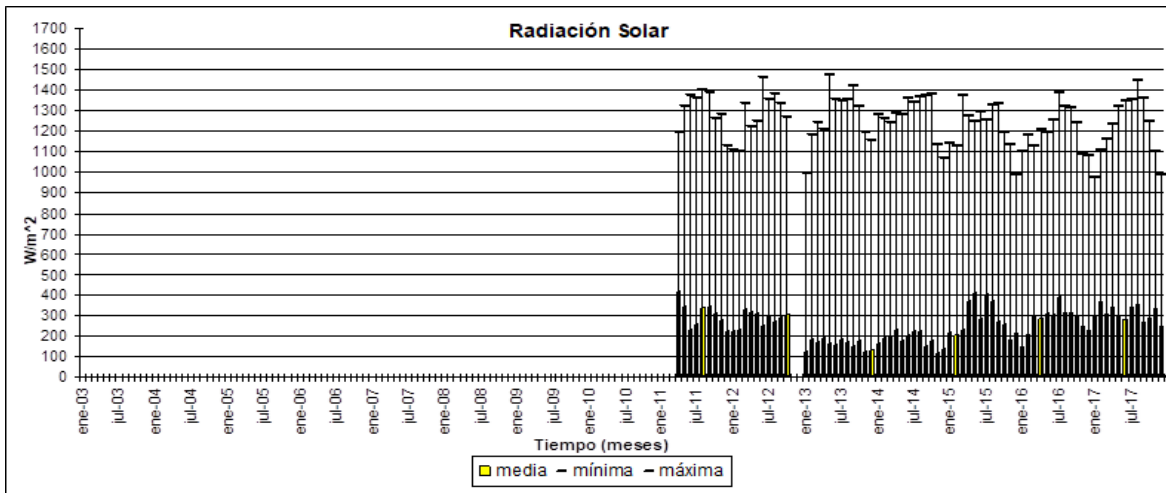
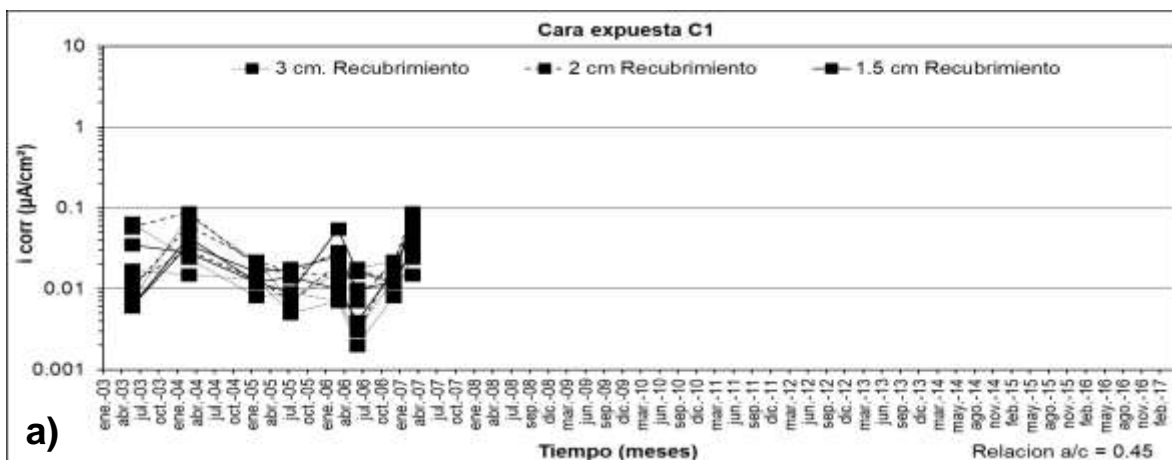


Figura A.8.7 Valores mensuales de la radiación solar de la estación (Mx14) Xalapa

Anexo B: Datos electroquímicos

Anexo B.1 Estación Mexicali (Mx10)



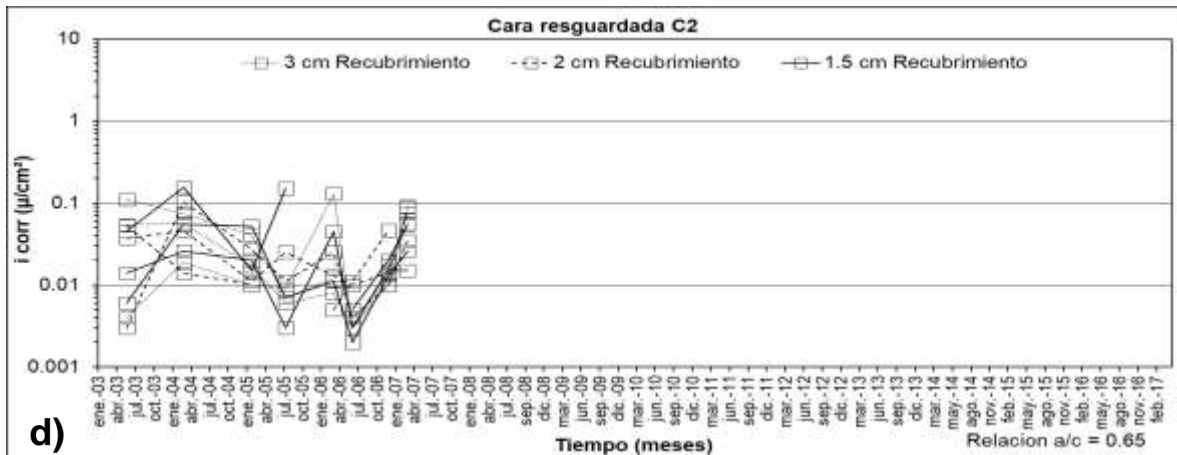
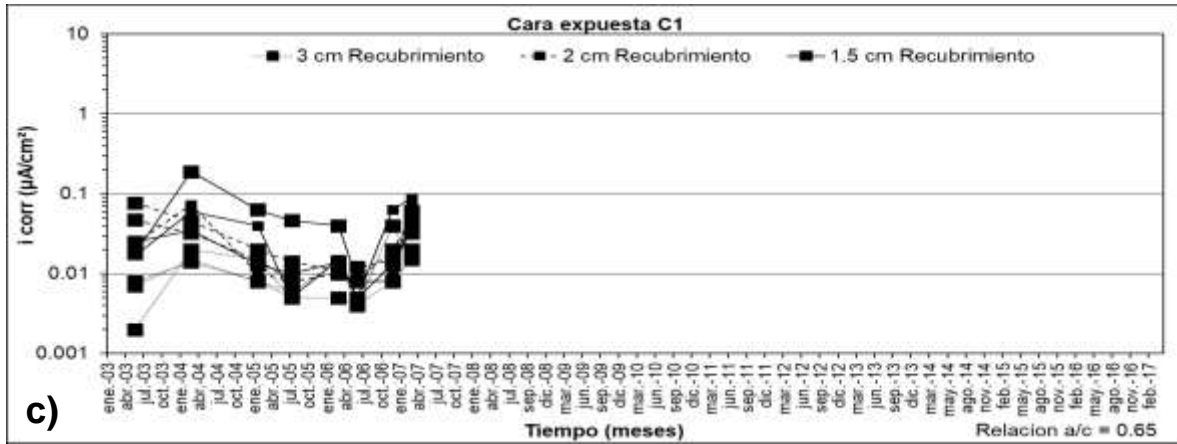


Figura B.1.1. Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. tiempo para: a) C1 Relación a/c: 0.45; b) C2 Relación a/c: 0.45; c) C1 Relación a/c: 0.45, y d) C2 Relación a/c: 0.65





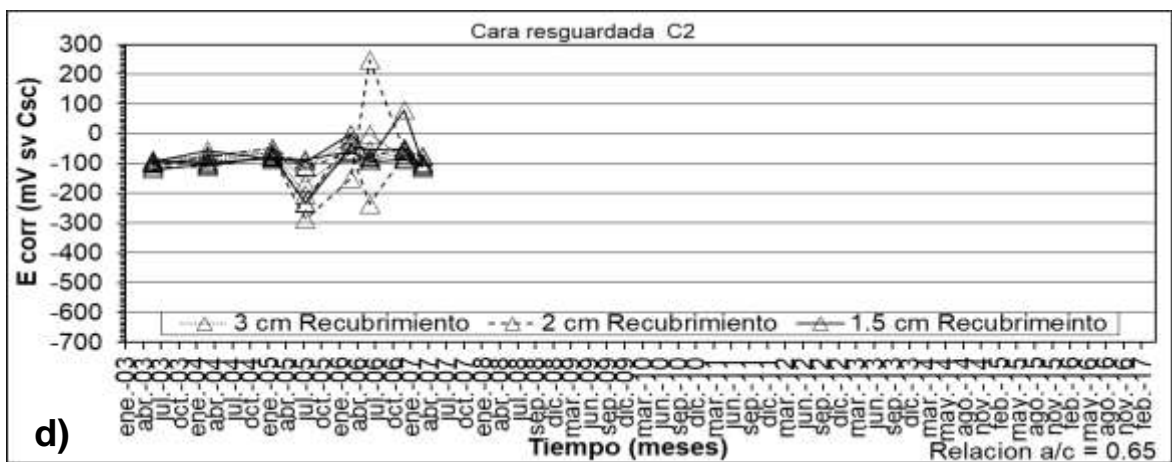
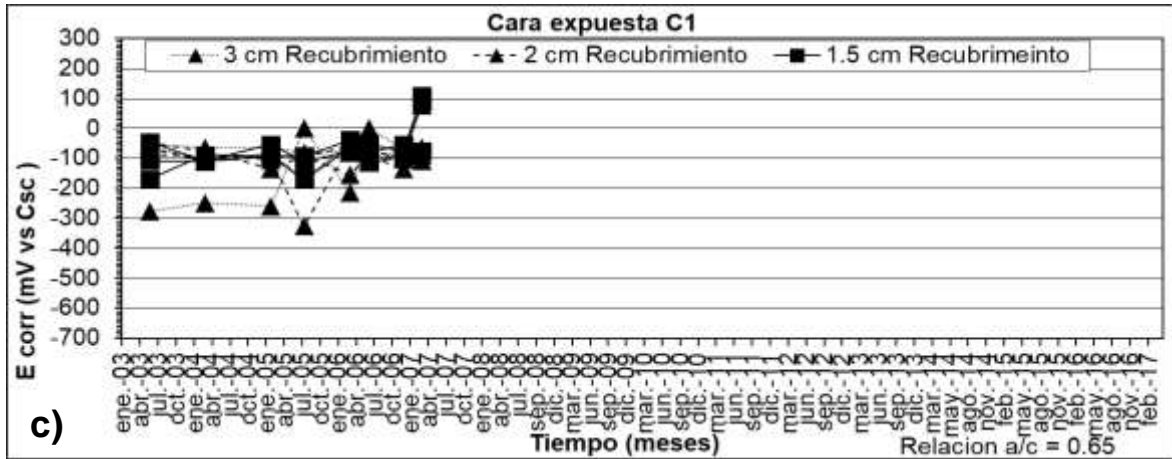
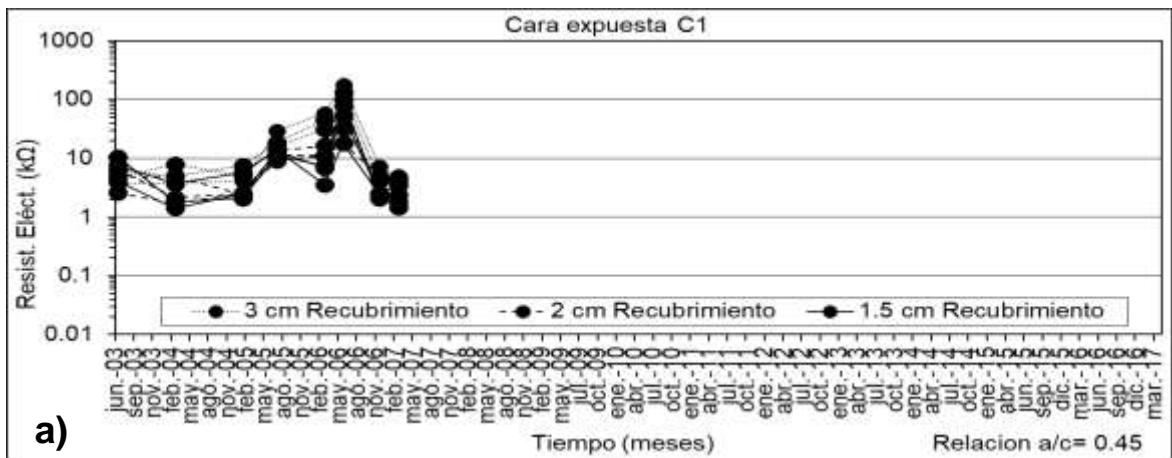


Figura B.1.2. Potencial de corrosión (Ecorr) vs. tiempo para: a) C1 Relación a/c: 0.45; b) C2 Relación a/c: 0.45; c) C1 Relación a/c: 0.65, y d) C2 Relación a/c: 0.65



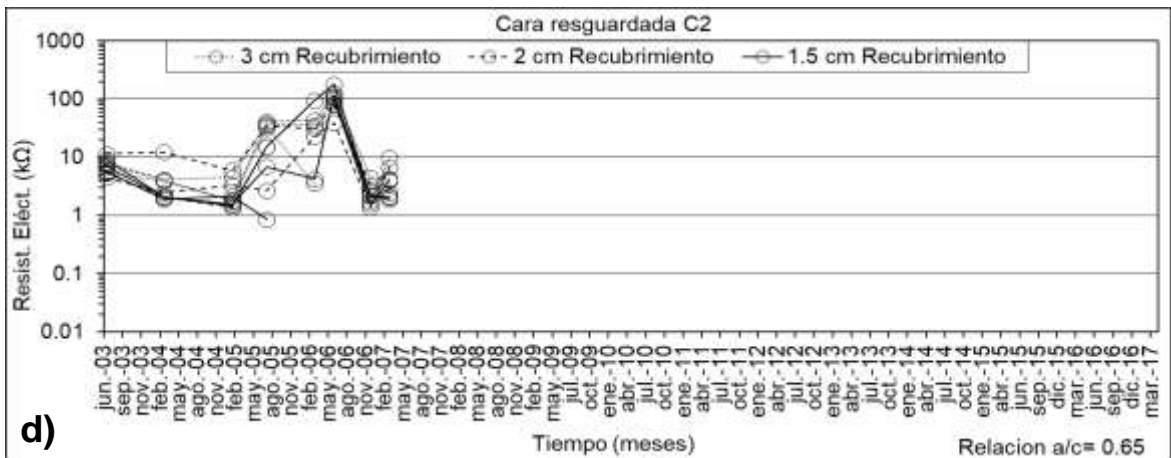
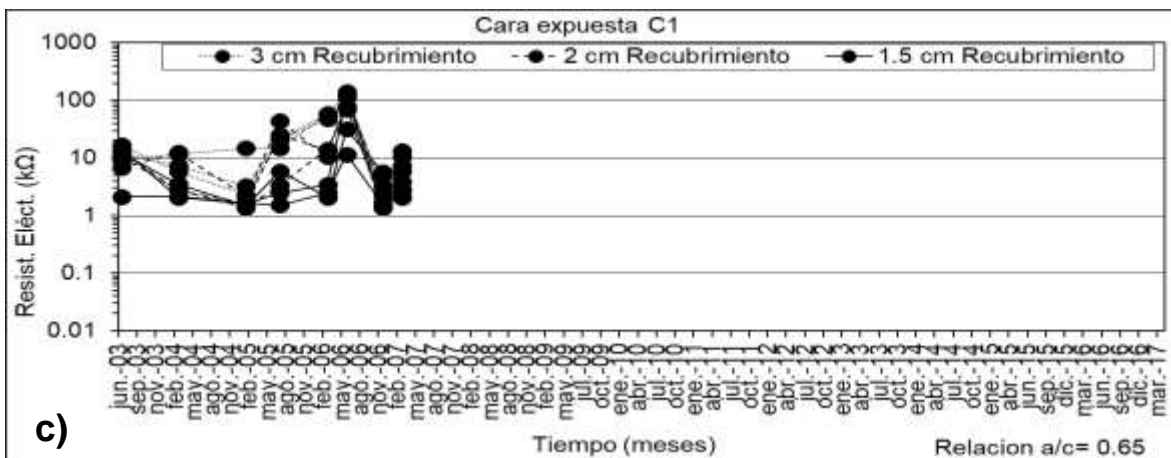
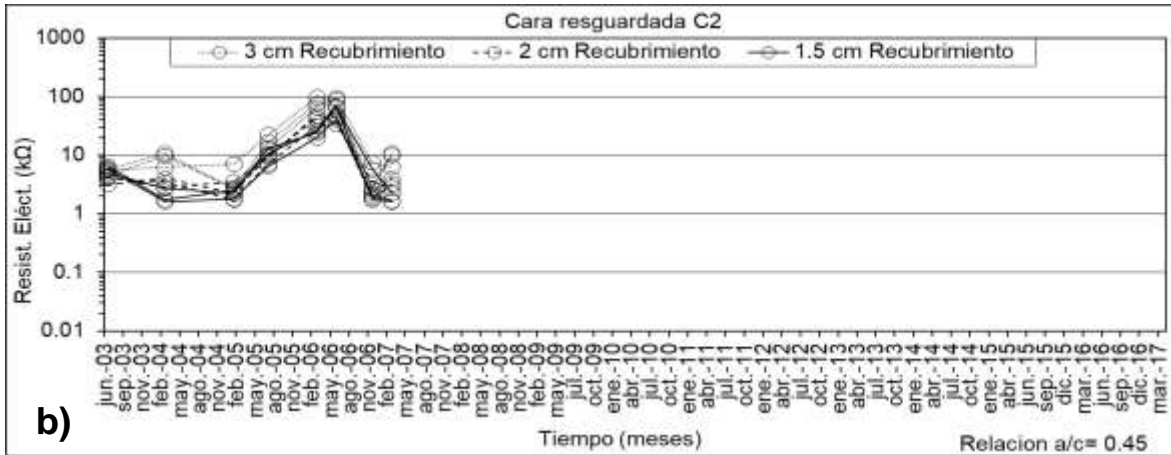
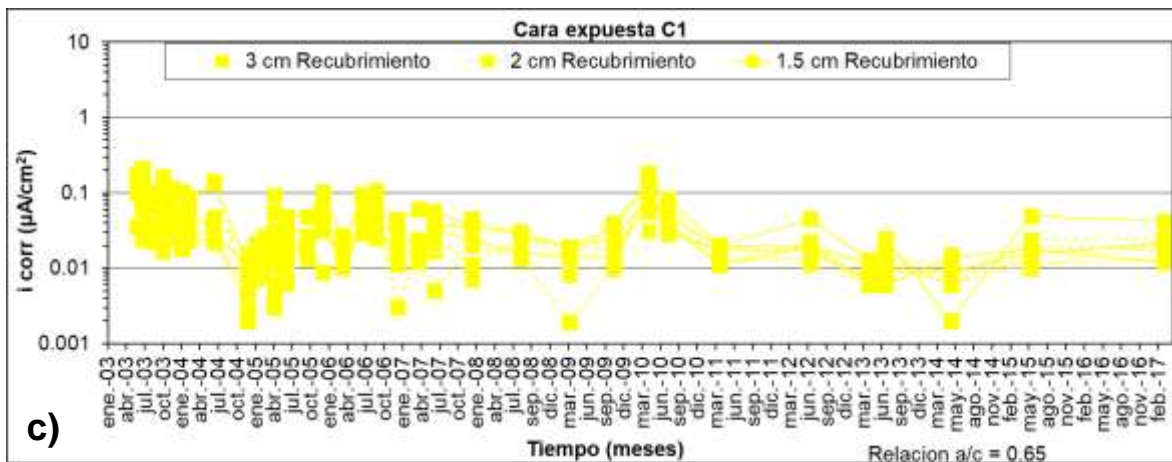
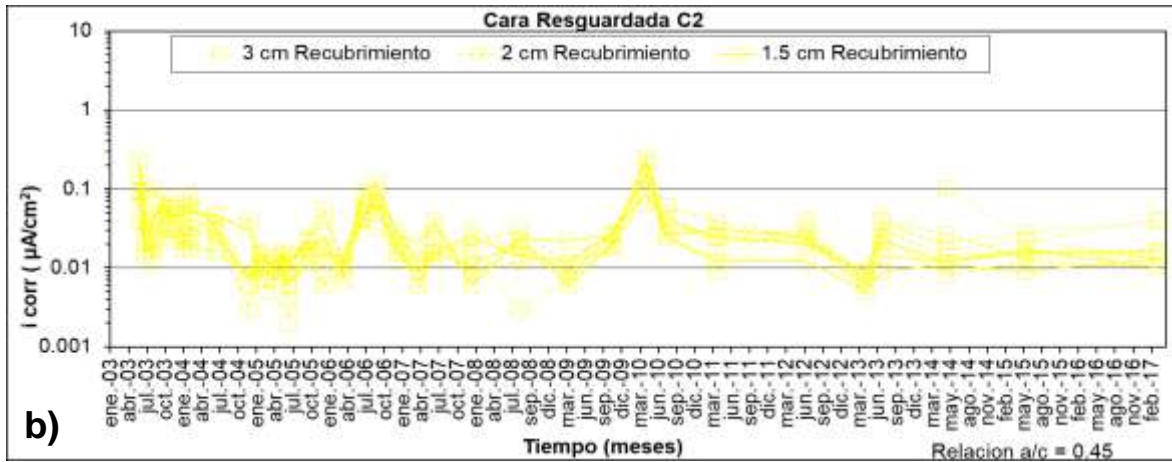
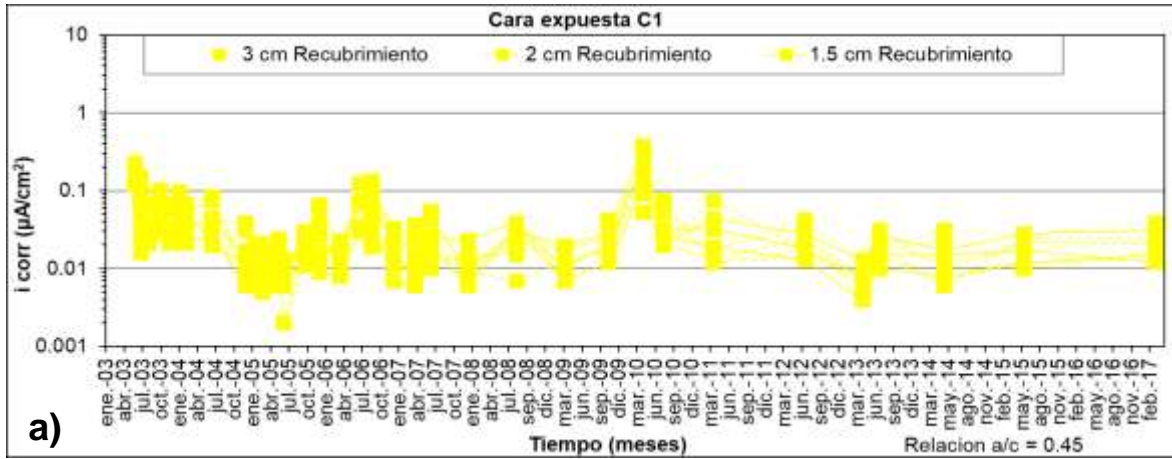


Figura B.1.3 Resistencia eléctrica vs. tiempo para: a) C1 Relación a/c: 0.45; b) C2 Relación a/c: 0.45; c) C1 Relación a/c: 0.45, y d) C2 Relación a/c: 0.65.

Anexo B.2 Estación México D.F. (Mx7)



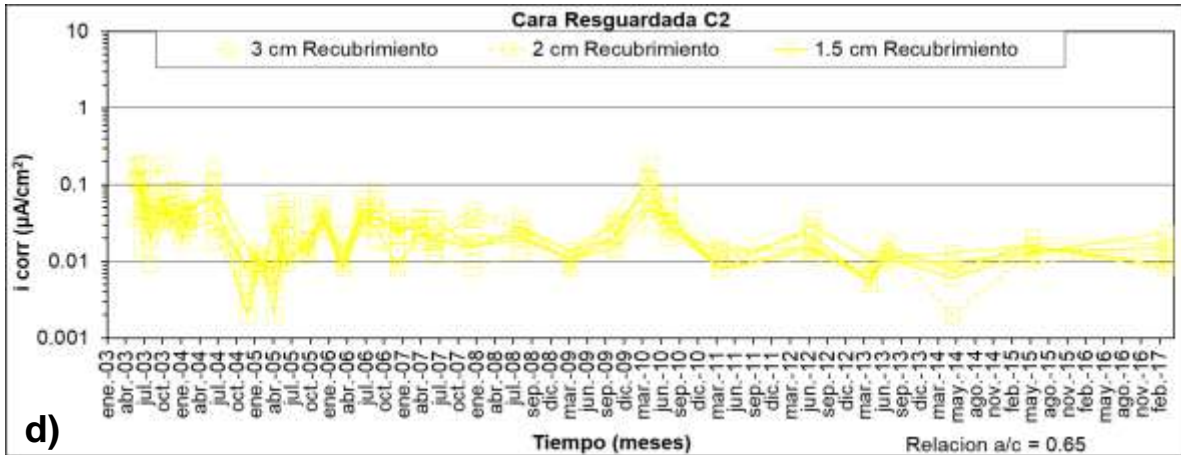


Figura B.2.1. Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. tiempo para: a) C1 Relación a/c: 0.45; b) C2 Relación a/c: 0.45; c) C1 Relación a/c: 0.45, t d) C2 Relación a/c: 0.65

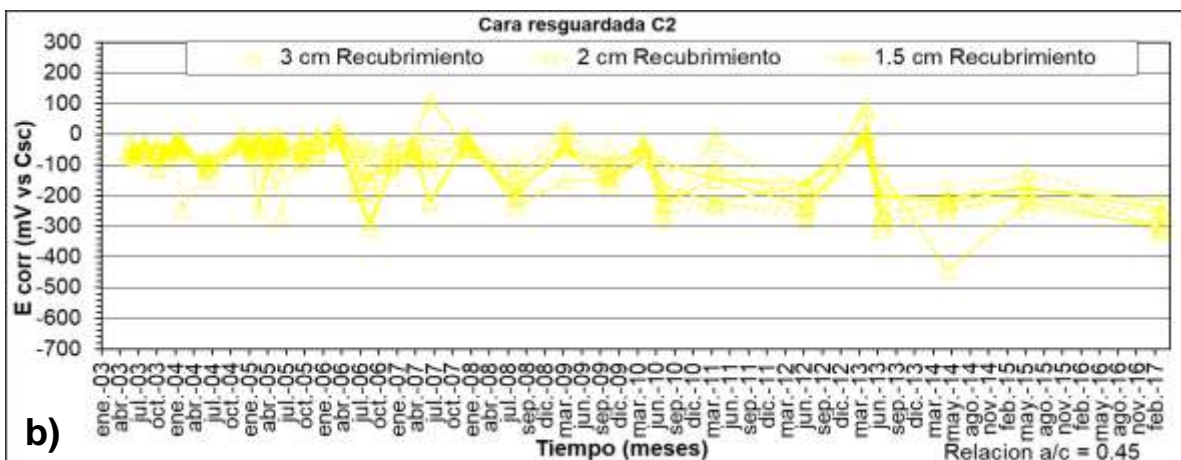
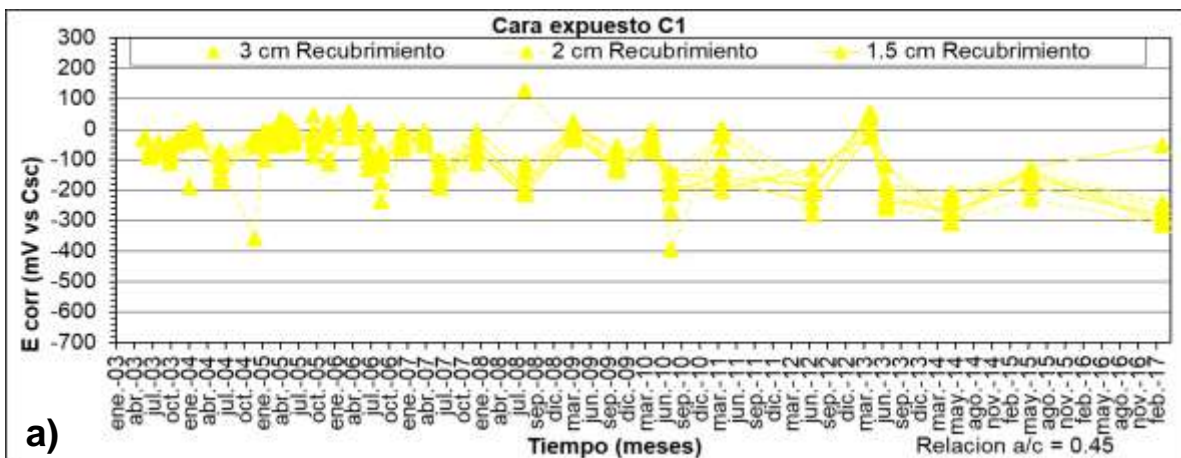
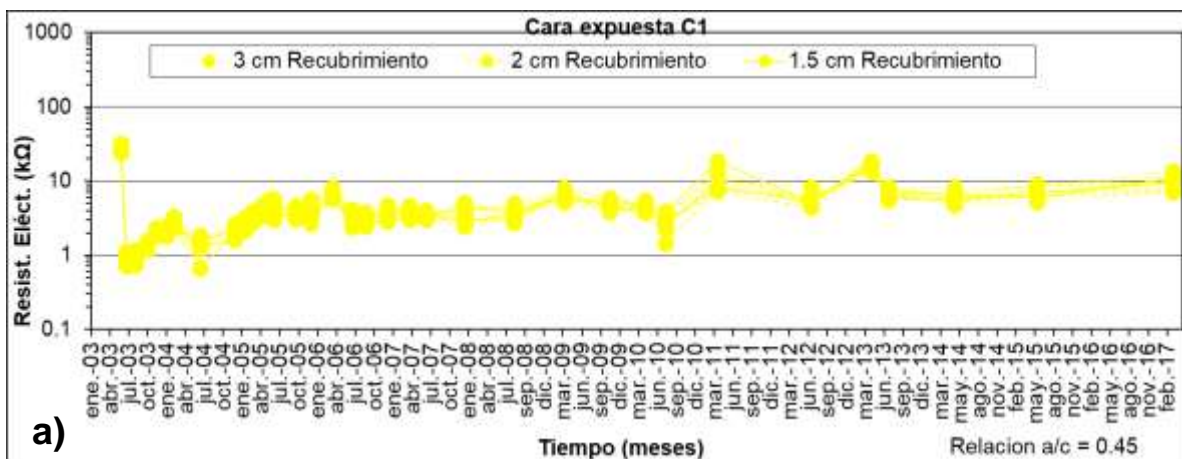




Figura B.2.2. Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. tiempo para: a) C1 Relación a/c: 0.45; b) C2 Relación a/c: 0.45; c) C1 Relación a/c: 0.65, y d) C2 Relación a/c: 0.65



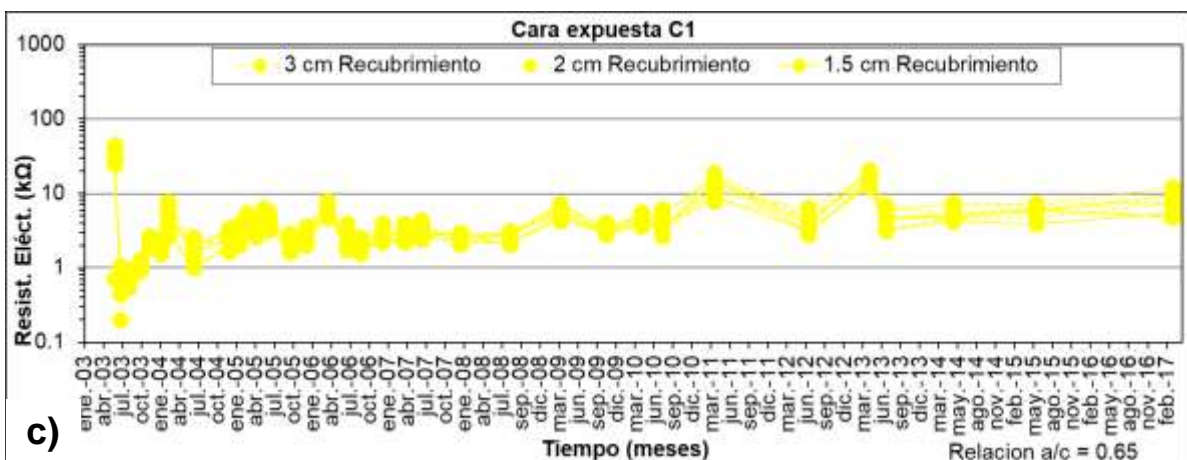
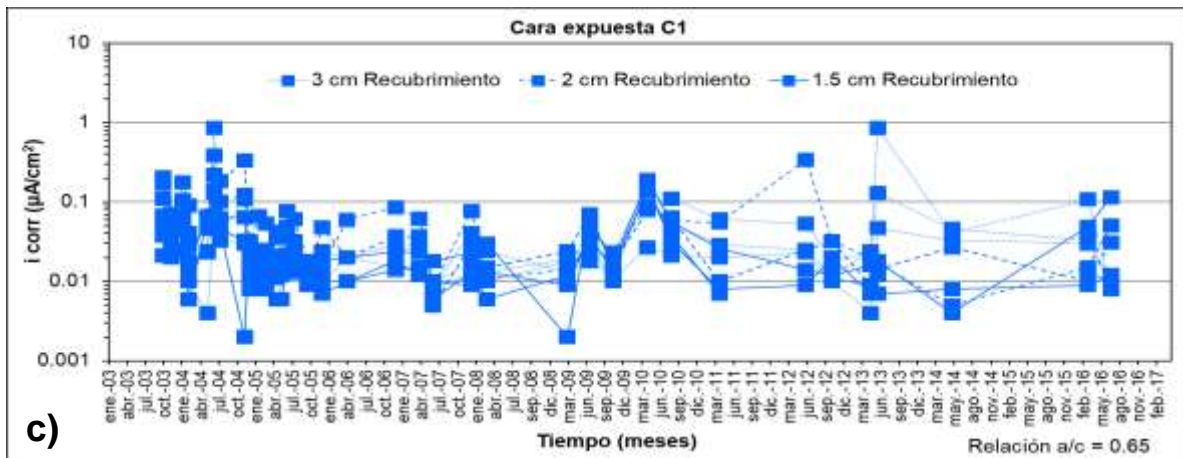
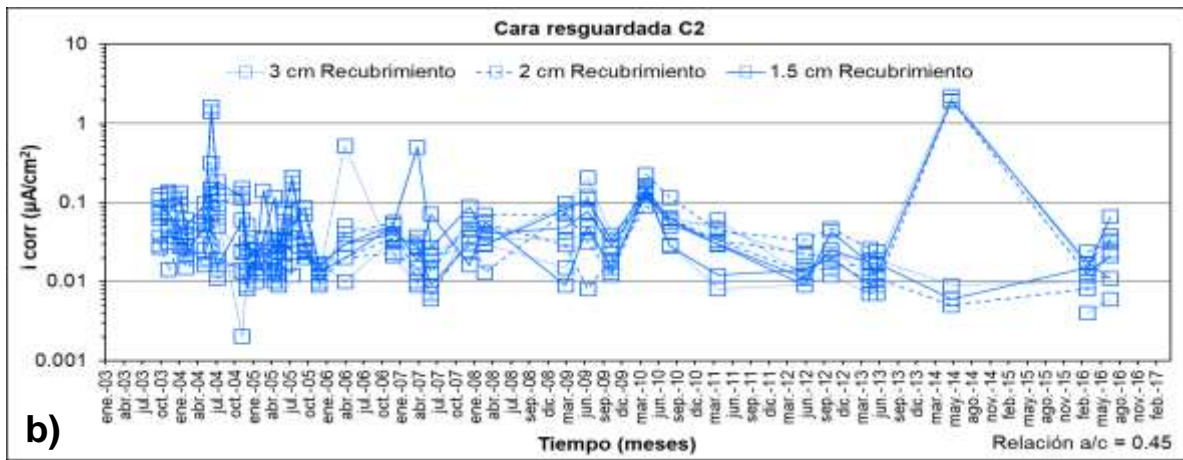
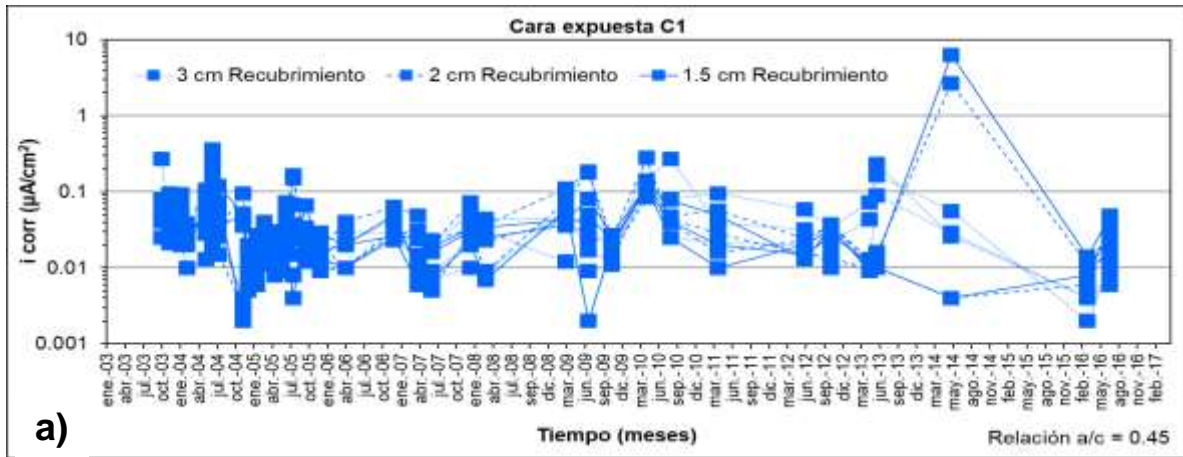


Figura B.2.3 Resistencia eléctrica vs. tiempo para: a) C1 Relación a/c: 0.45; b) C2 Relación a/c: 0.45; c) C1 Relación a/c: 0.45, y d) C2 Relación a/c: 0.65.

Anexo B.3 Estación Morelia (Mx5)



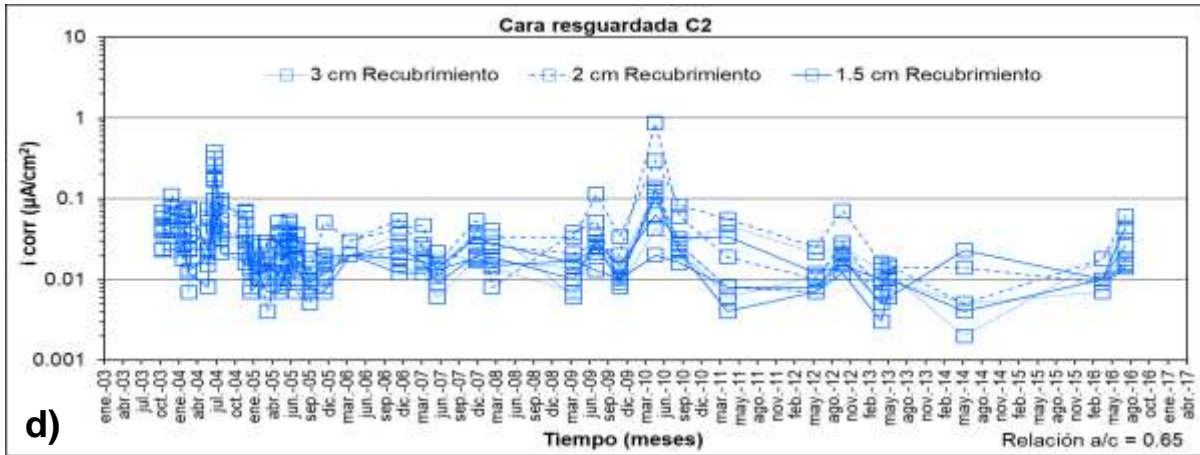
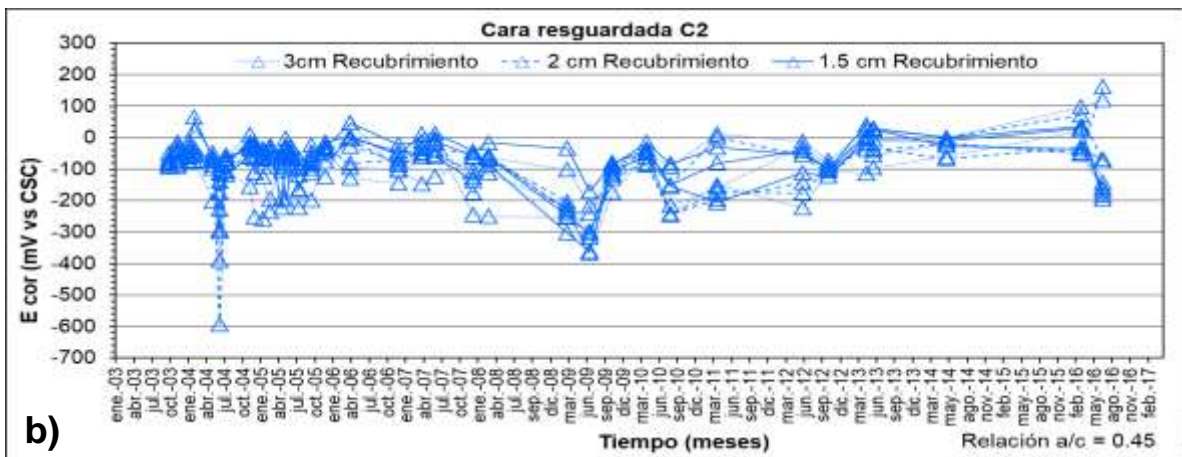
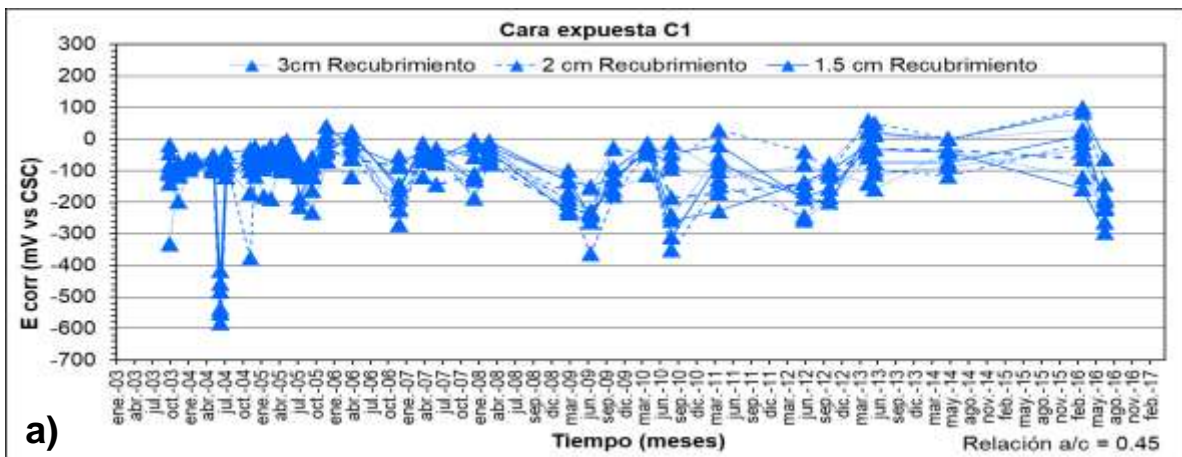


Figura B.3.1. Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. tiempo para: a) C1 Relación a/c: 0.45; b) C2 Relación a/c: 0.45; c) C1 Relación a/c: 0.45, y d) C2 Relación a/c: 0.65



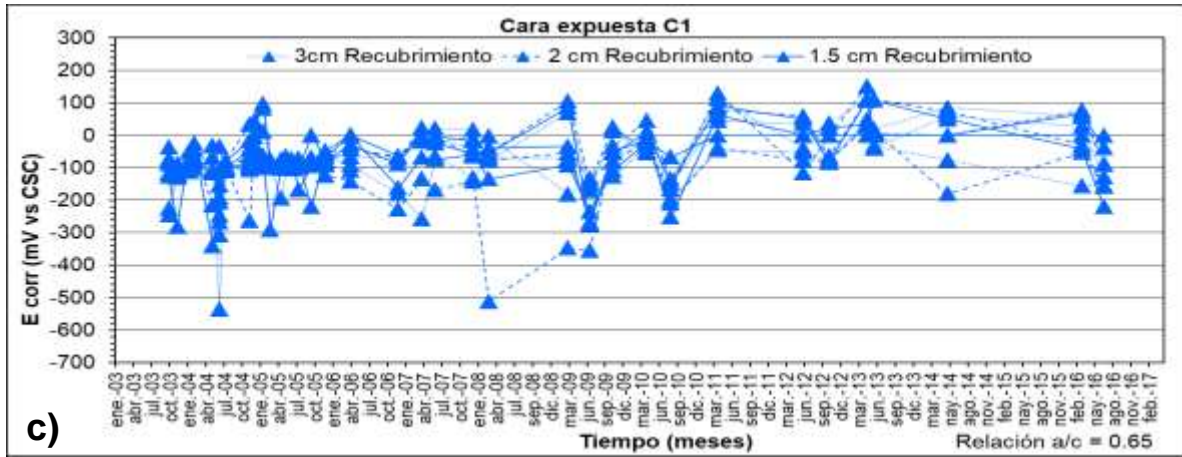
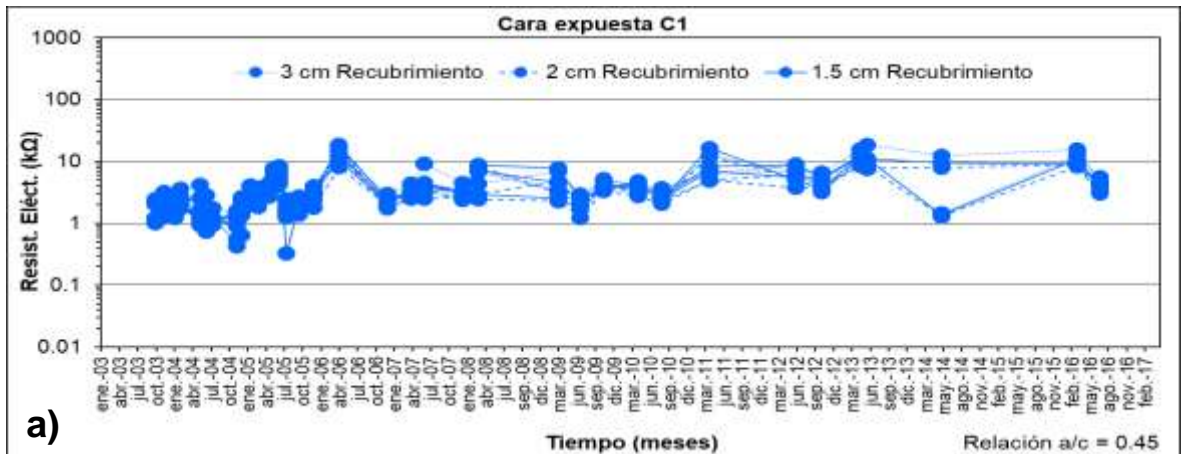


Figura B.3.2. Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. tiempo para: a) C1 Relación a/c: 0.45; b) C2 Relación a/c: 0.45; c) C1 Relación a/c: 0.45, y d) C2 Relación a/c: 0.65



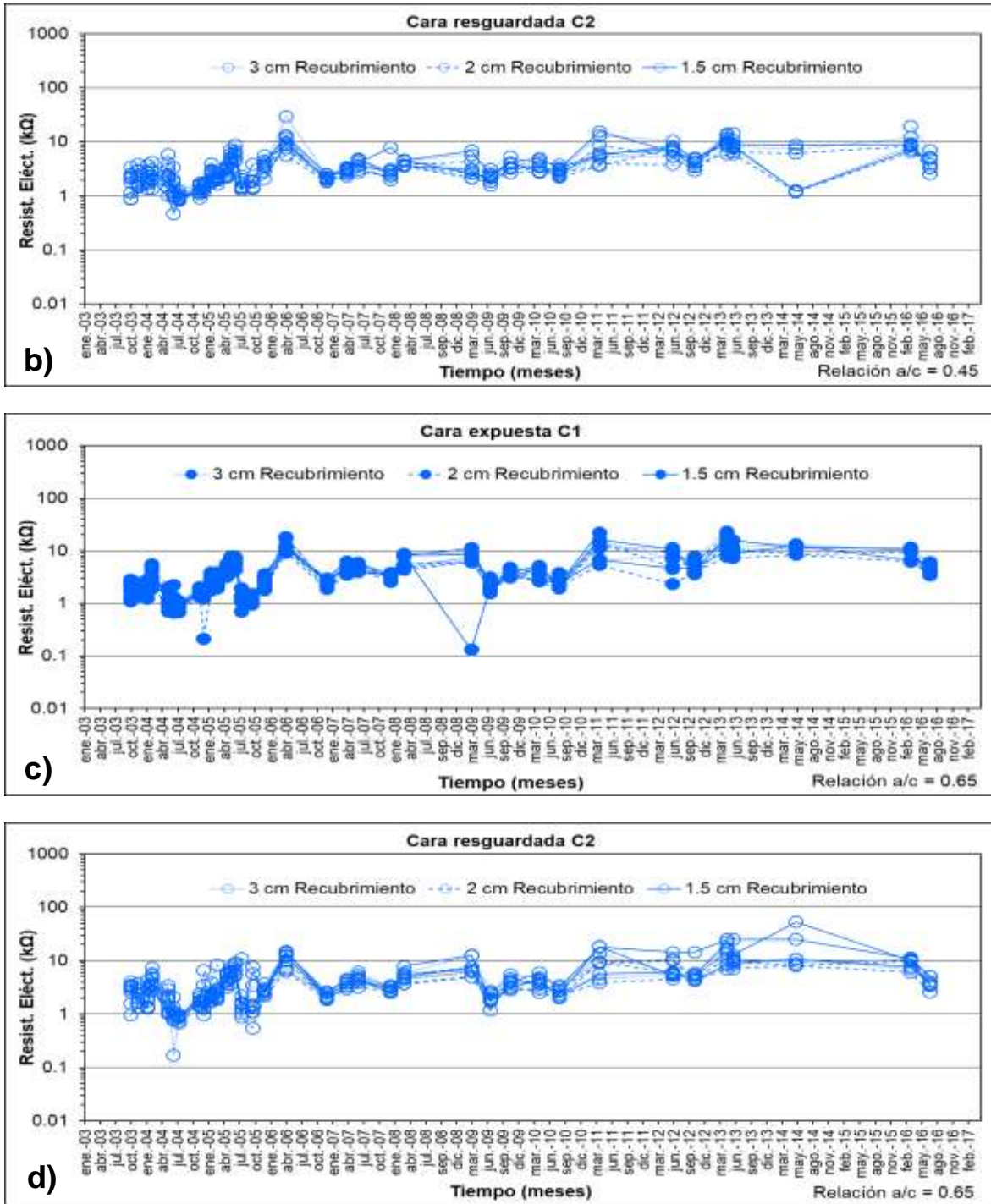
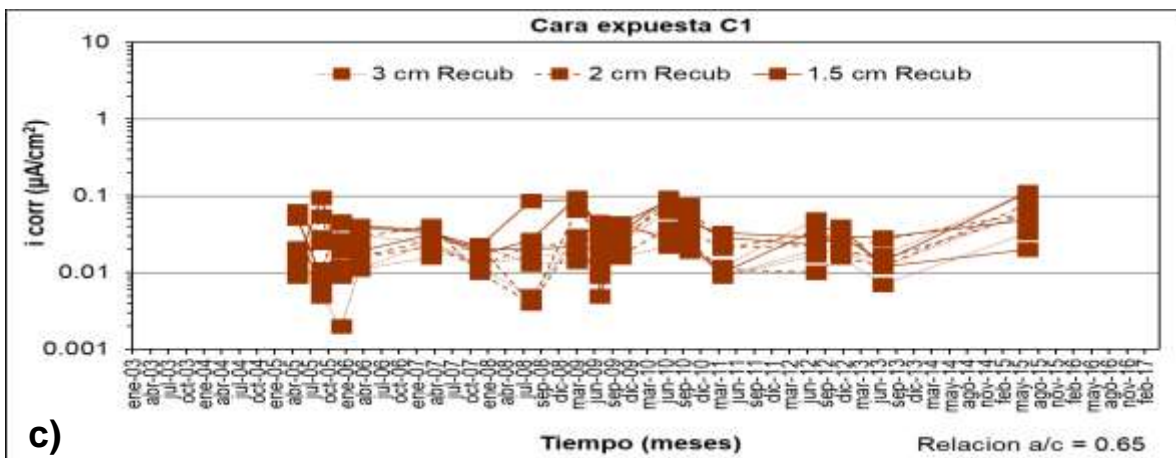
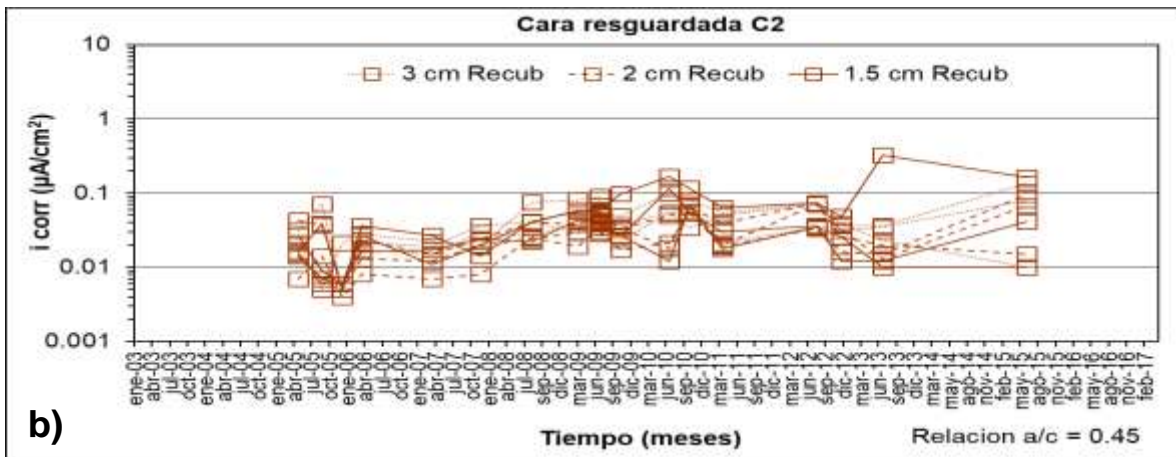
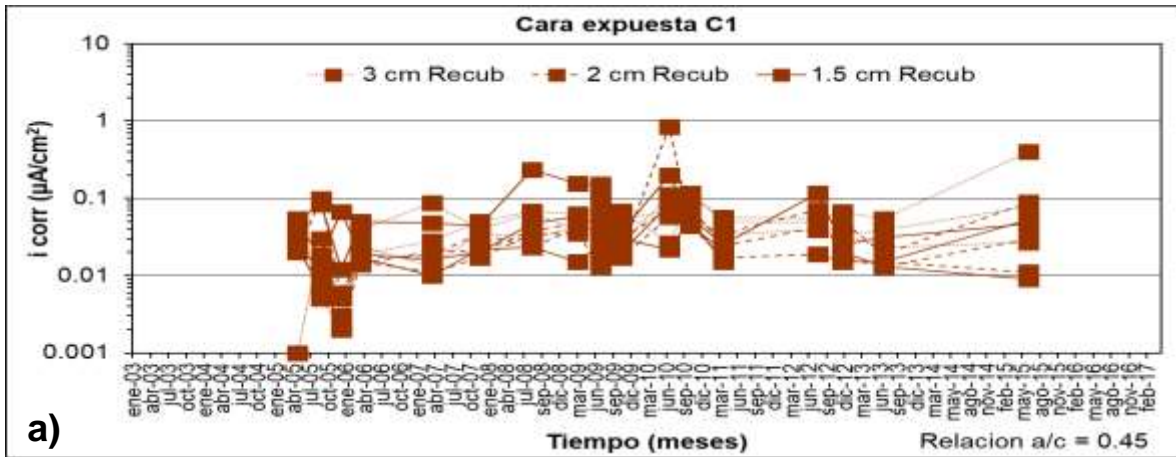


Figura B.3.3 Resistencia eléctrica vs. tiempo para: a) C1 Relación a/c: 0.45; b) C2 Relación a/c: 0.45; c) C1 Relación a/c: 0.45, y d) C2 Relación a/c: 0.65.

Anexo B.4 Estación Oaxaca (Mx4)



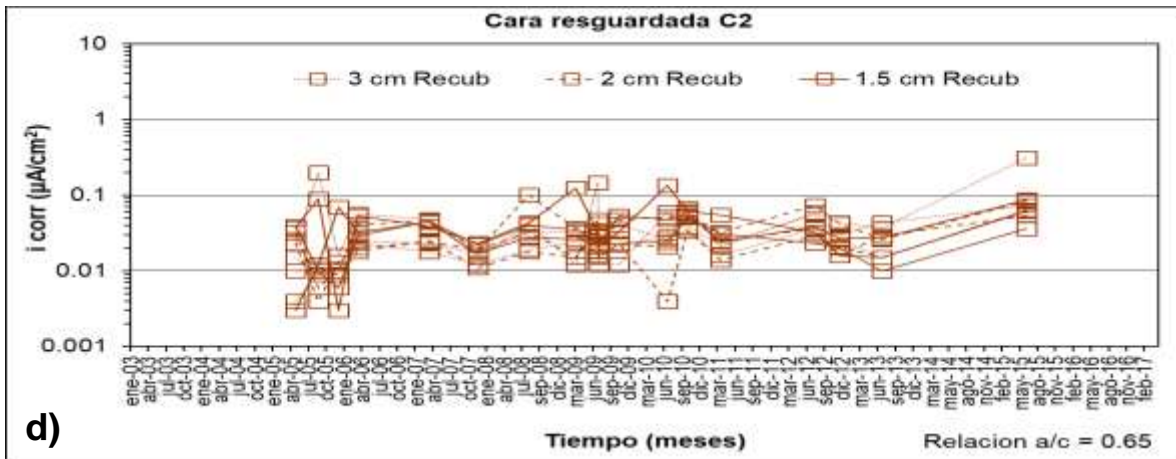


Figura B.4.1. Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. tiempo para: a) C1 Relación a/c: 0.45; b) C2 Relación a/c: 0.45; c) C1 Relación a/c: 0.45, y d) C2 Relación a/c: 0.65



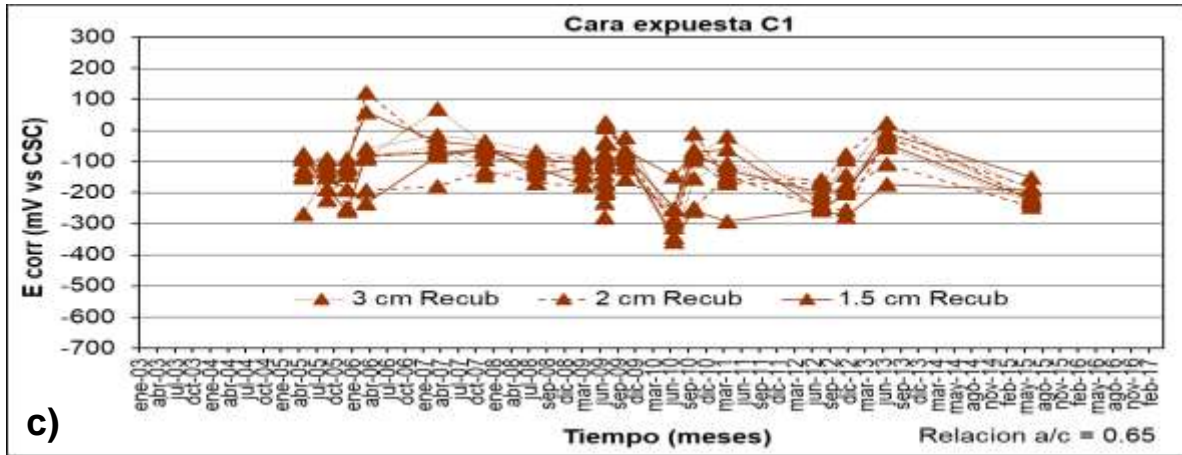
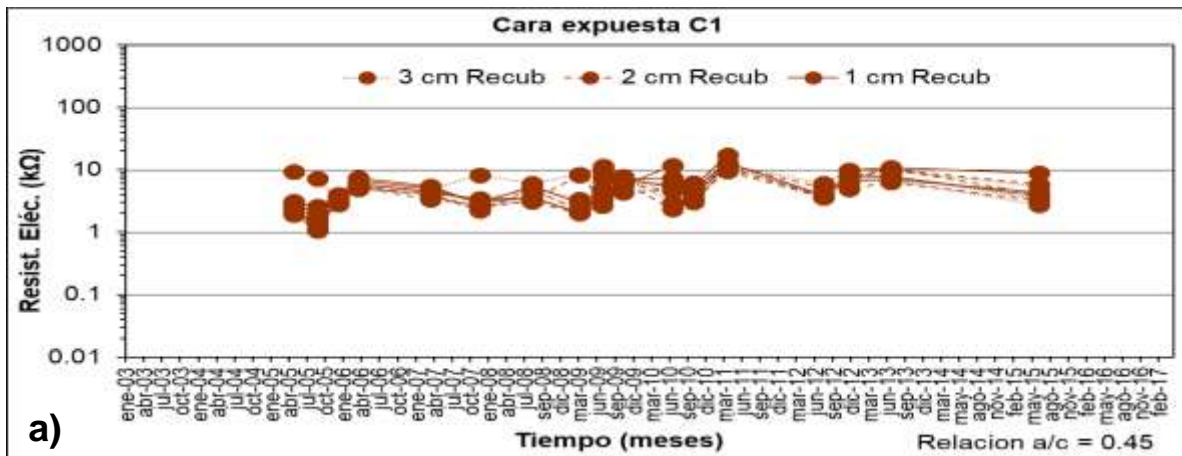


Figura B.4.2. Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. tiempo para: a) C1 Relación a/c: 0.45; b) C2 Relación a/c: 0.45; c) C1 Relación a/c: 0.65, y d) C2 Relación a/c: 0.65



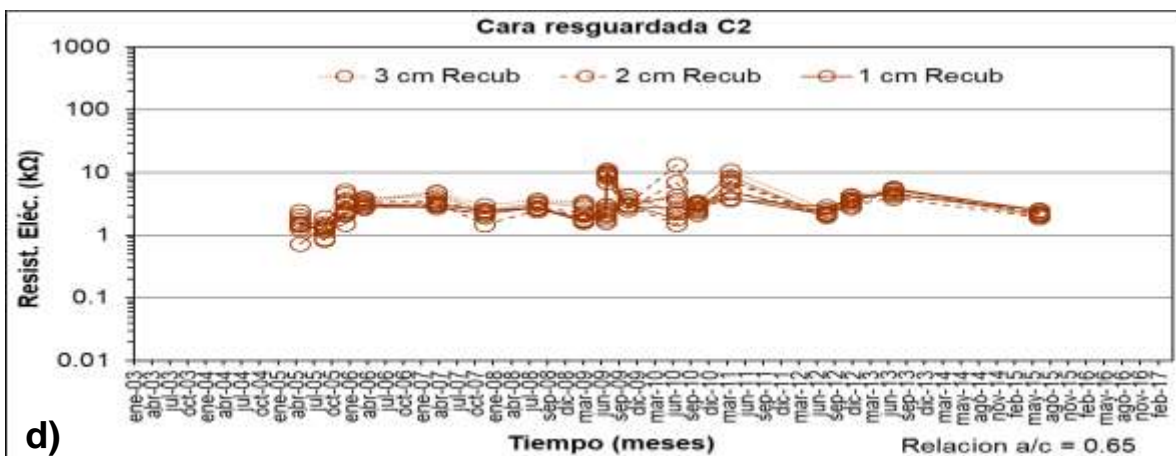
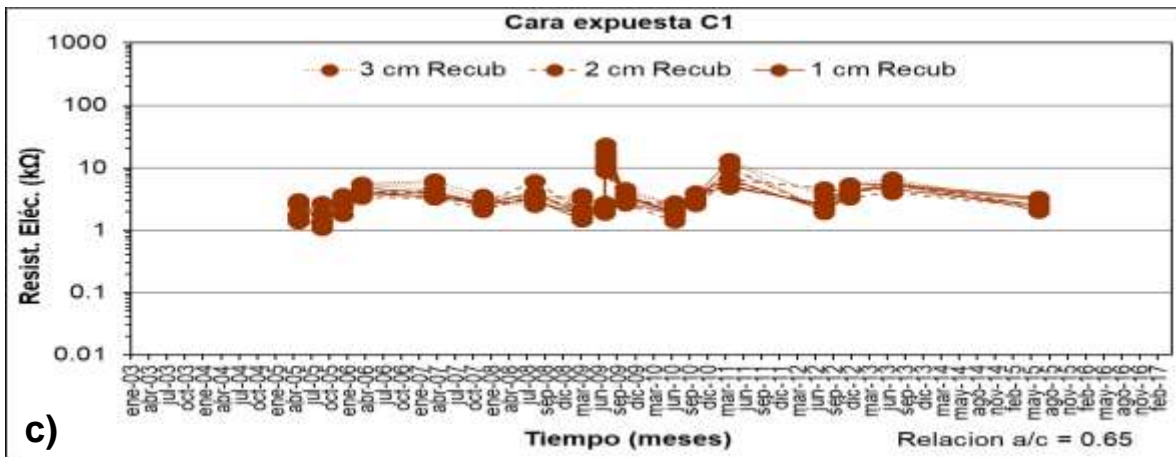
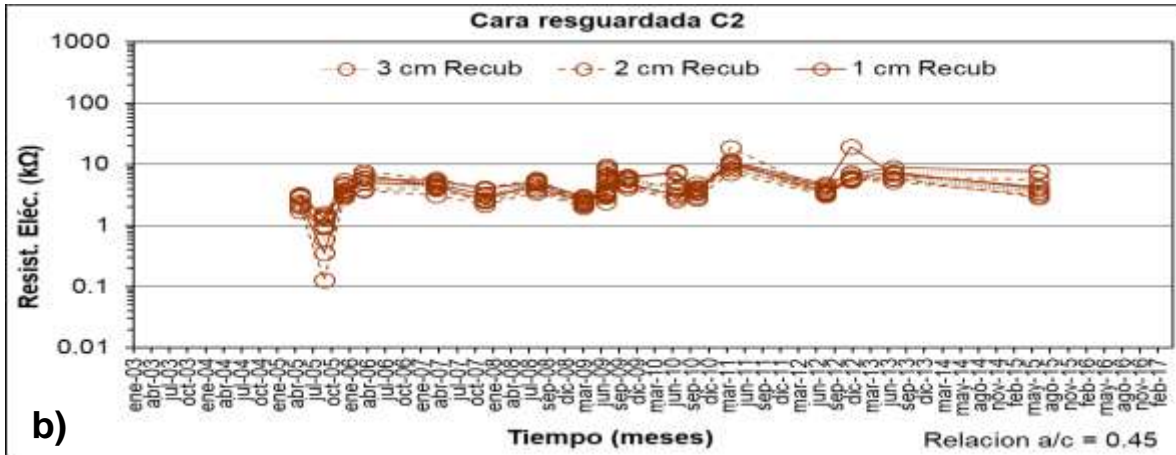
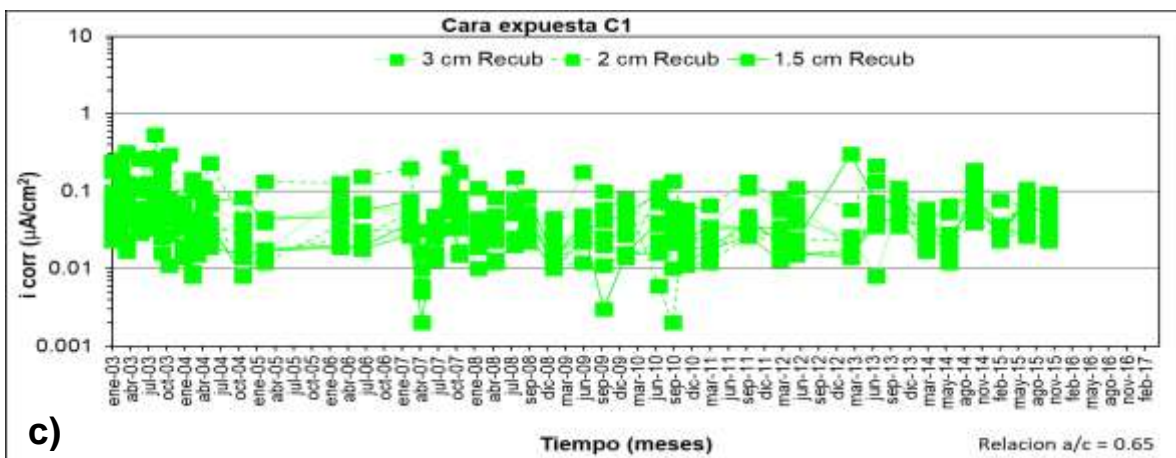
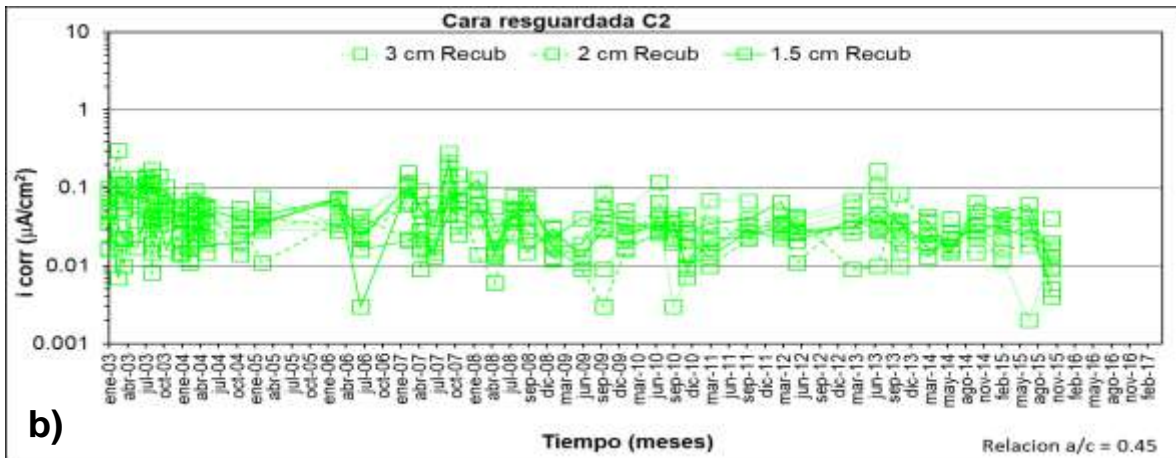
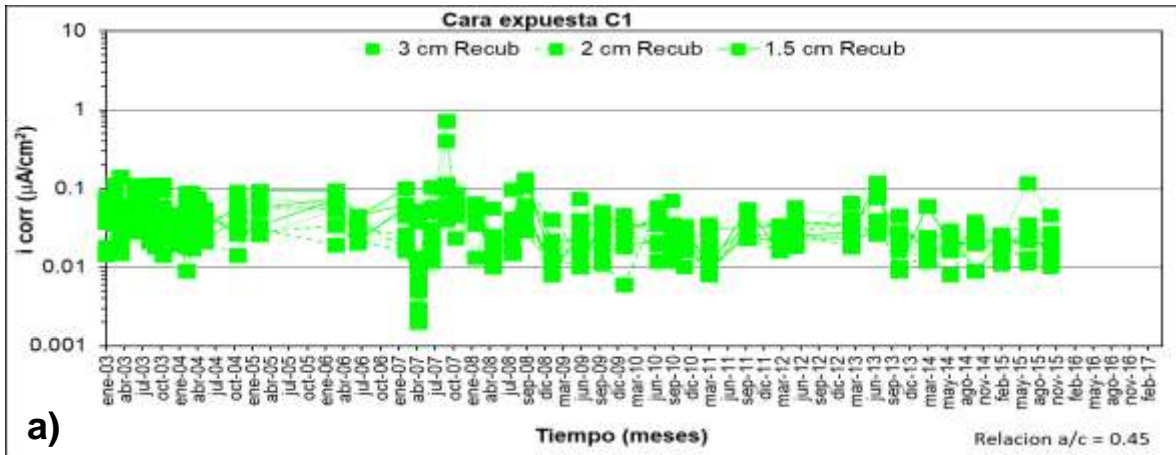


Figura B.4.3 Resistencia eléctrica vs. tiempo para: a) C1 Relación a/c: 0.45; b) C2 Relación a/c: 0.45; c) C1 Relación a/c: 0.45, y d) C2 Relación a/c: 0.65.

Anexo B.5 Estación Progreso (Mx2)



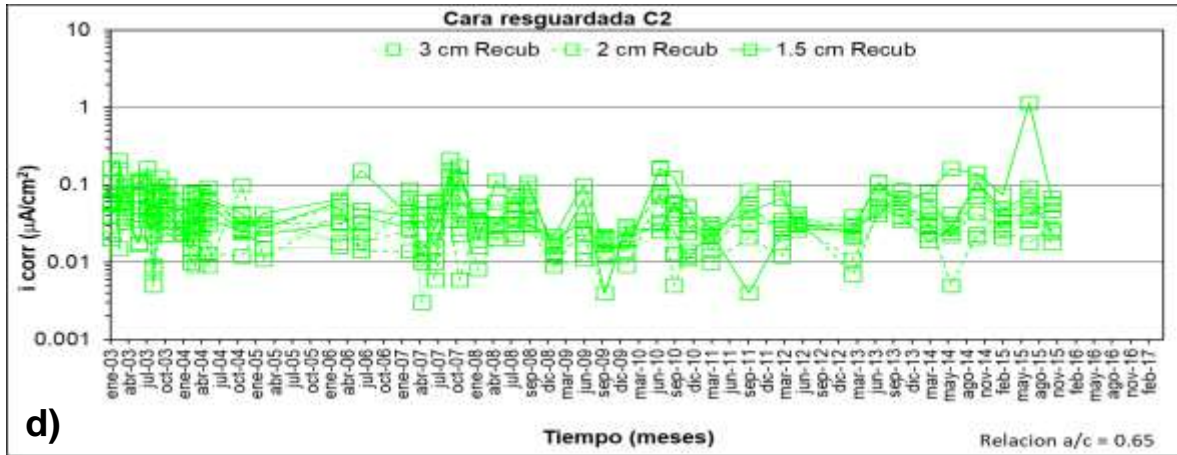
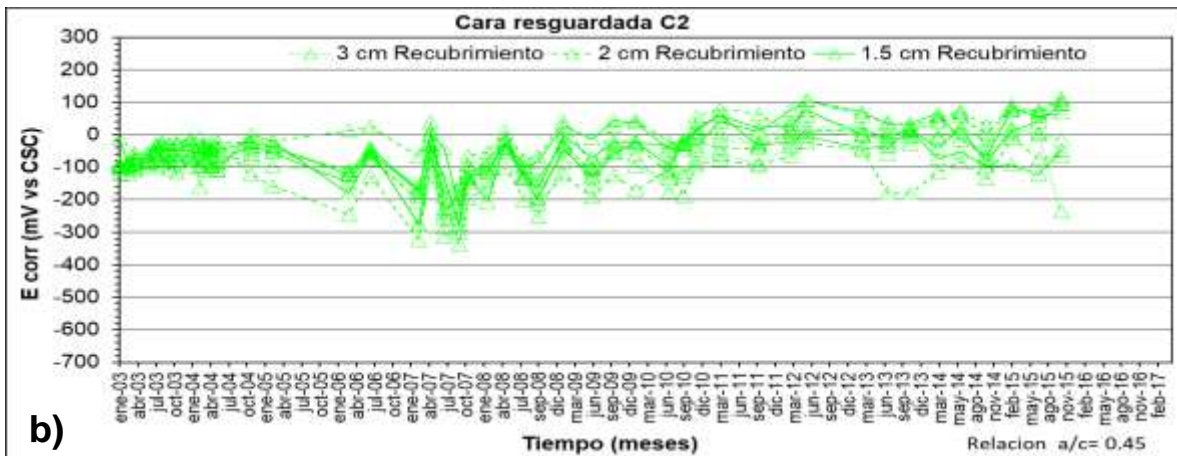


Figura B.5.1. Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. tiempo para: a) C1 Relación a/c: 0.45; b) C2 Relación a/c: 0.45; c) C1 Relación a/c: 0.45, y d) C2 Relación a/c: 0.65.



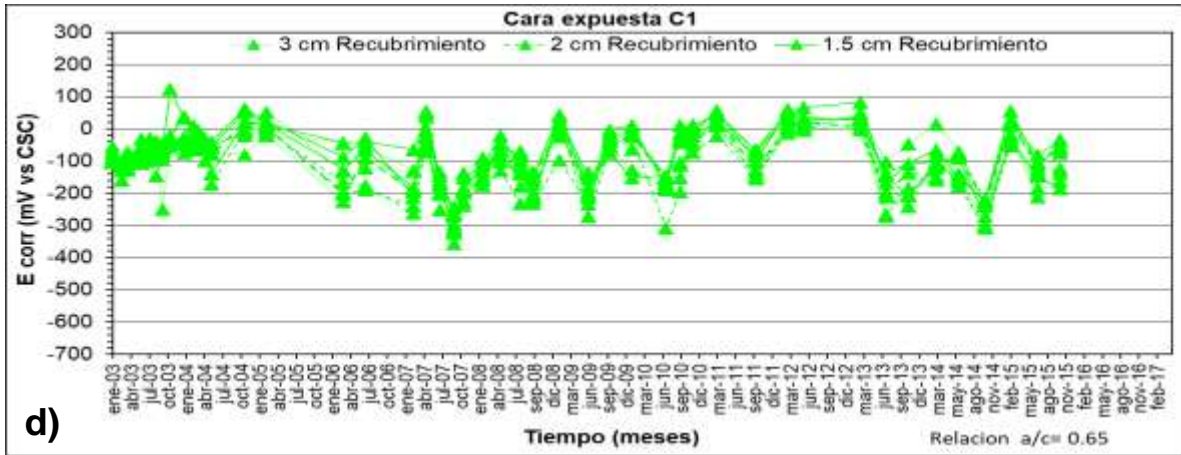
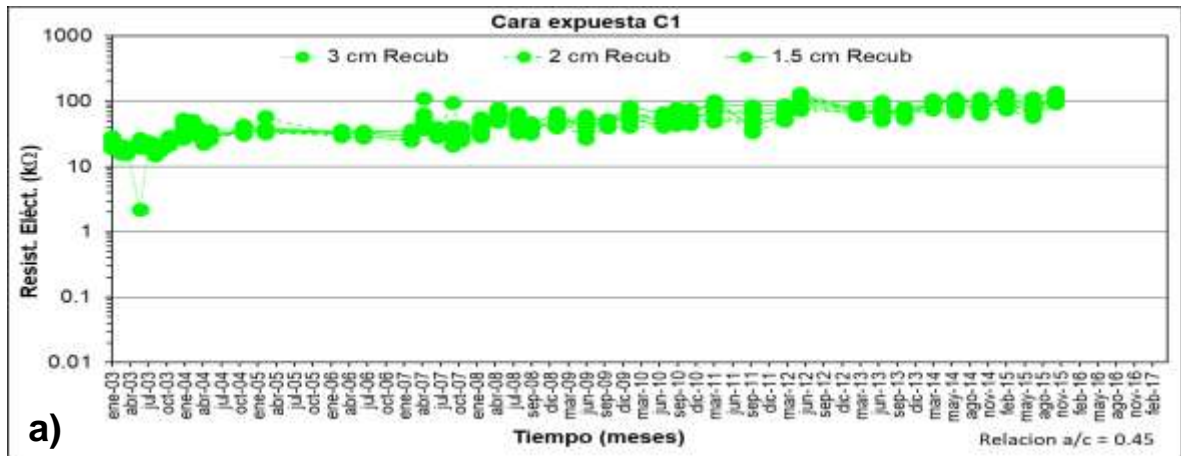


Figura B.5.2. Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. tiempo para: a) C1 Relación a/c: 0.45; b) C2 Relación a/c: 0.45; c) C1 Relación a/c: 0.45, y d) C2 Relación a/c: 0.65.



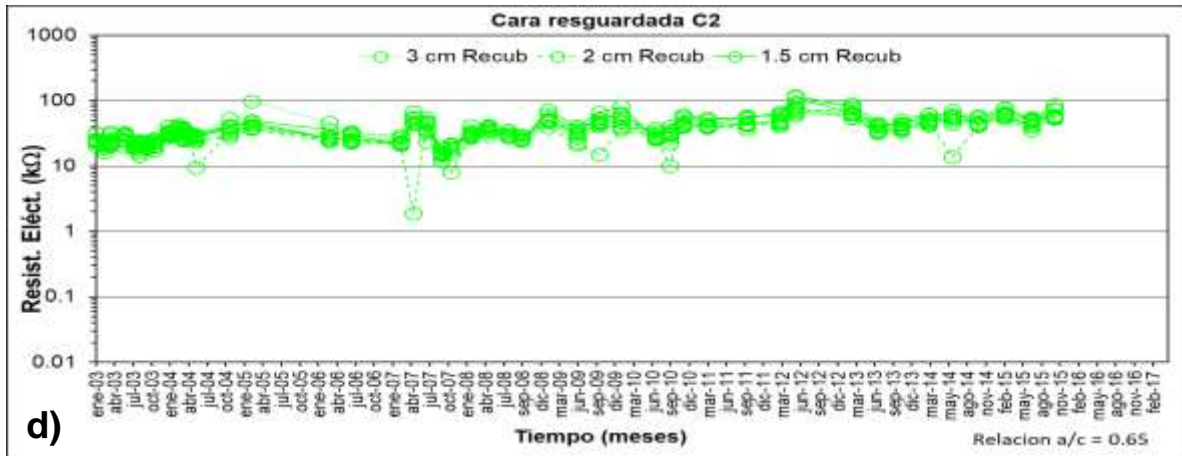
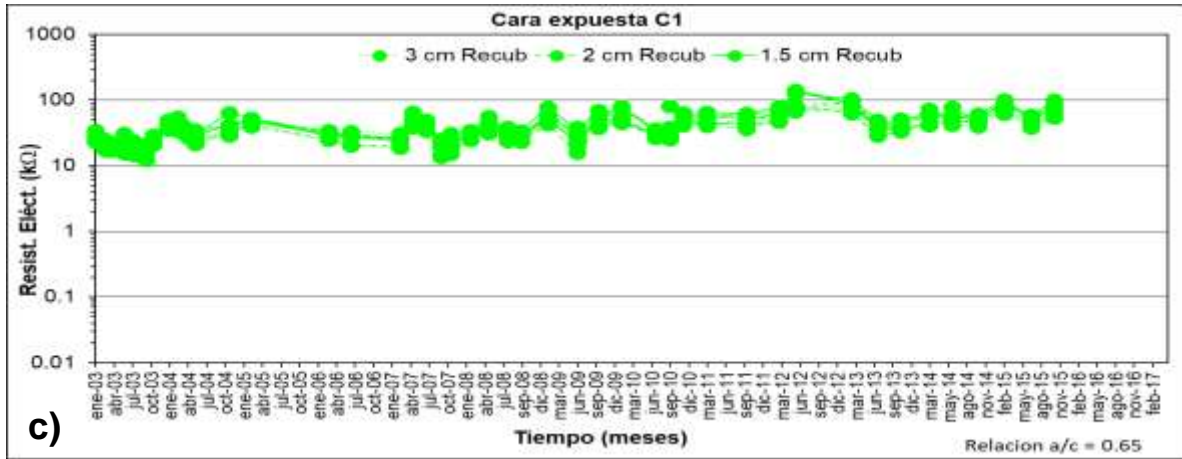
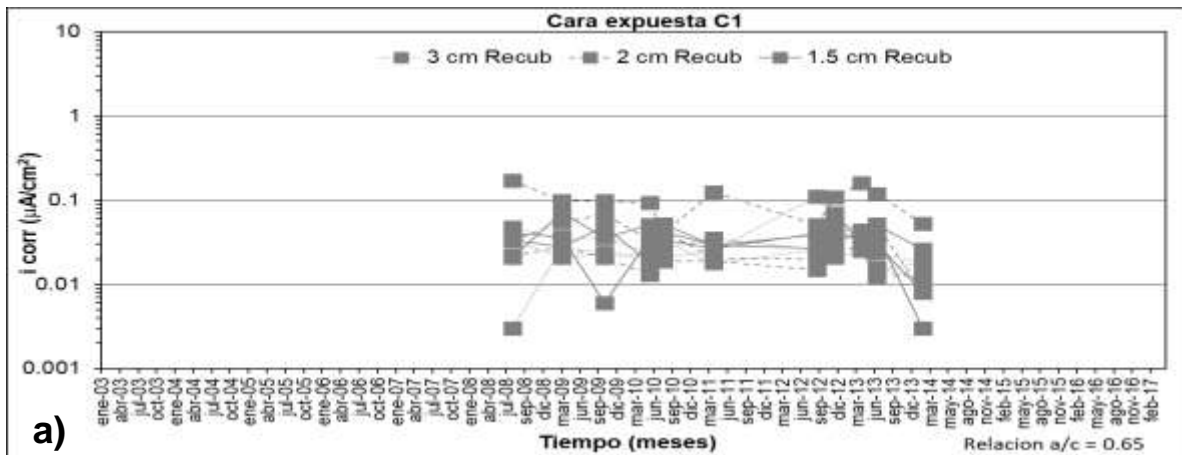


Figura B.5.3 Resistencia eléctrica vs. tiempo para: a) C1 Relación a/c: 0.45; b) C2 Relación a/c: 0.45; c) C1 Relación a/c: 0.45, y d) C2 Relación a/c: 0.65.

Anexo B.6 Estación Tampico (Mx15)



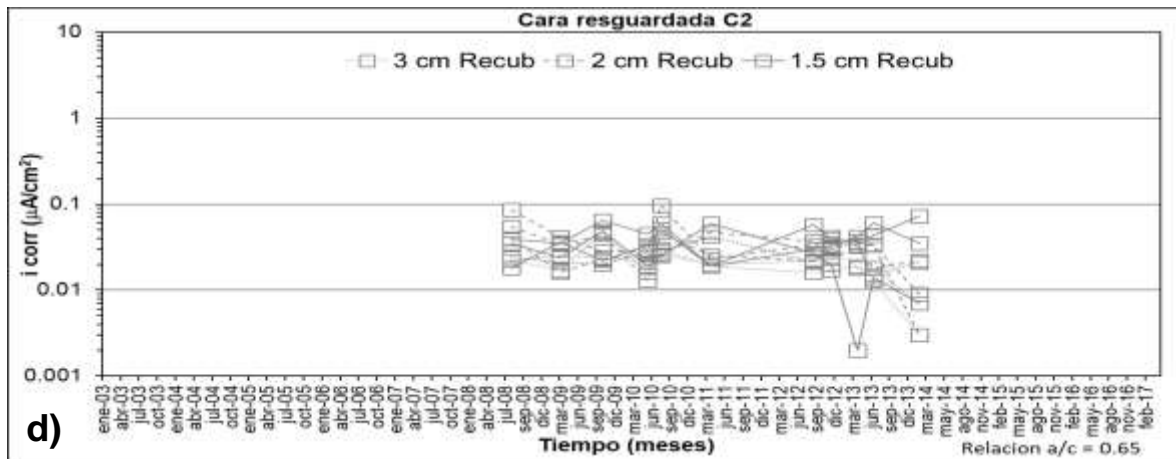
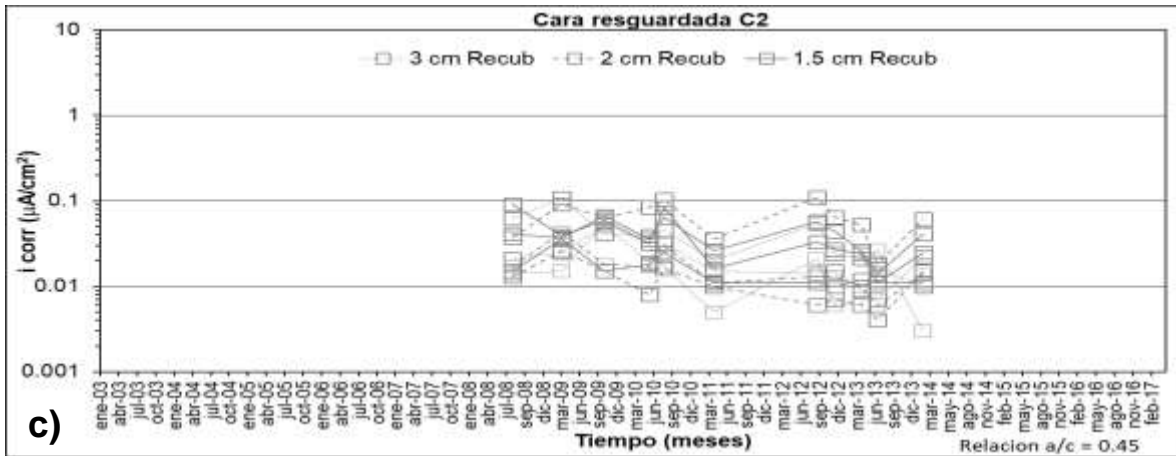
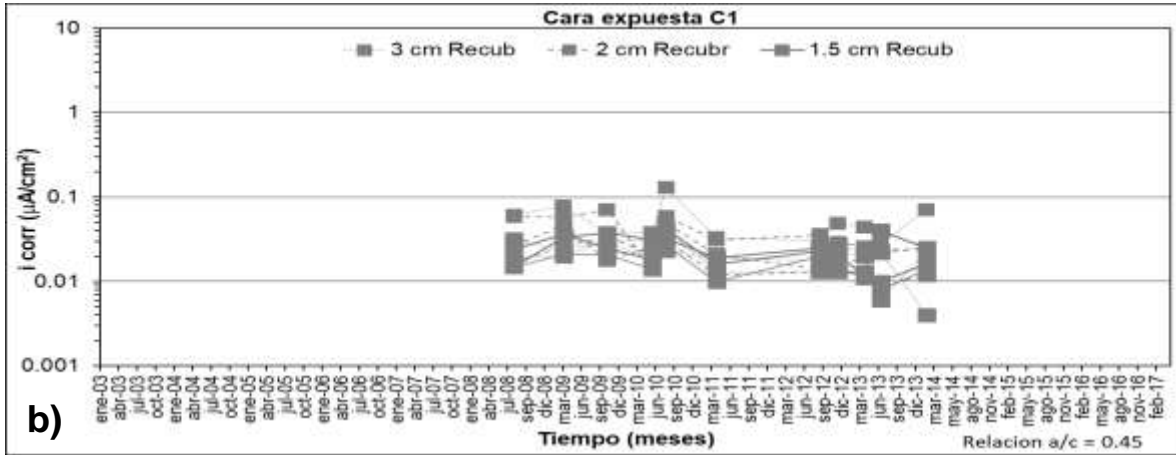
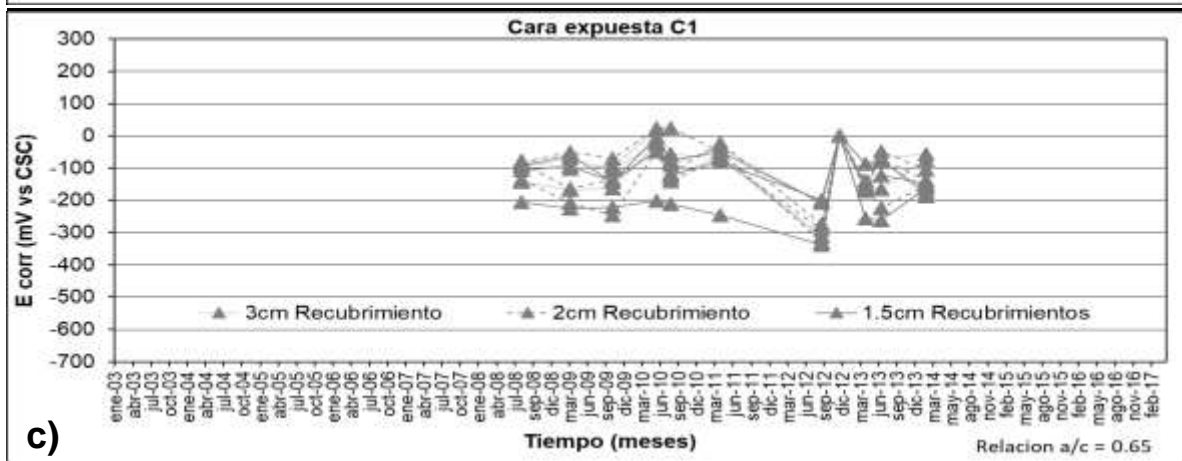
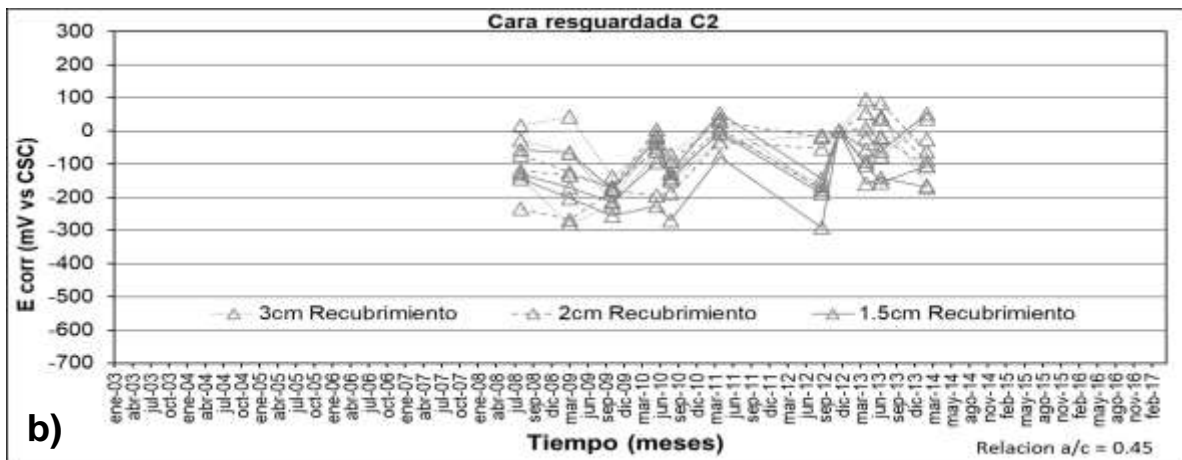
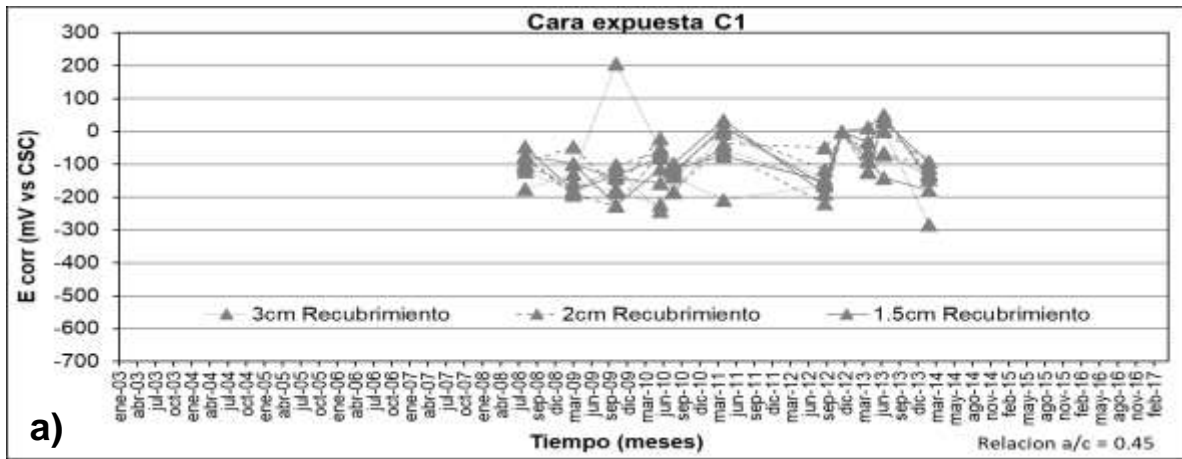


Figura B.6.1. Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. tiempo para: a) C1 Relación a/c: 0.45; b) C2 Relación a/c: 0.45; c) C1 Relación a/c: 0.45, y d) C2 Relación a/c: 0.65.



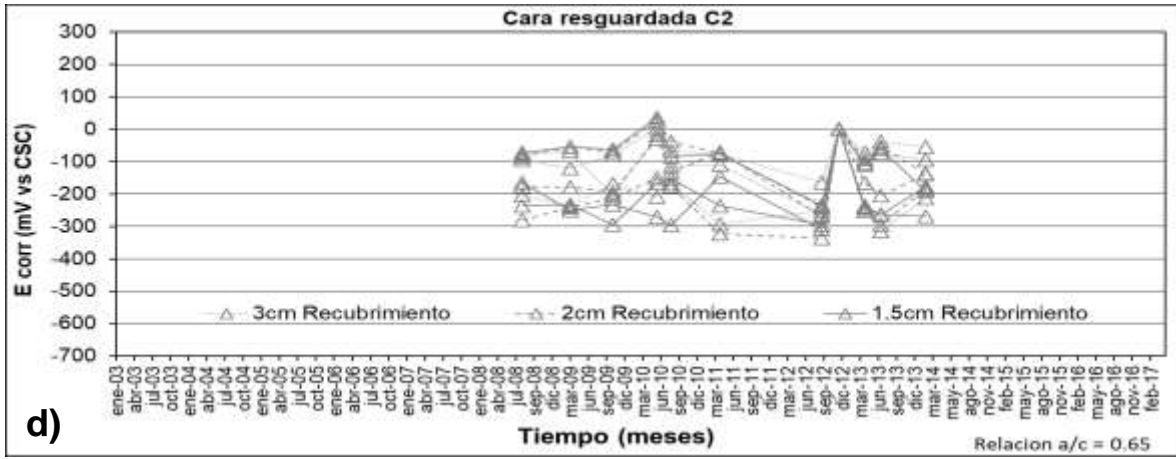
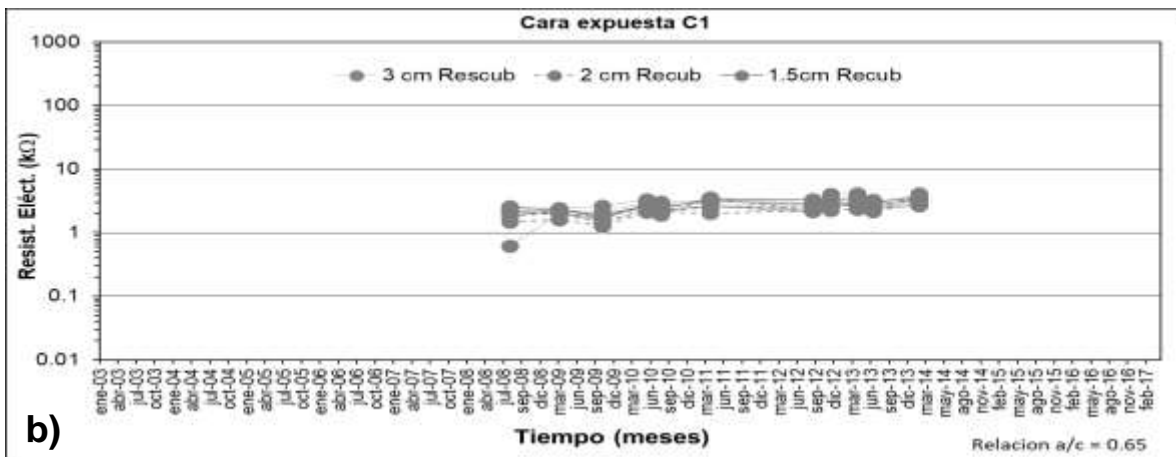
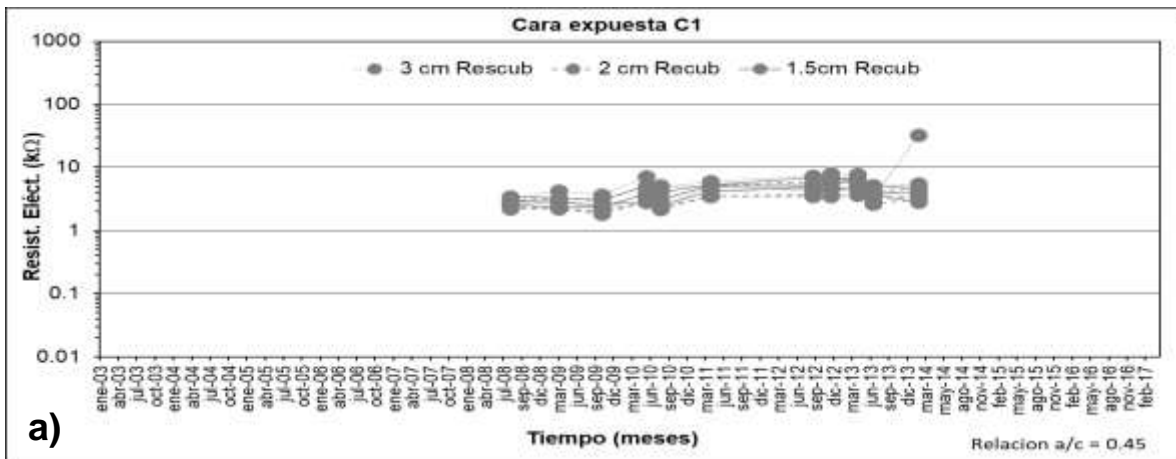


Figura B.6.2. Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. tiempo para: a) C1 Relación a/c: 0.45; b) C2 Relación a/c: 0.45; c) C1 Relación a/c: 0.45, y d) C2 Relación a/c: 0.65.



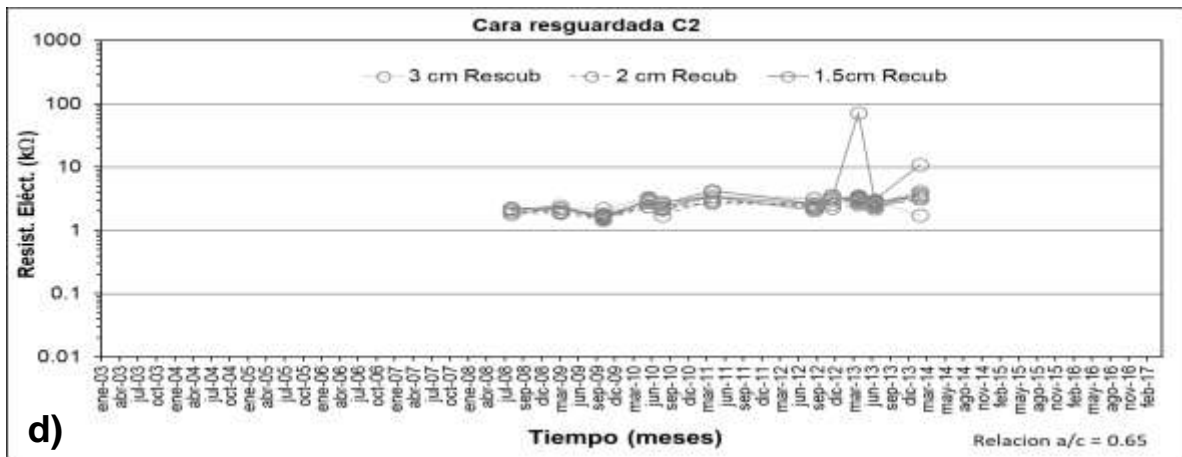
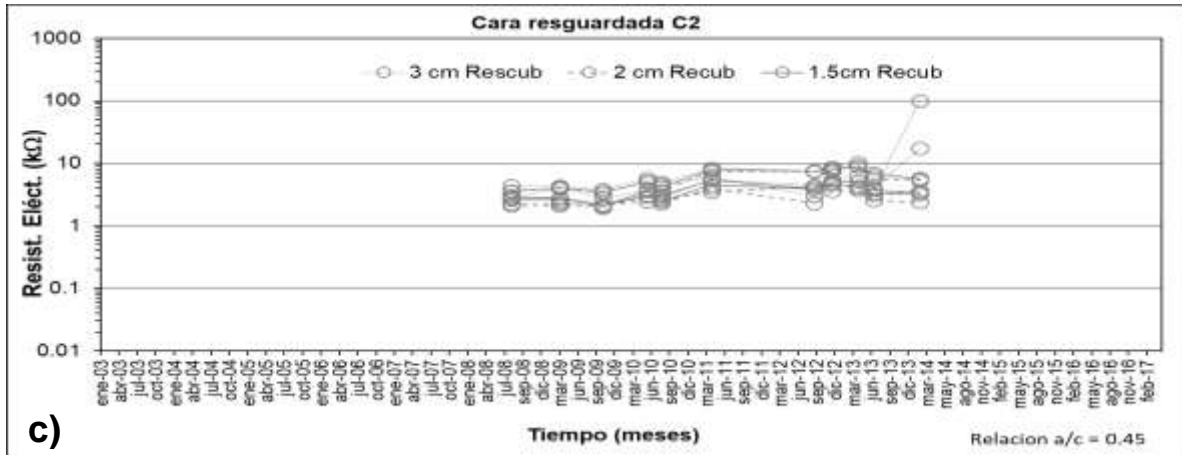


Figura B.6.3 Resistencia eléctrica vs. tiempo para: a) C1 Relación a/c: 0.45; b) C2 Relación a/c: 0.45; c) C1 Relación a/c: 0.45, y d) C2 Relación a/c: 0.65.

Anexo B.7 Estación Toluca (Mx9)

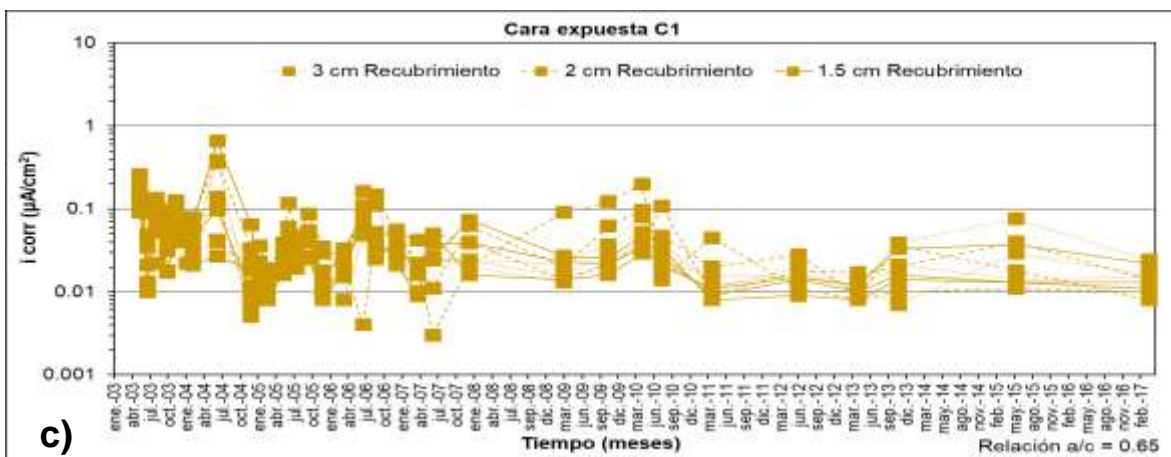
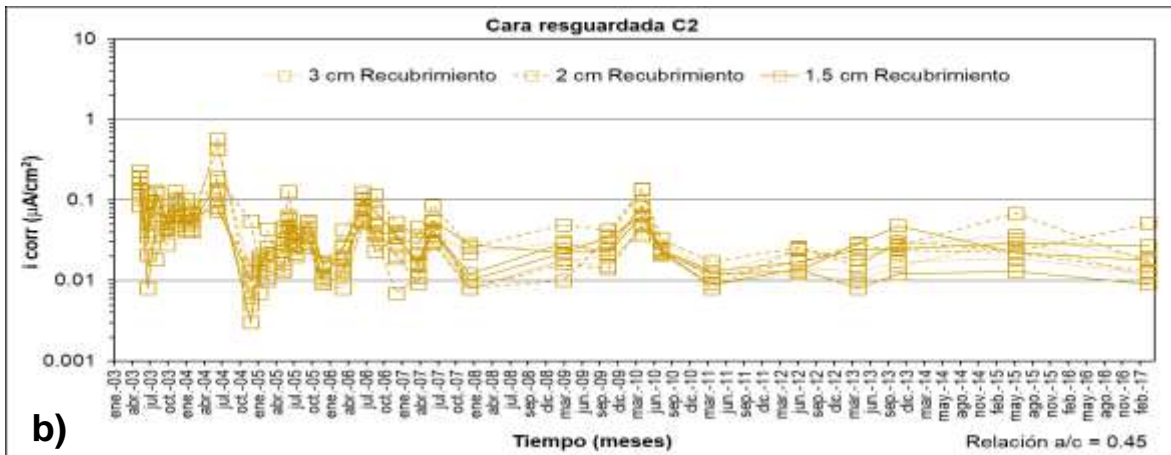
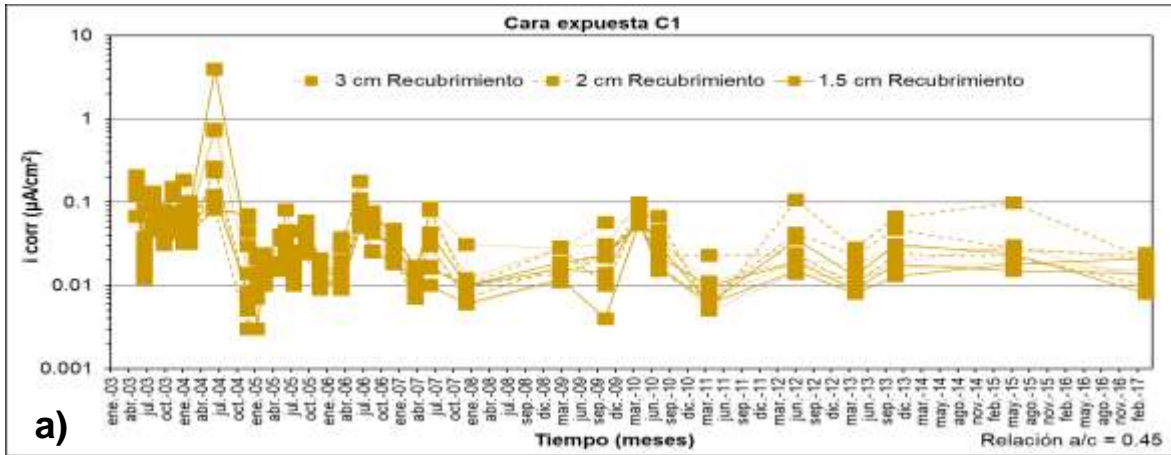
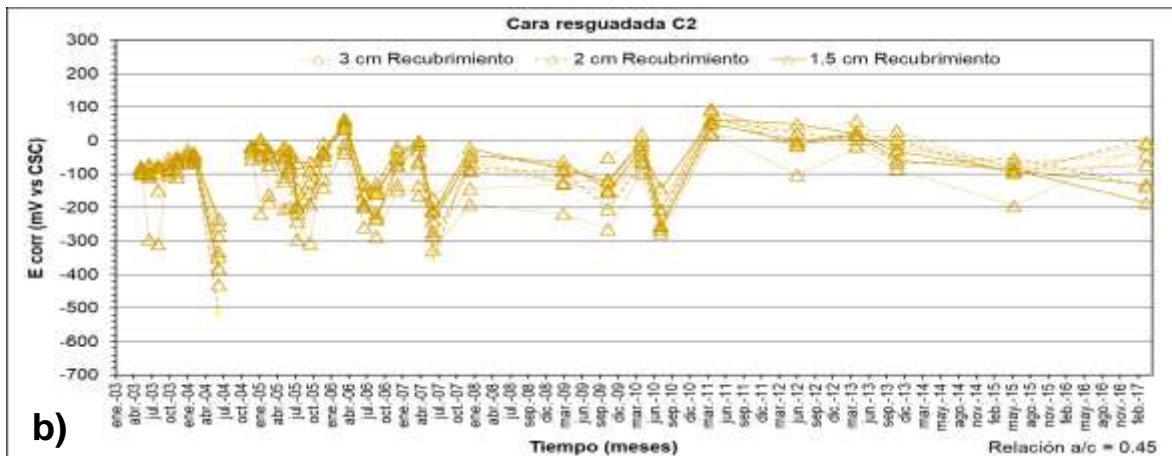
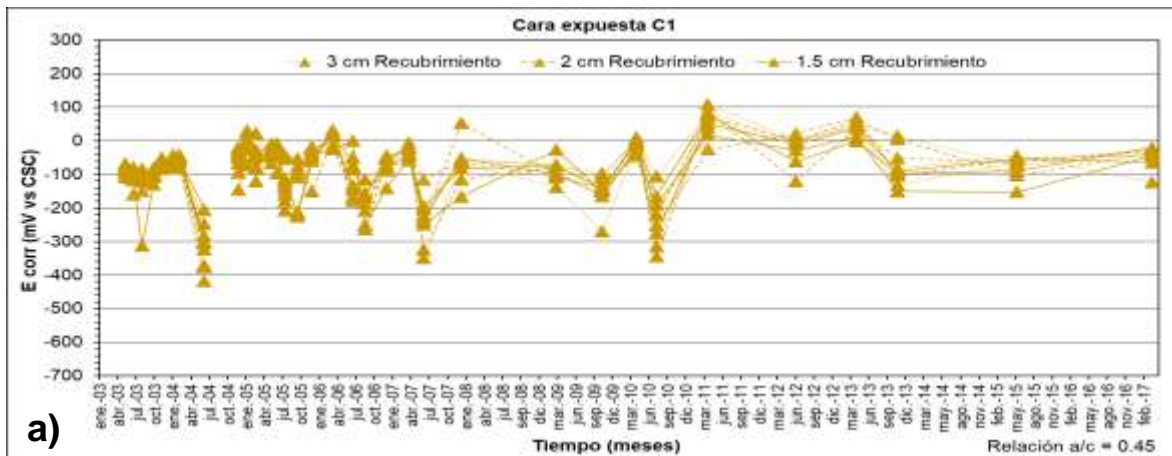




Figura B.7.1. Velocidad de corrosión (icorr) vs. tiempo para: a) C1 Relación a/c: 0.45; b) C2 Relación a/c: 0.45; c) C1 Relación a/c: 0.45, y d) C2 Relación a/c: 0.65



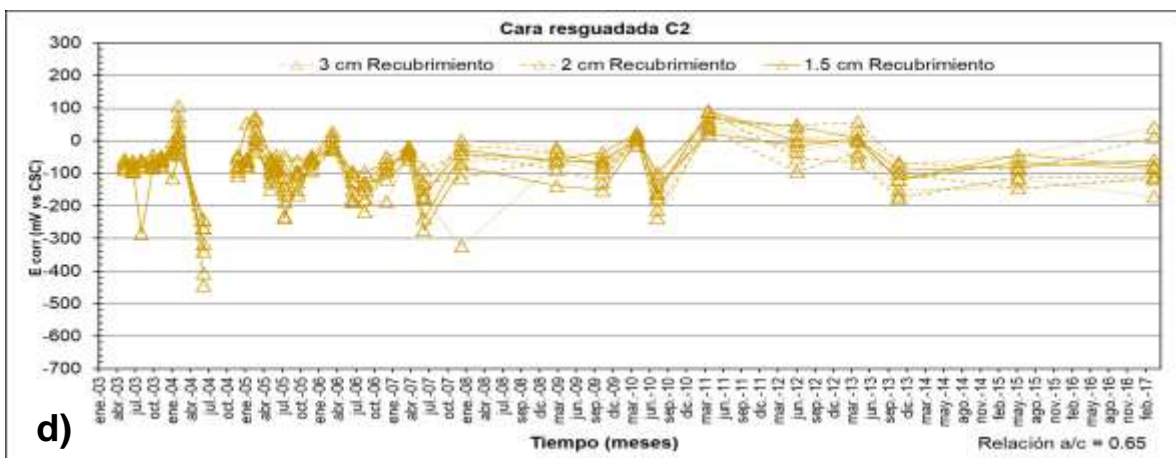
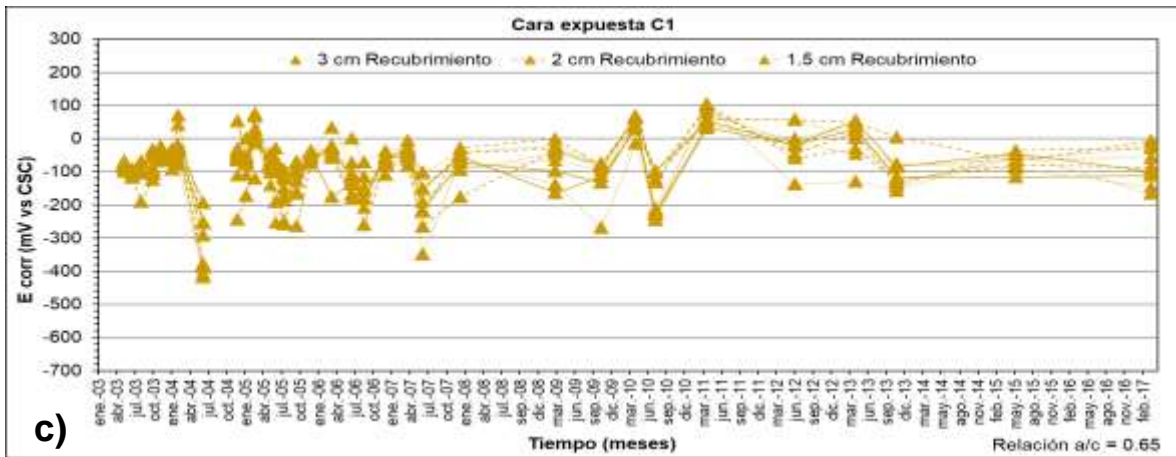
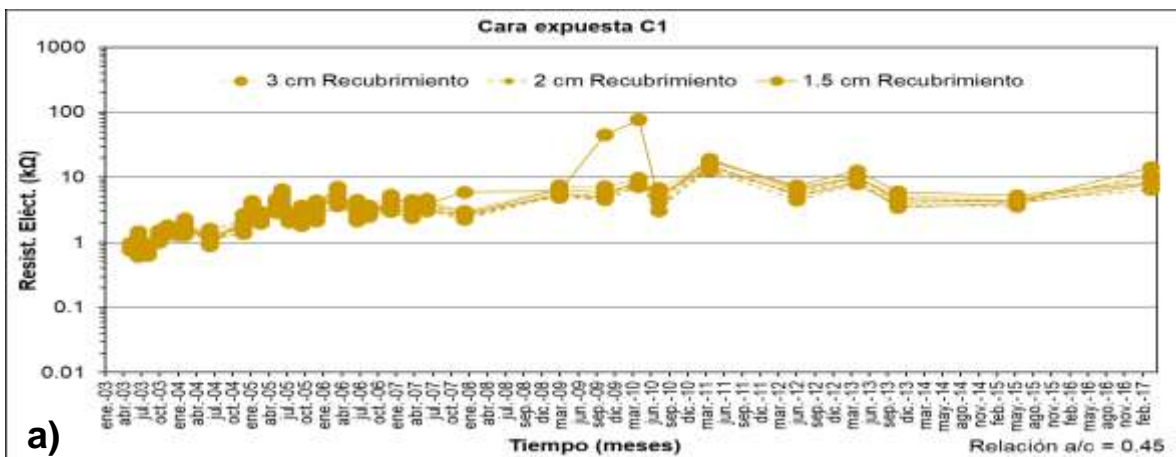


Figura B.7.2. Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. tiempo para: a) C1 Relación a/c: 0.45; b) C2 Relación a/c: 0.45; c) C1 Relación a/c: 0.45, y d) C2 Relación a/c: 0.65.



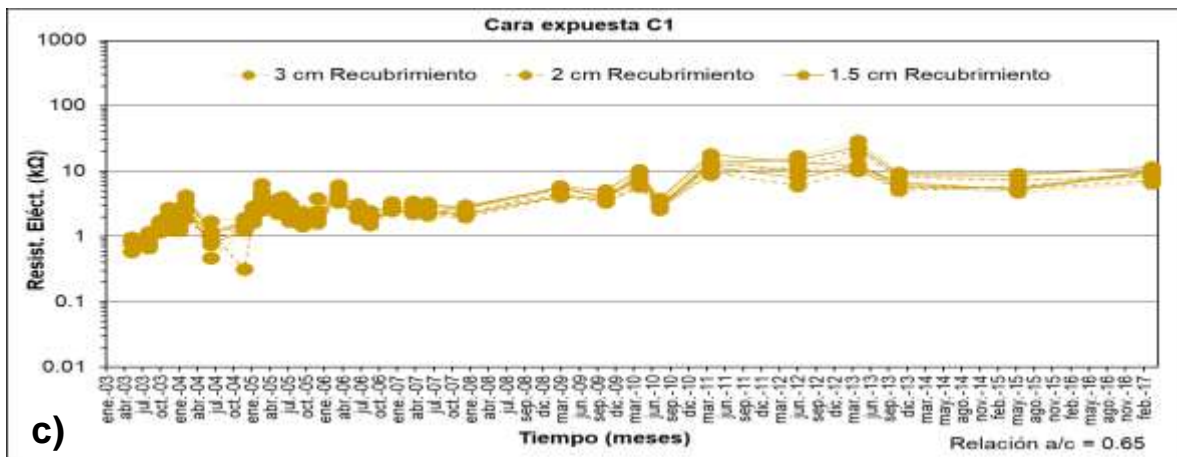


Figura B.7.3 Resistencia eléctrica vs. tiempo para: a) C1 Relación a/c: 0.45; b) C2 Relación a/c: 0.45; c) C1 Relación a/c: 0.45, y d) C2 Relación a/c: 0.65.

Anexo B.8 Estación Xalapa (Mx14)

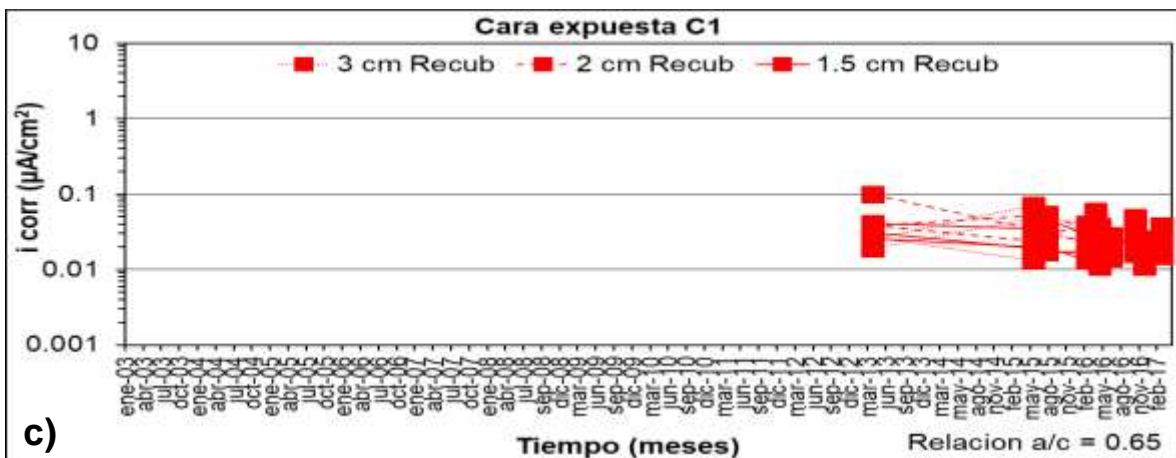
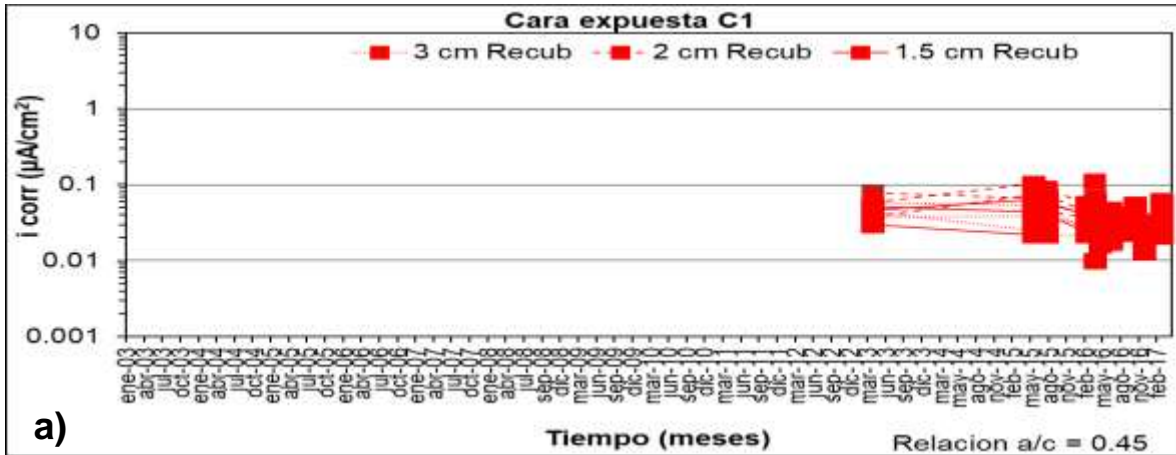


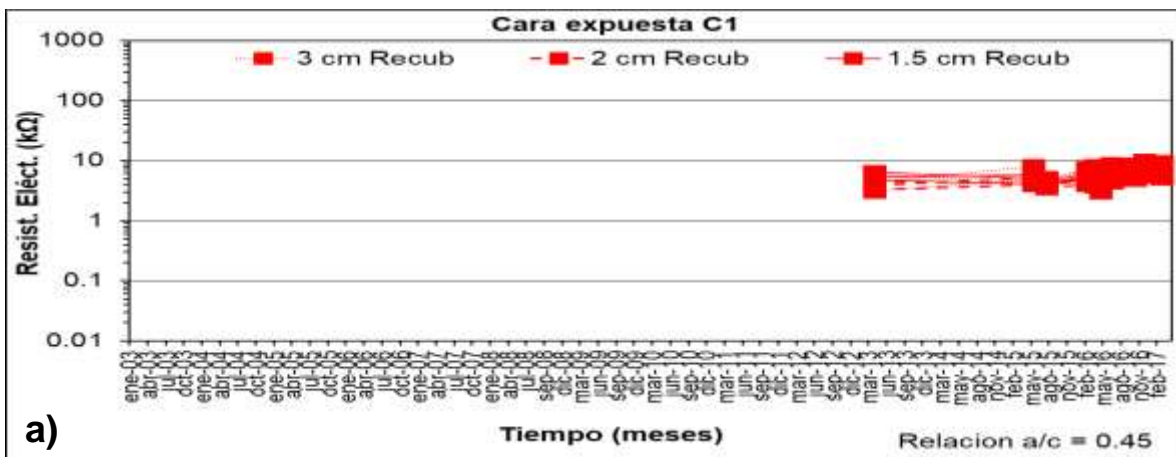


Figura B.8.1. Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. tiempo para: a) C1 Relación a/c: 0.45; b) C2 Relación a/c: 0.45; c) C1 Relación a/c: 0.45, y d) C2 Relación a/c: 0.65.





Figura B.8.2. Potencial de corrosión (Ecorr) vs. tiempo para: a) C1 Relación a/c: 0.45; b) C2 Relación a/c: 0.45; c) C1 Relación a/c: 0.45, y d) C2 Relación a/c: 0.65.



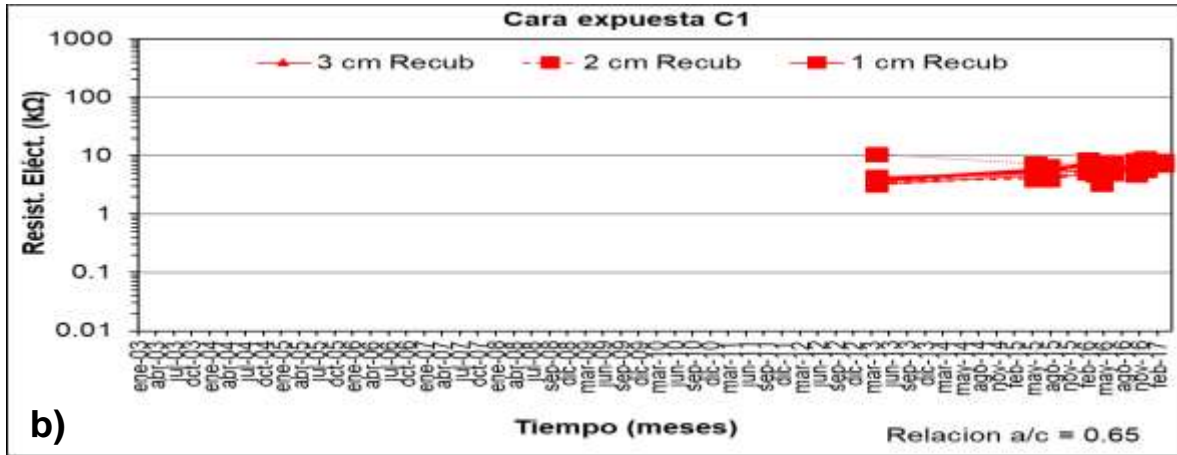


Figura B.8.3 Resistencia eléctrica vs. tiempo para: a) C1 Relación a/c: 0.45; b) C2 Relación a/c: 0.45; c) C1 Relación a/c: 0.45, y d) C2 Relación a/c: 0

Anexo C. Correlación I_{corr} vs. E_{corr}

Anexo C.1 Estación Mexicali (Mx10)

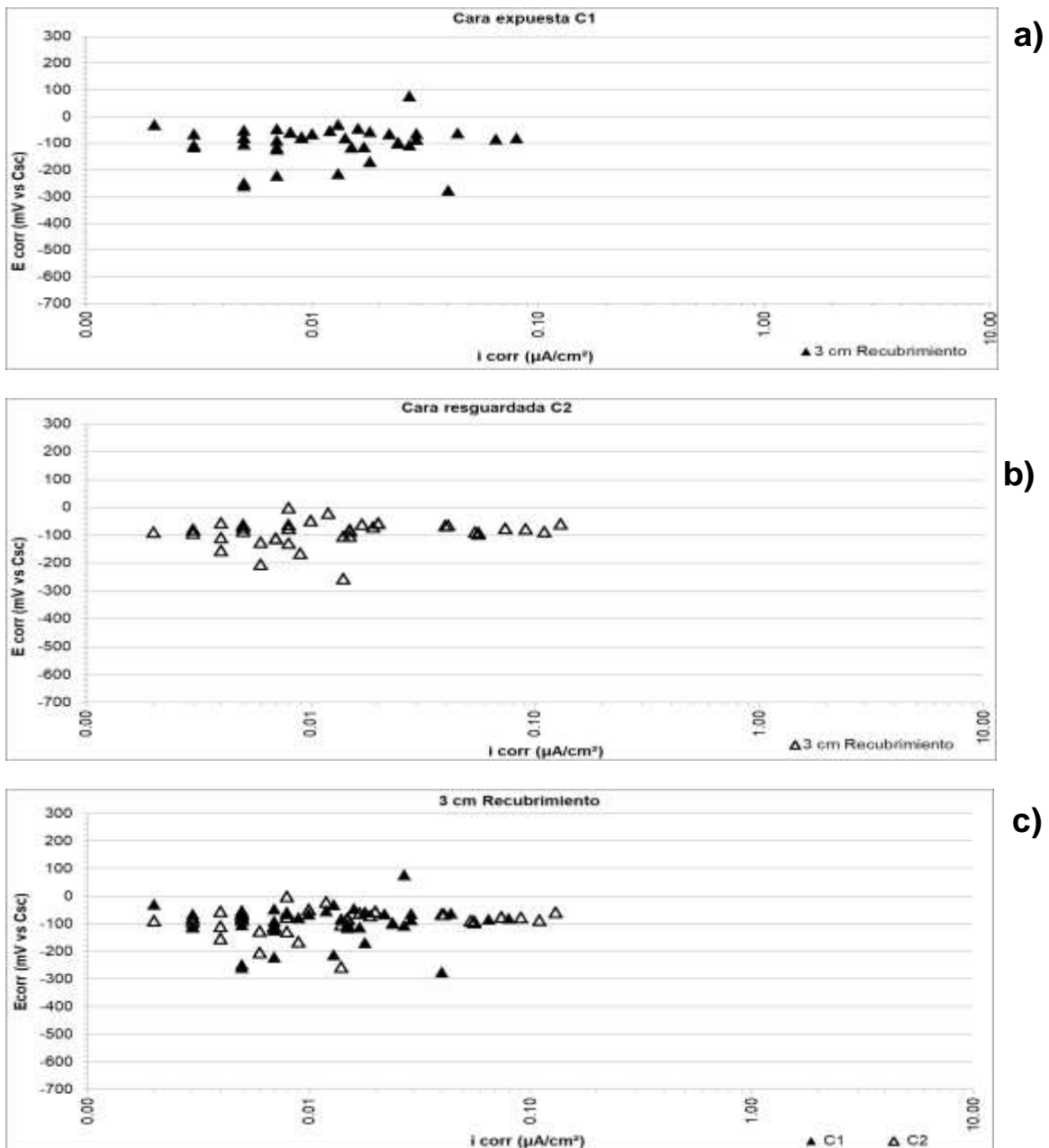


Figura C.1.1 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

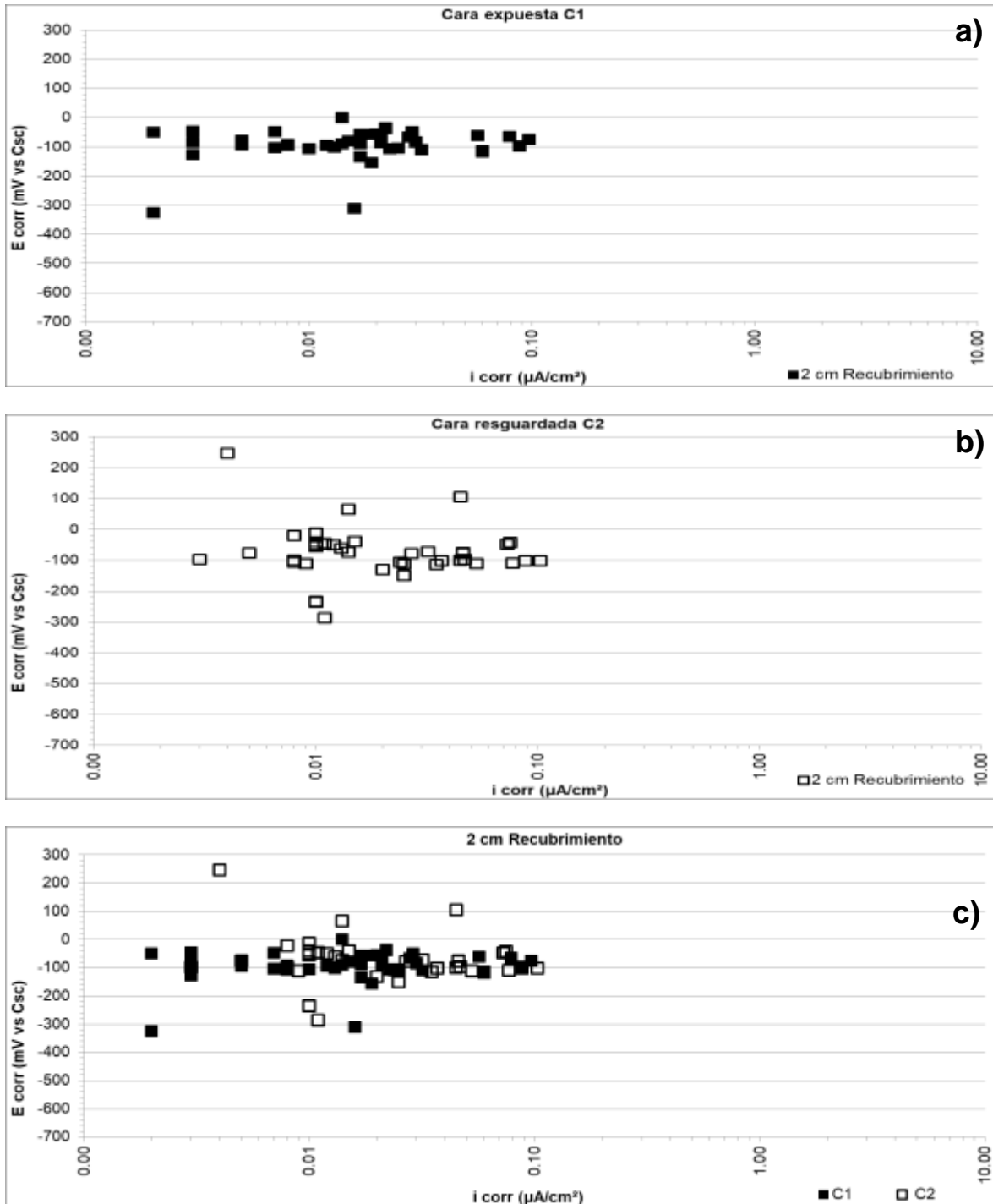


Figura C.1.2 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para corrosión para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

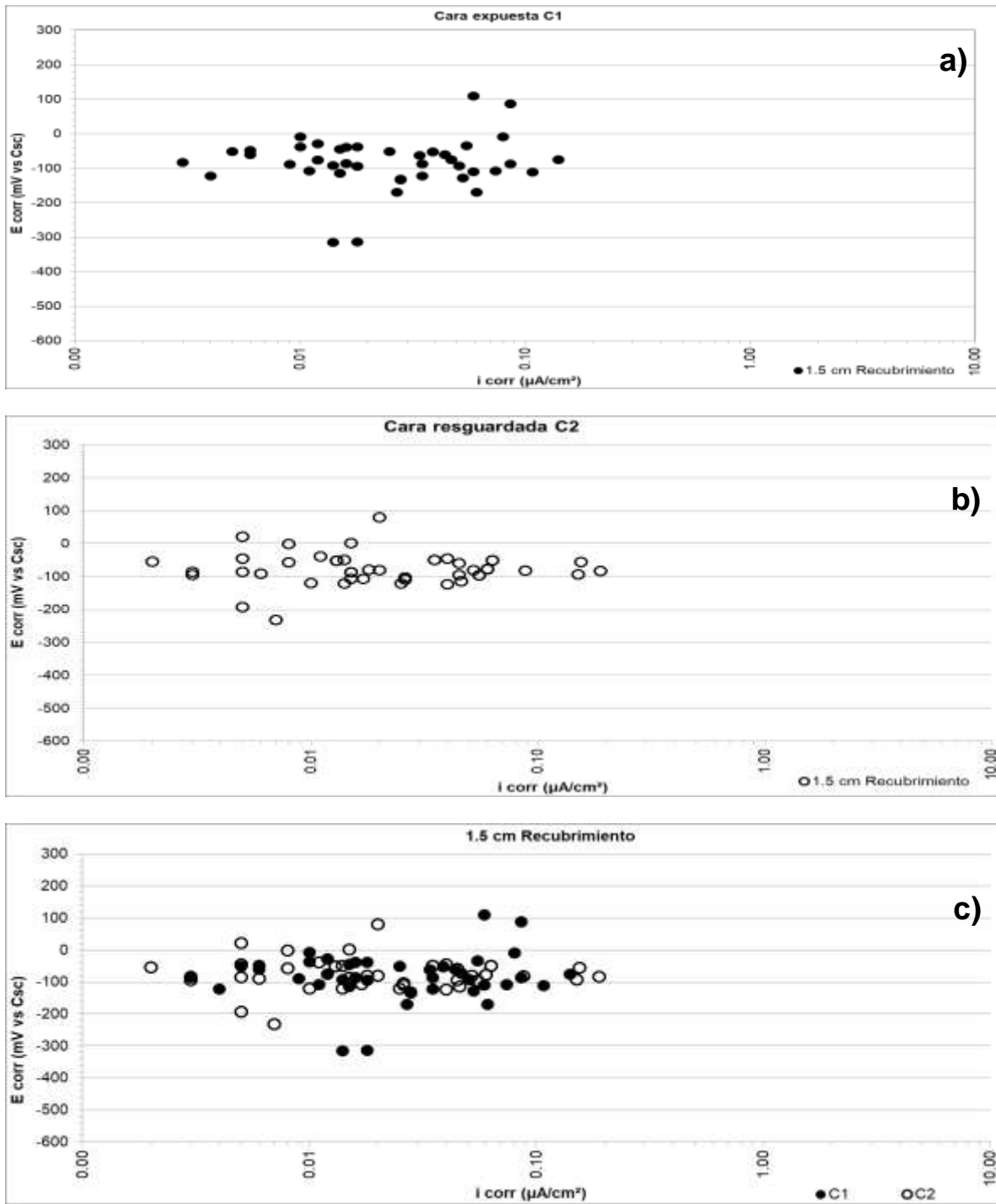


Figura C.1.3 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

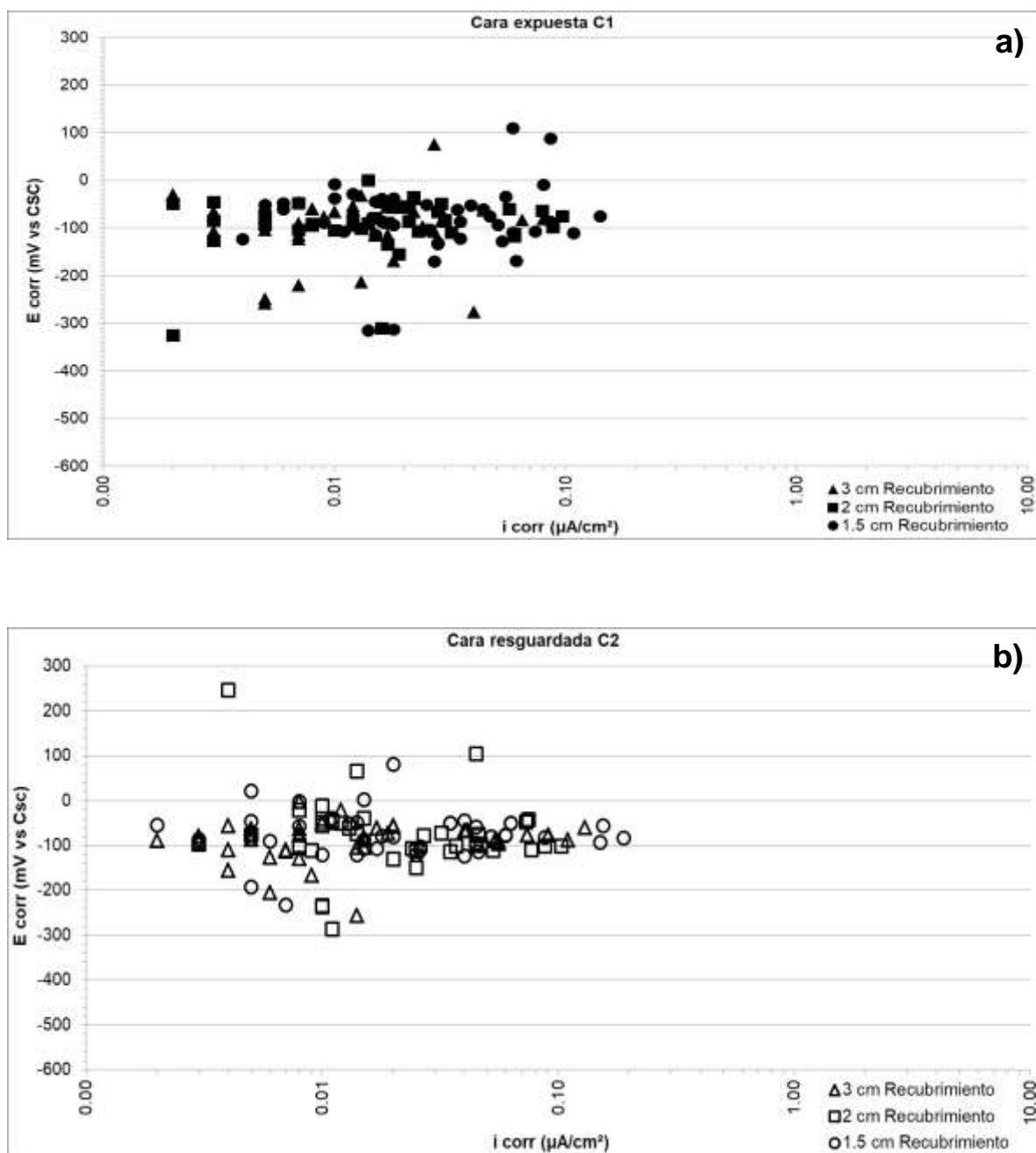


Figura C.1.4 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

Anexo C.2 Estación México (Mx7)

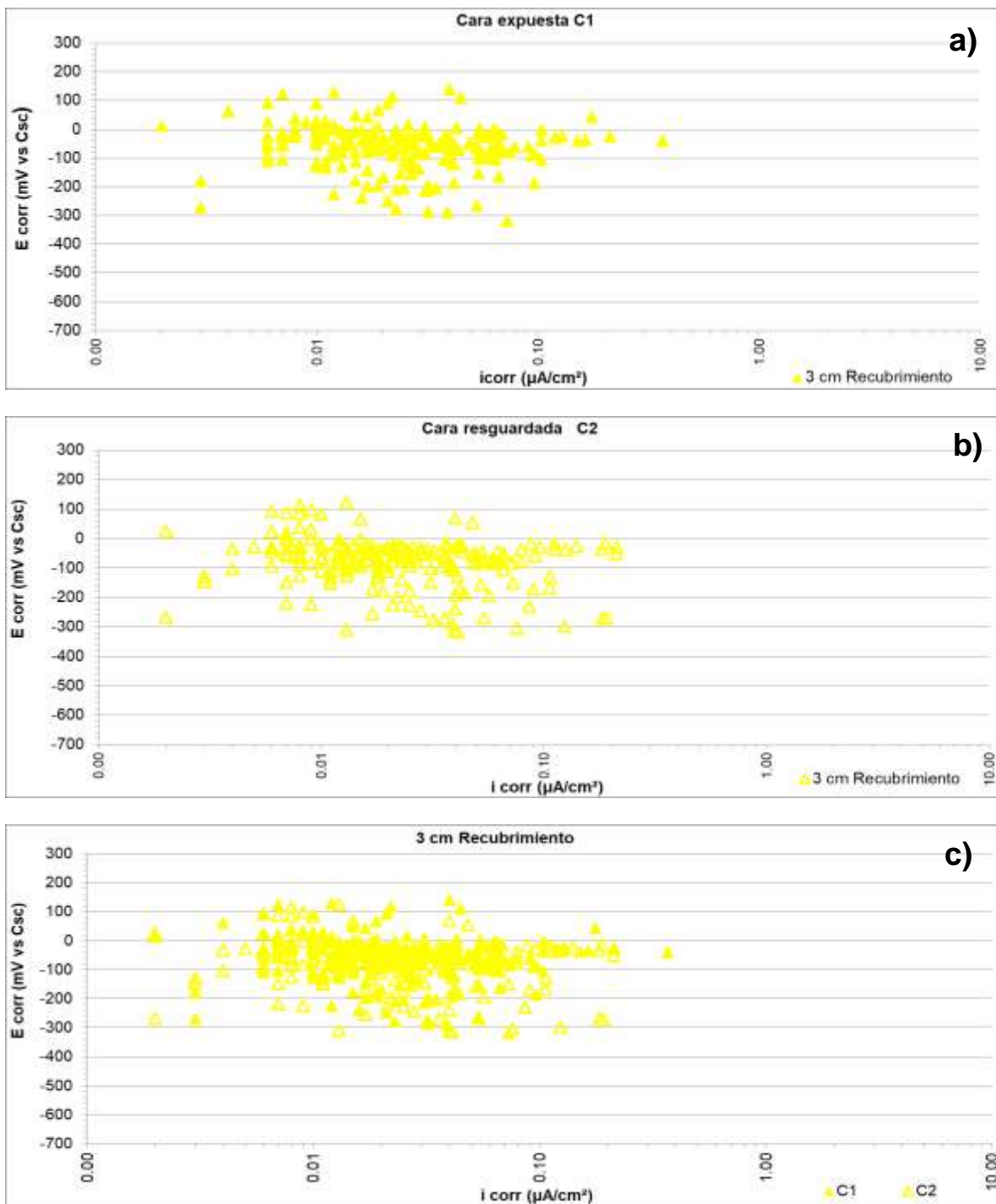


Figura C.2.1 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

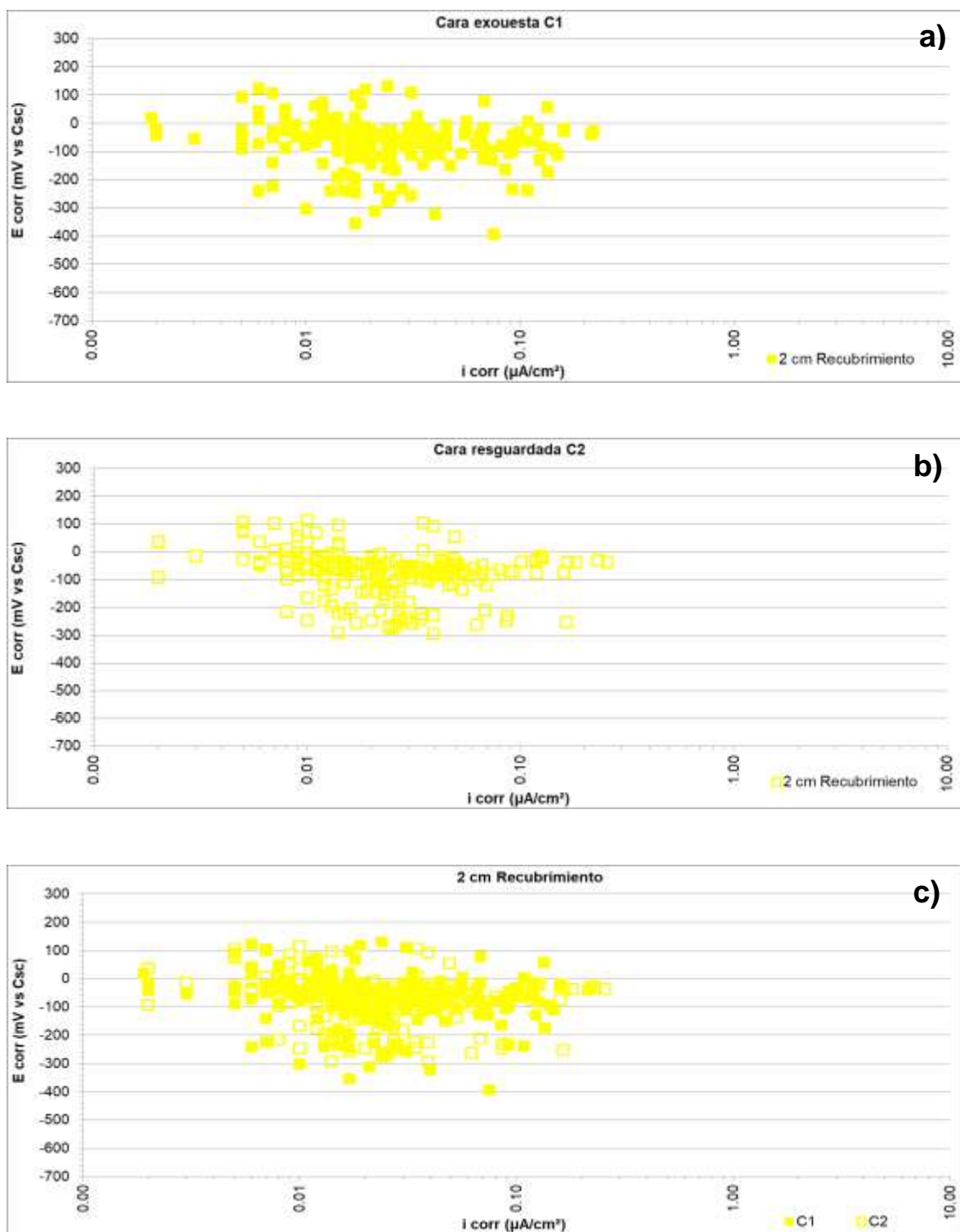


Figura C.2.2 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

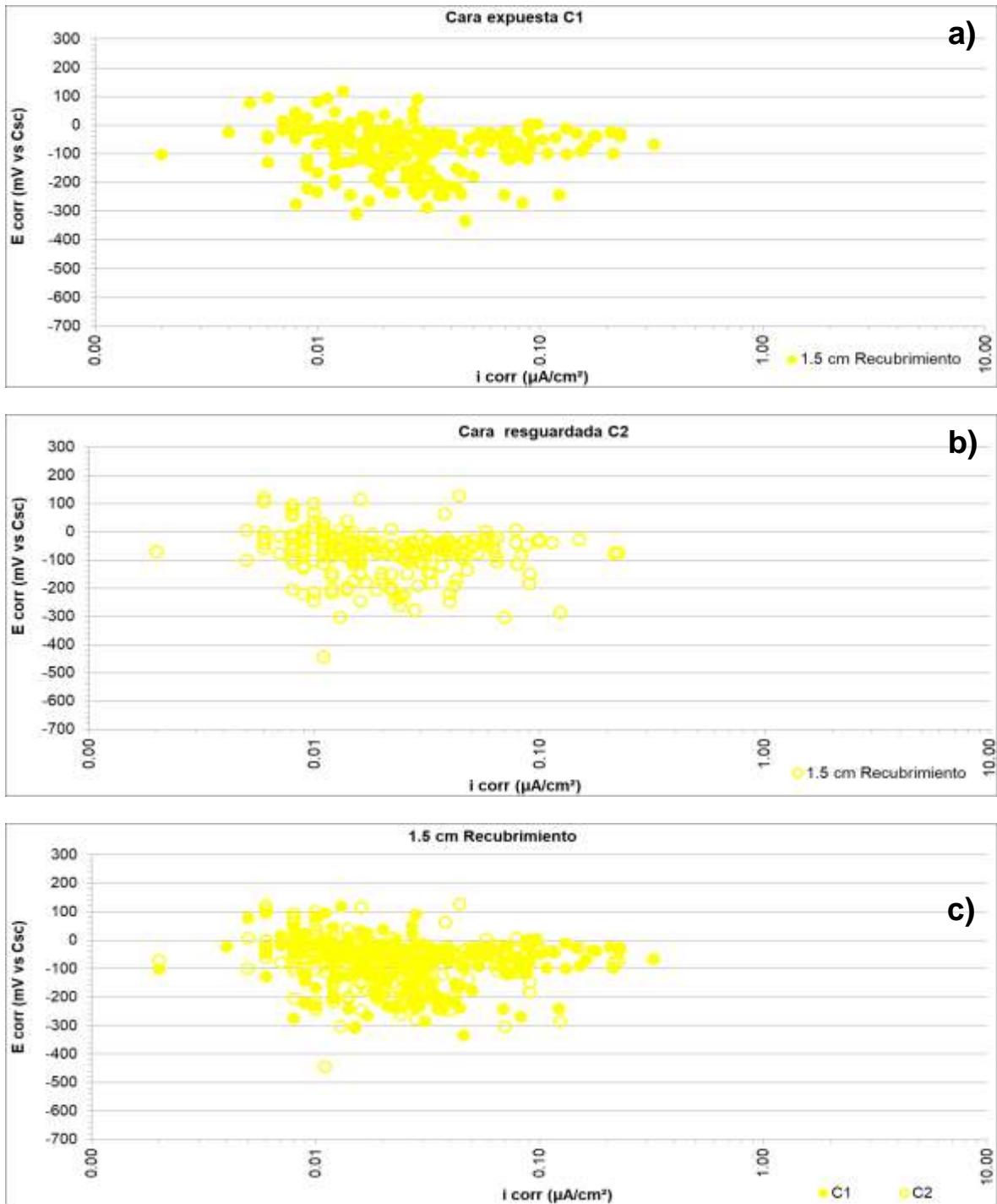


Figura C.2.3 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

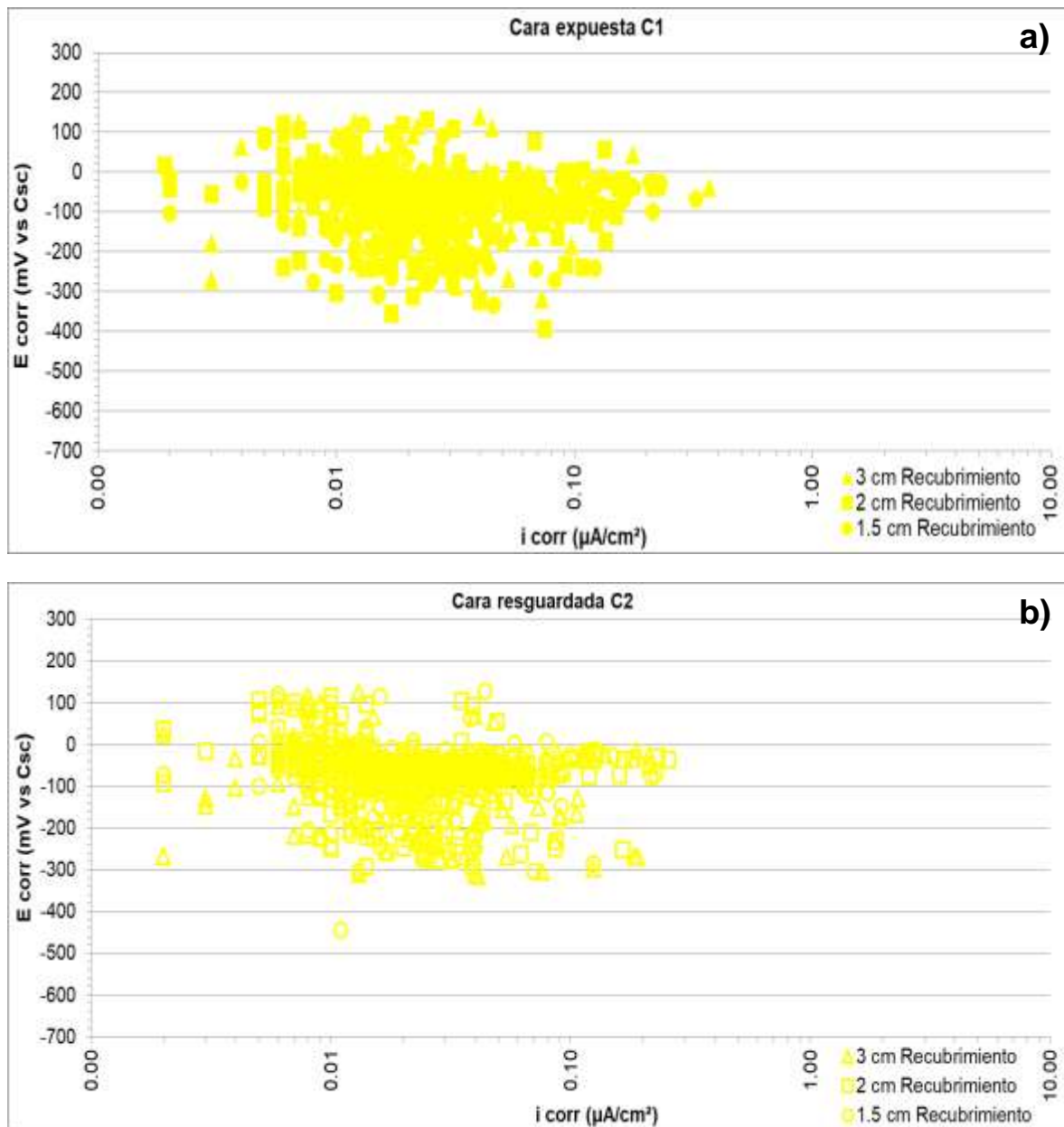


Figura C.2.4 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

Anexo C.3 Estación Morelia (Mx5)

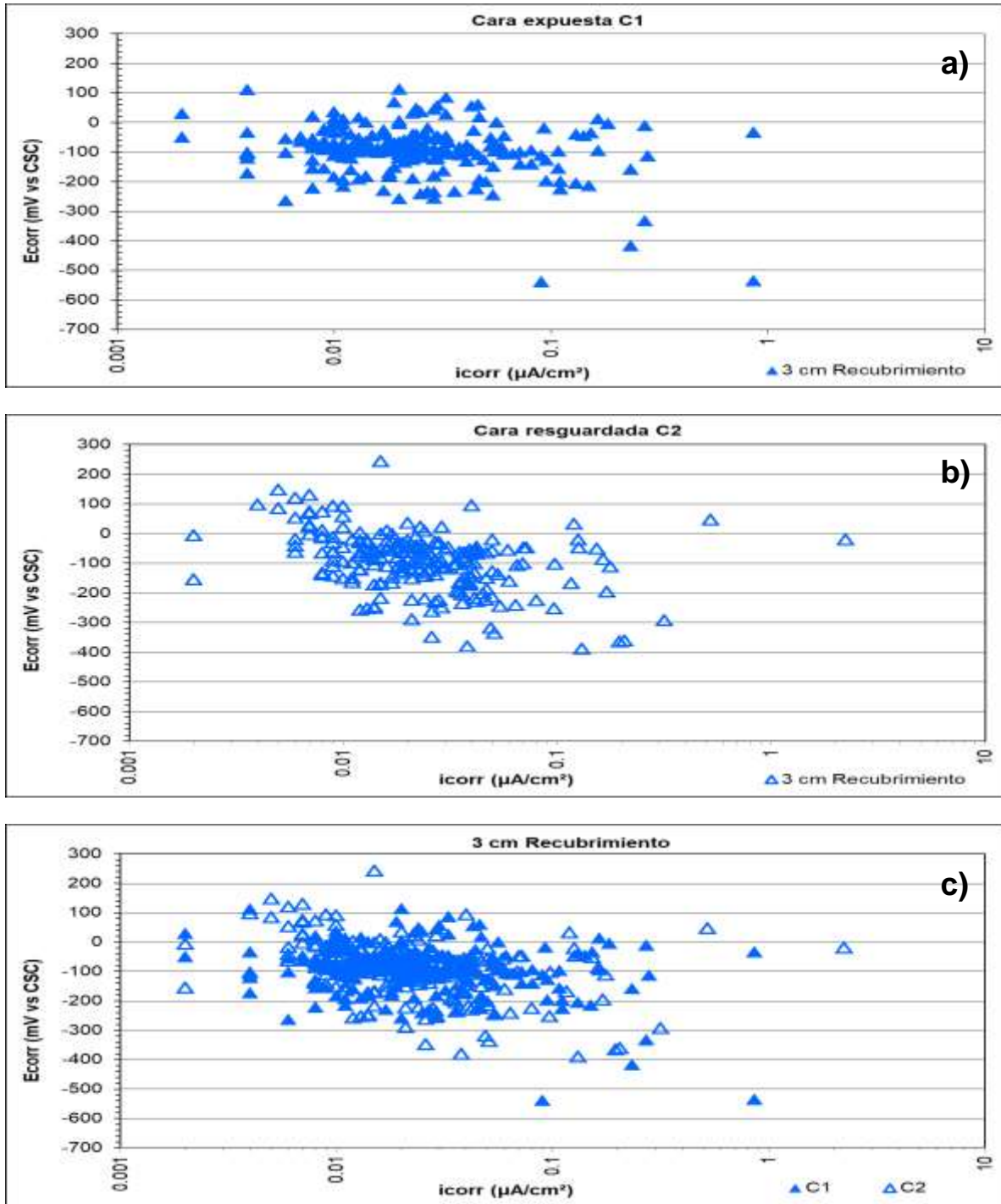


Figura C.3.1 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

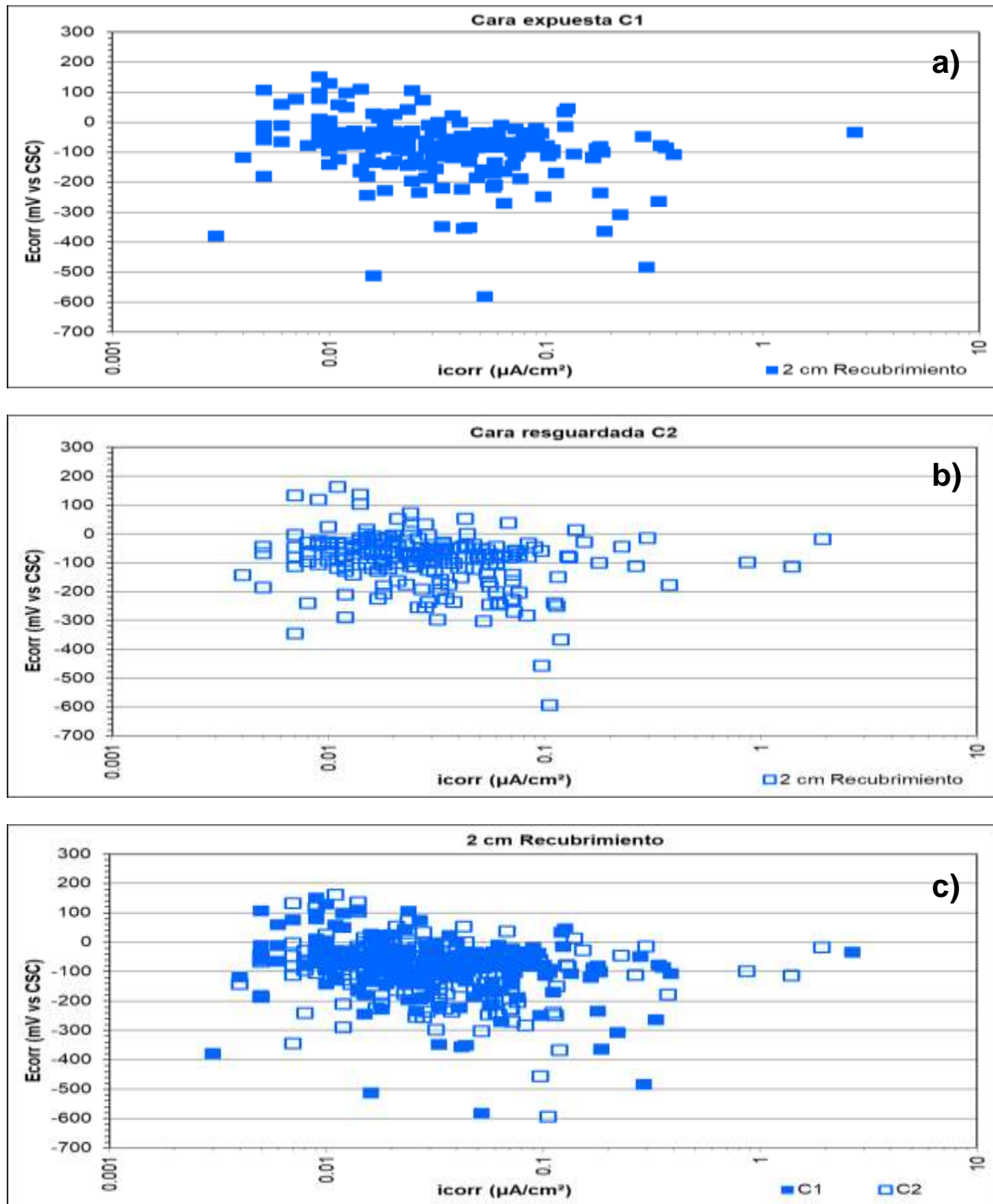


Figura C.3.2 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para corrosión para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

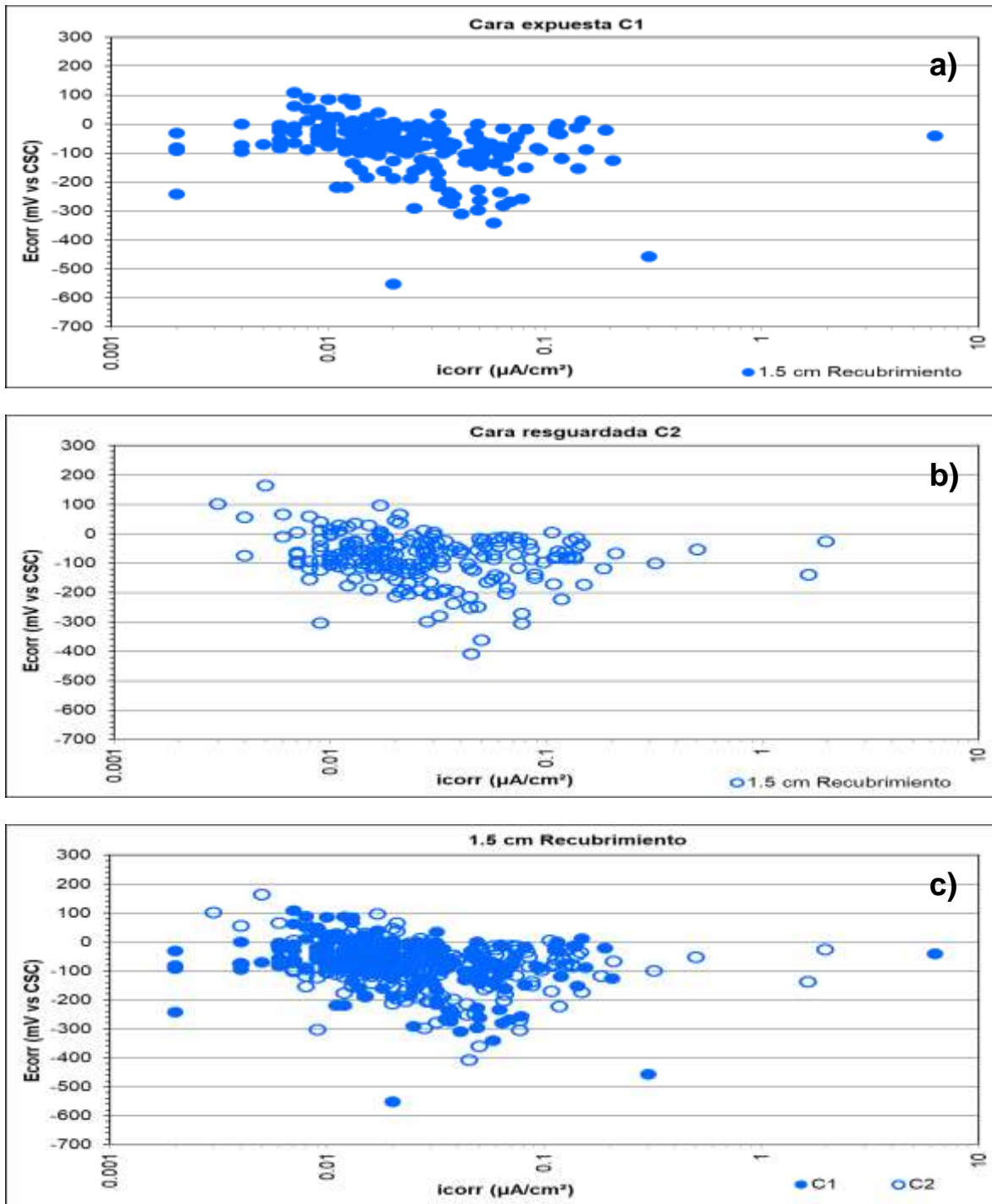


Figura C.3.3 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

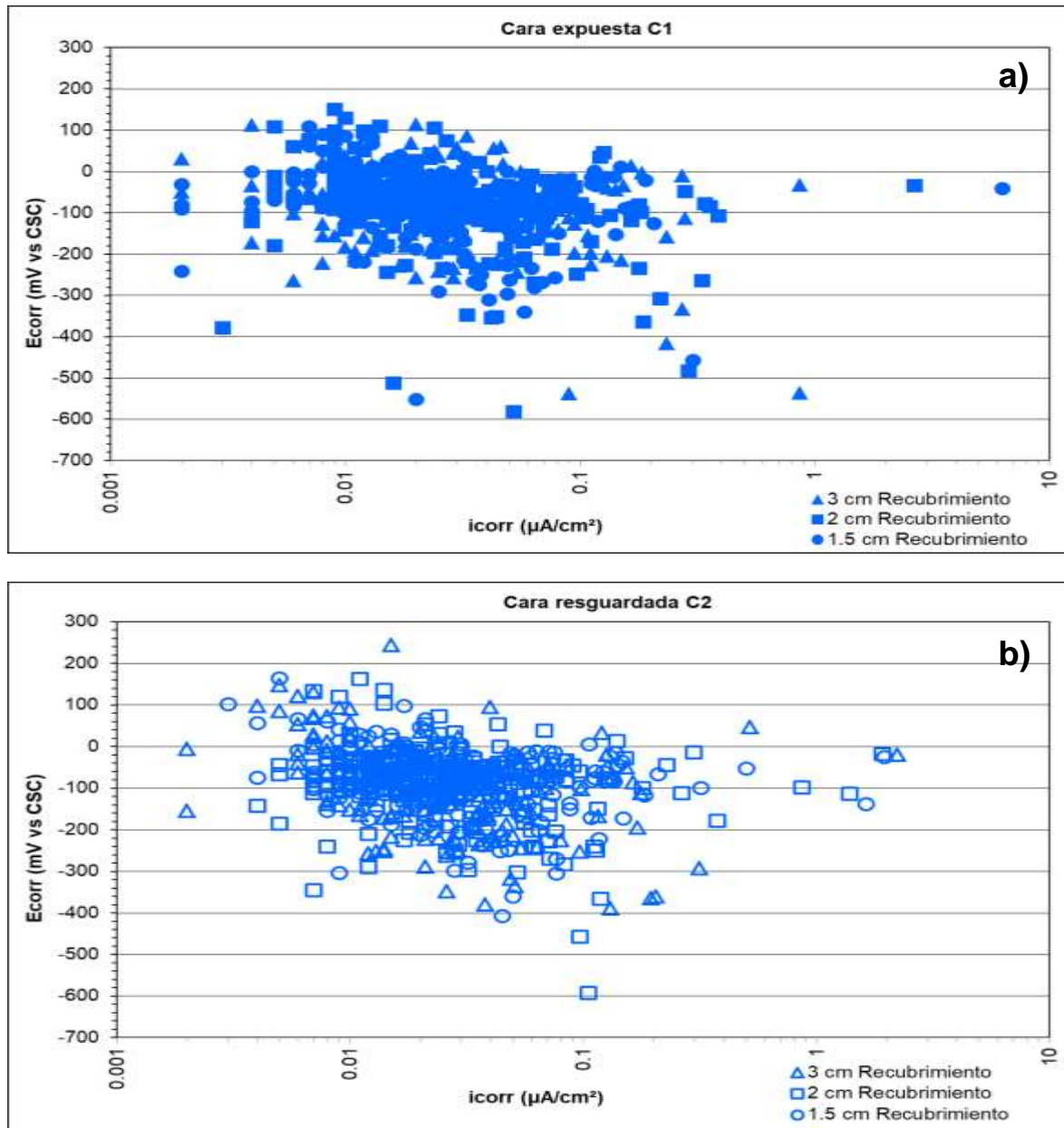


Figura C.3.4 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

Anexo C.4 Estación Oaxaca (Mx4)

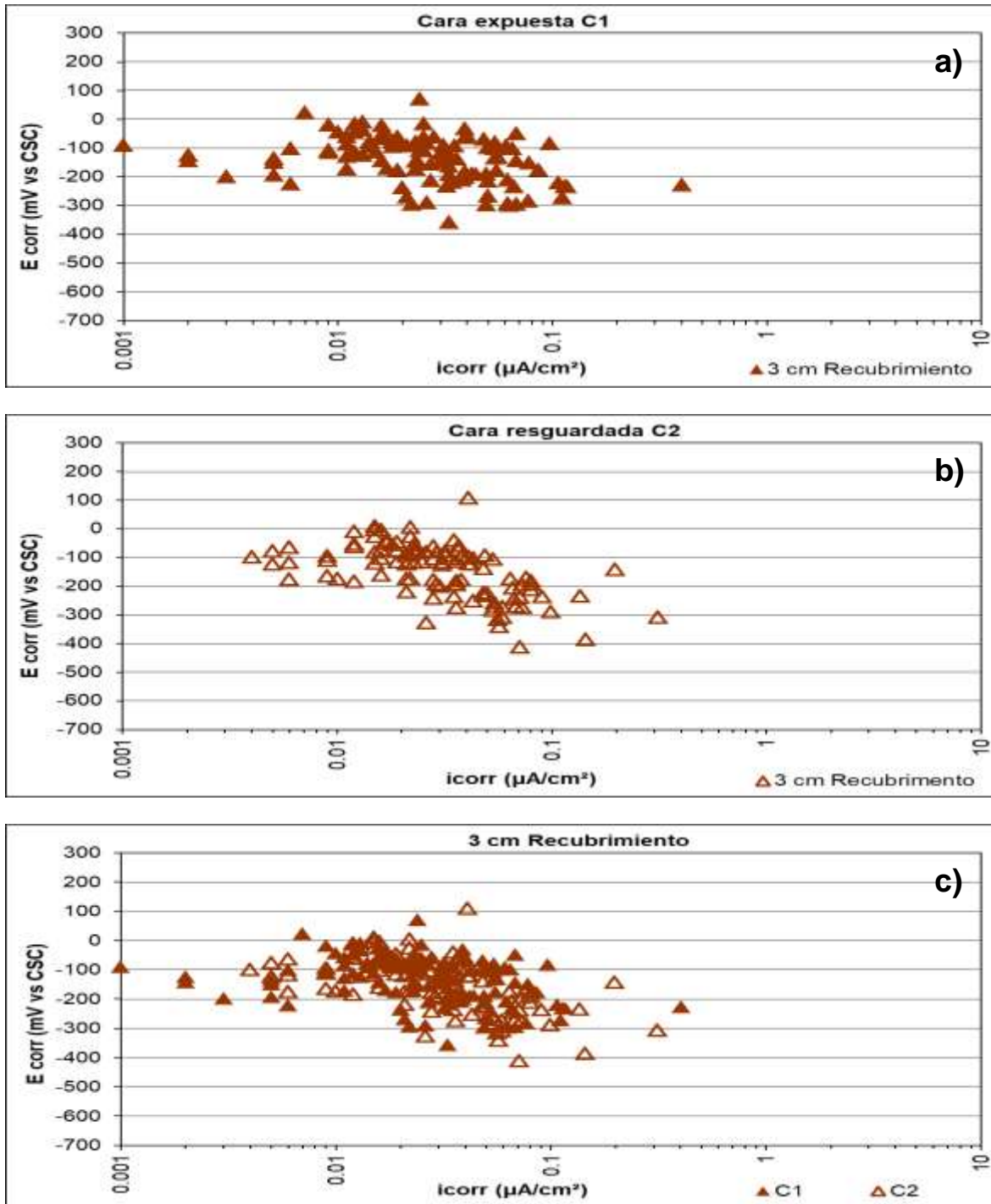


Figura C.4.1 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

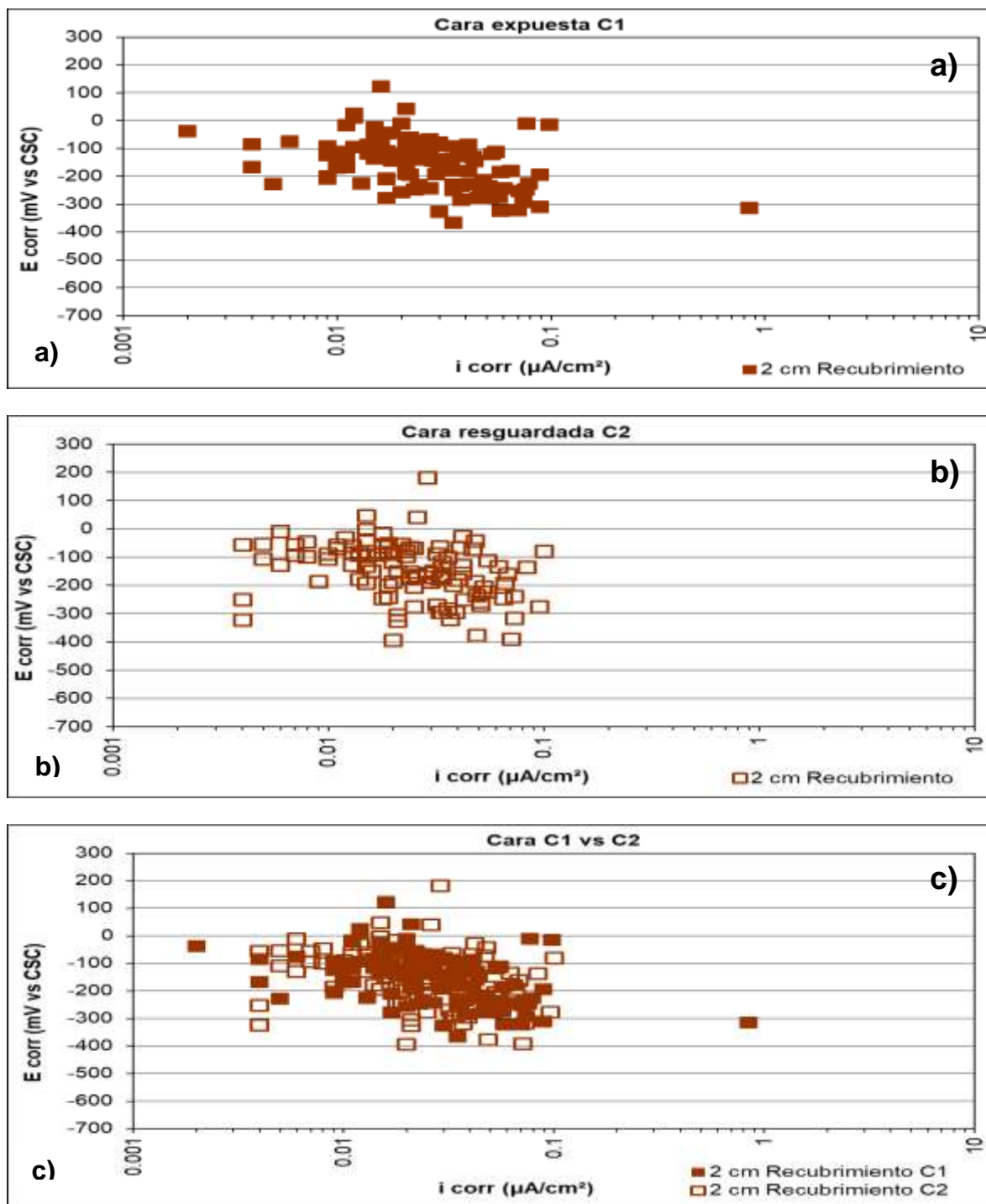


Figura C.4.2 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

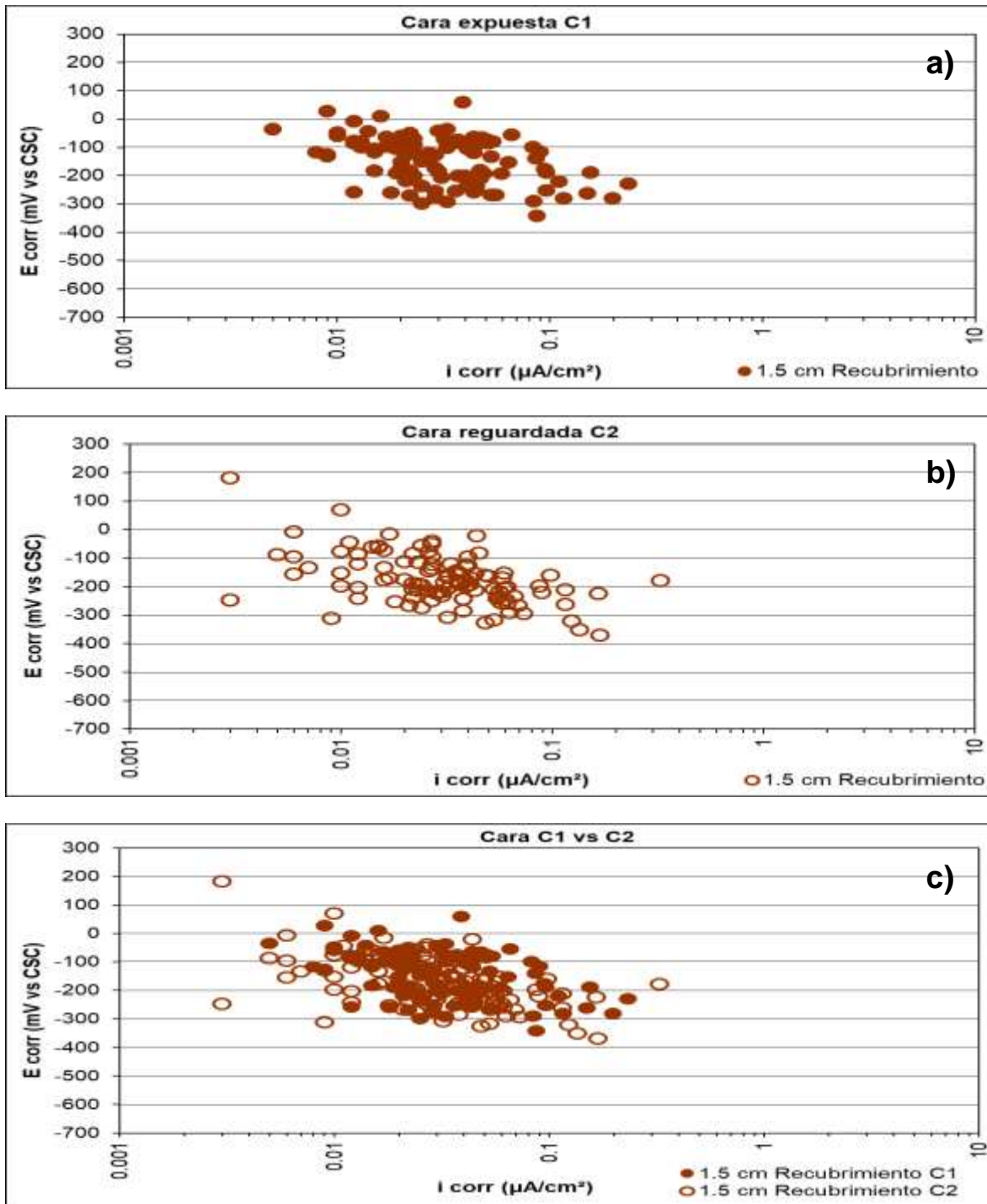


Figura C.4.3 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para corrosión para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara reguardada C2, y c) C1 vs. C2.

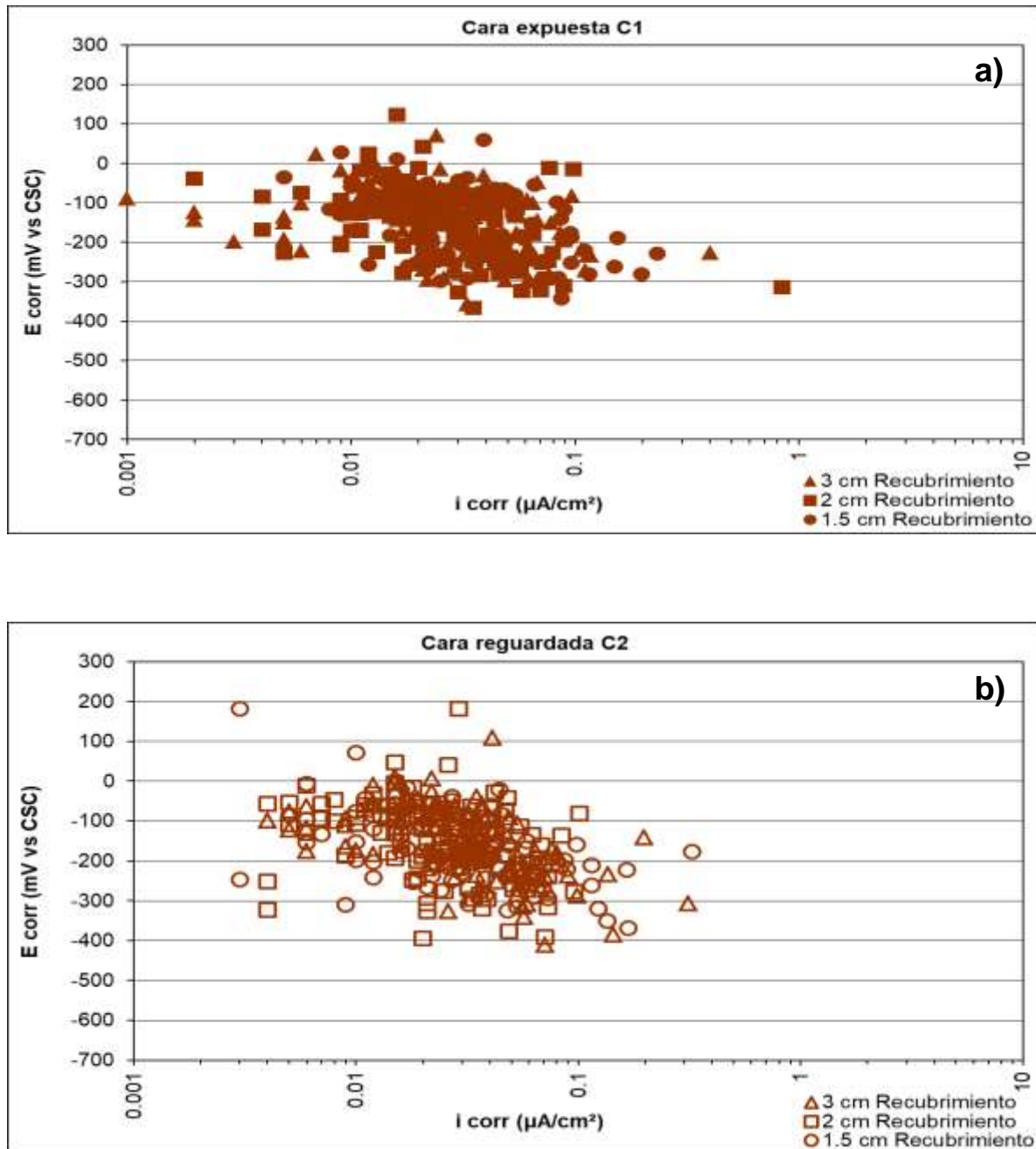


Figura C.4.4 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

Anexo C.5 Estación Progreso (Mx2)

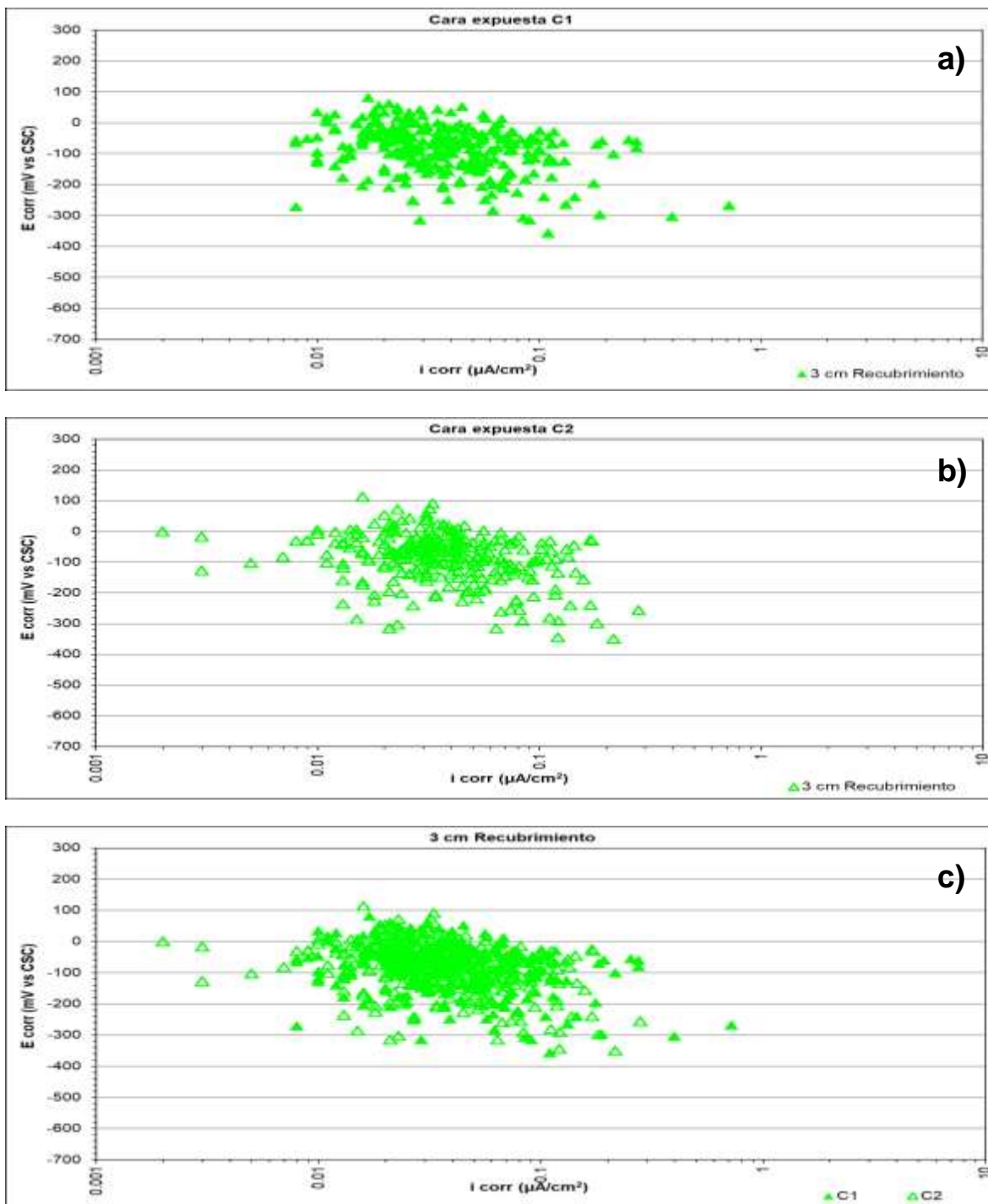


Figura C.5.1 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para corrosión para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

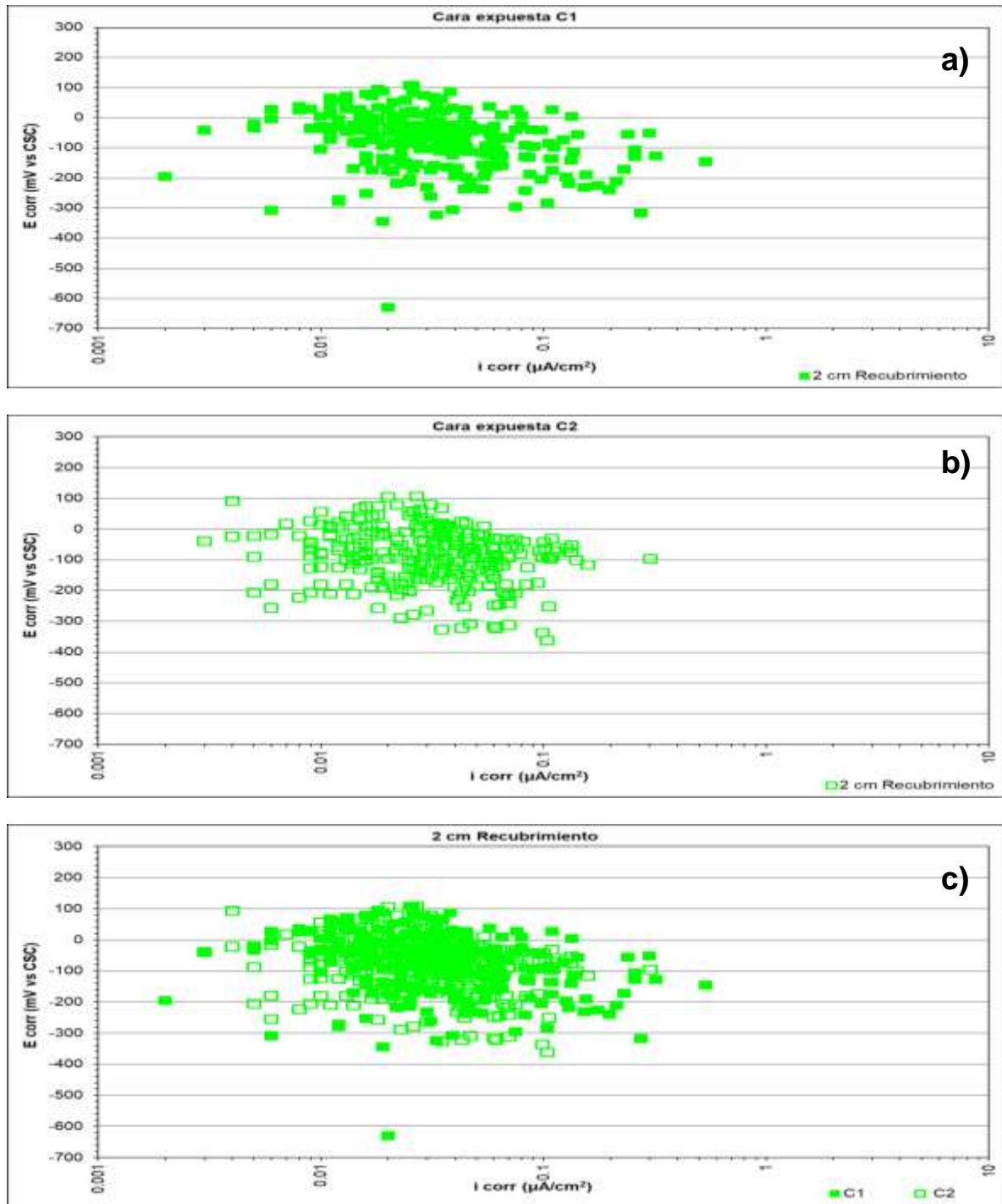


Figura C.5.2 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

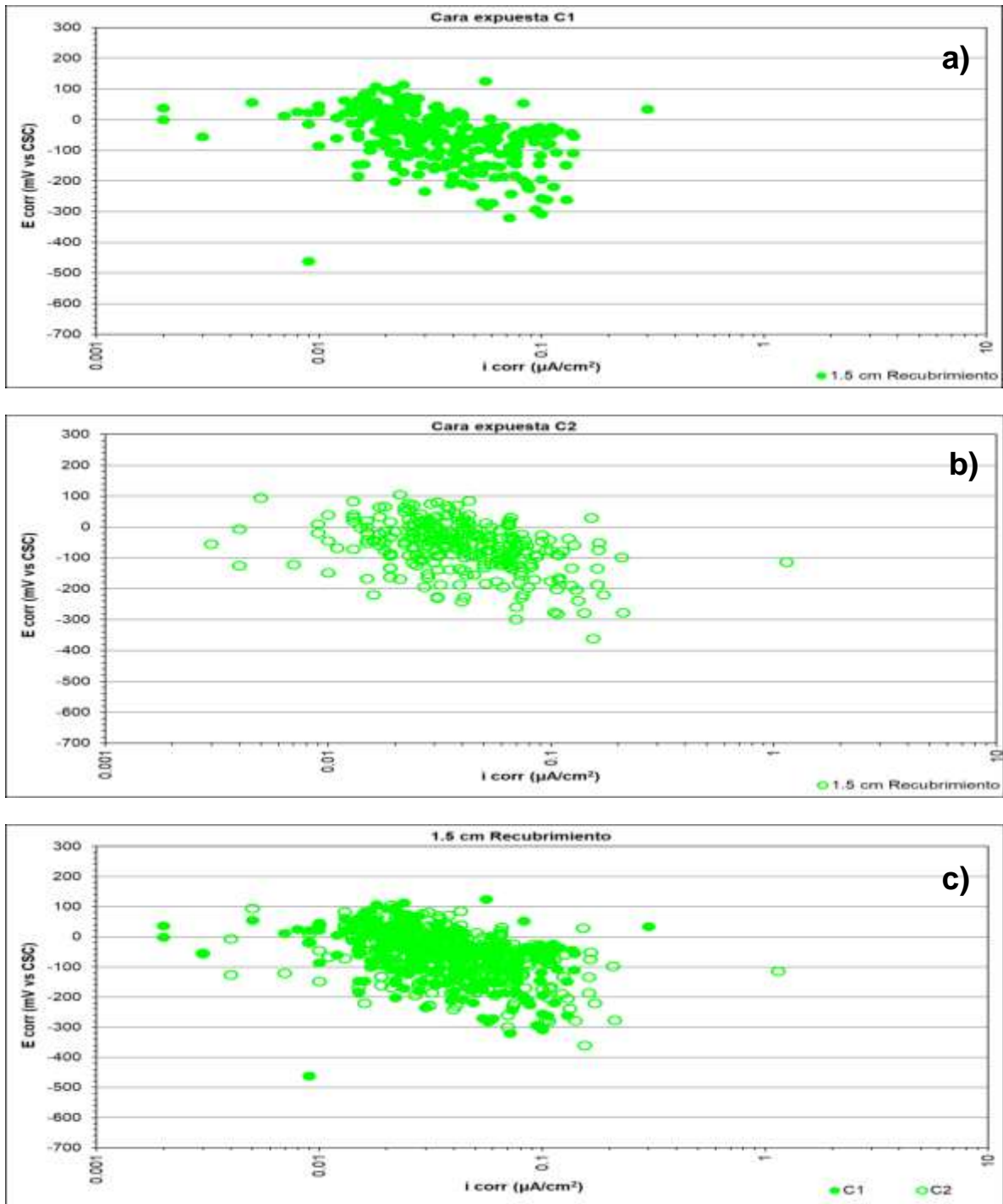


Figura C.5.3 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

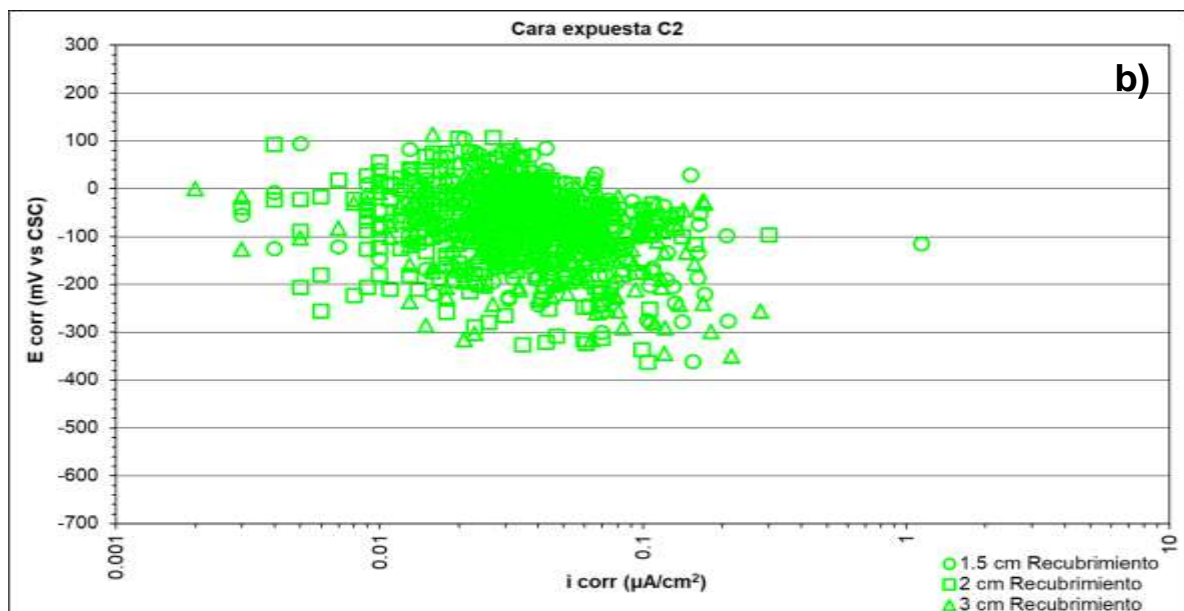
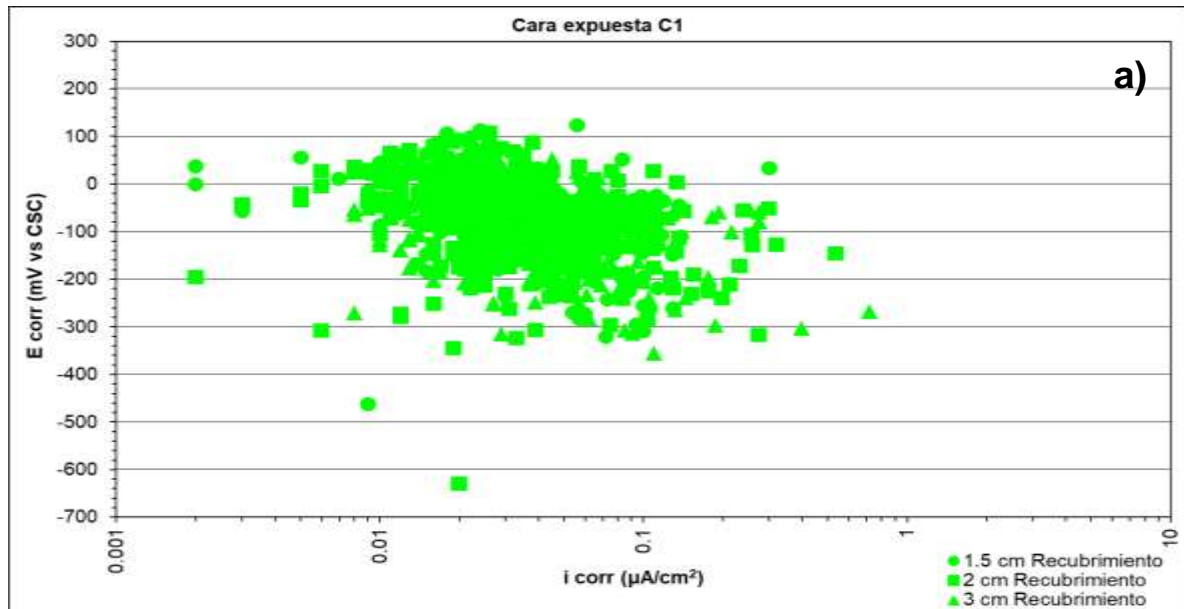


Figura C.5.4 P Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

Anexo C.6 Estación Tampico (Mx15)

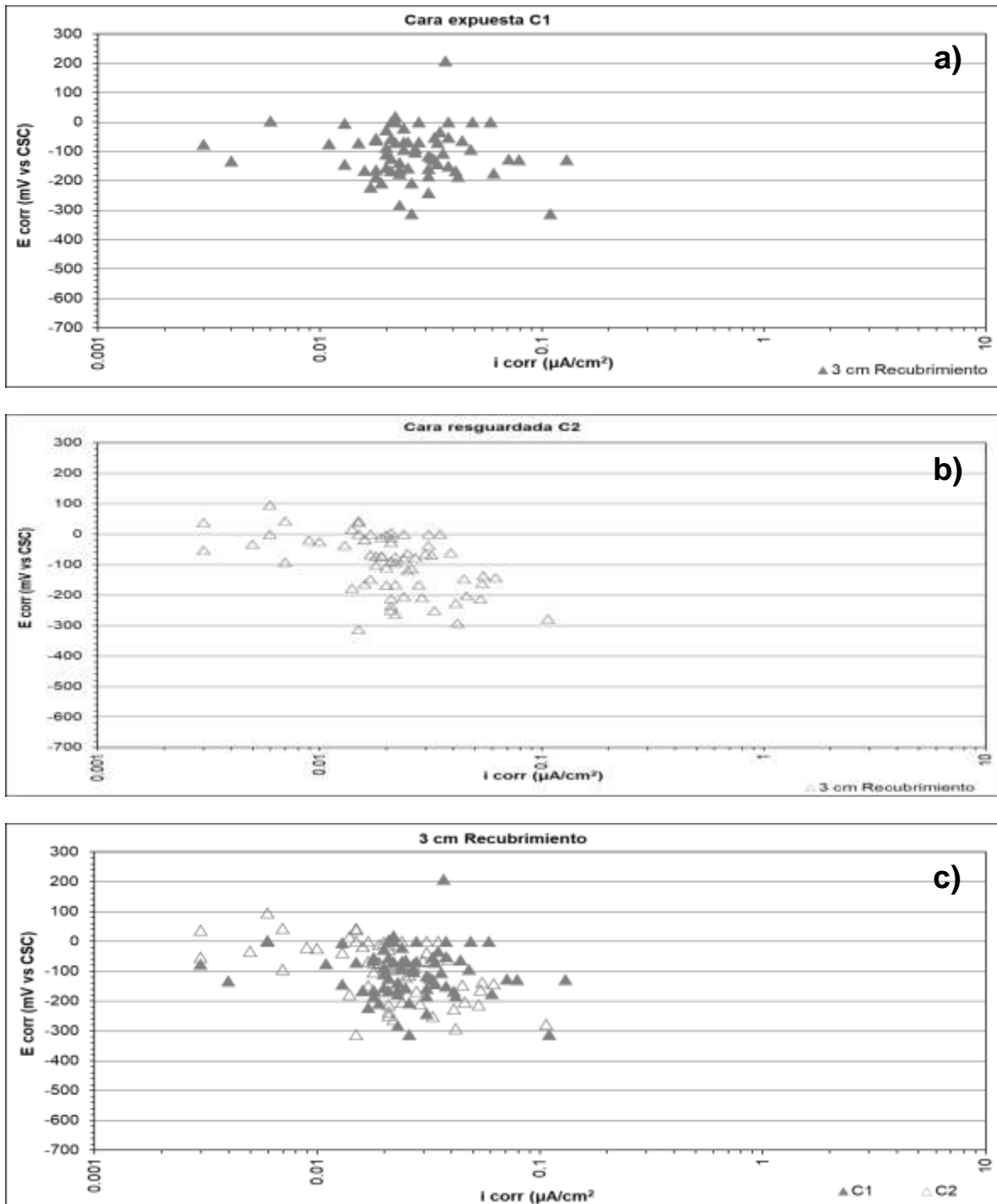


Figura C.6.1 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

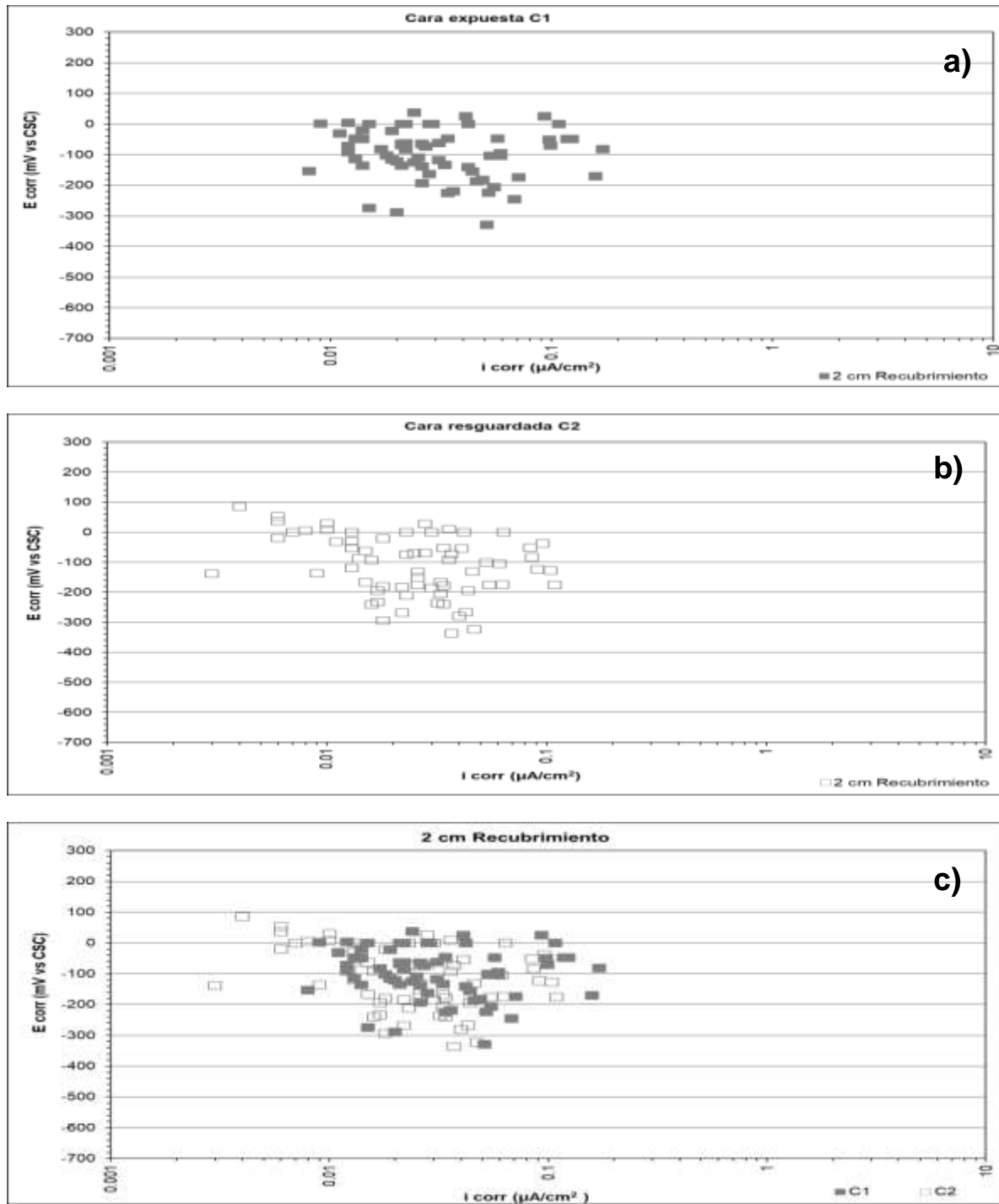


Figura C.6.2 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

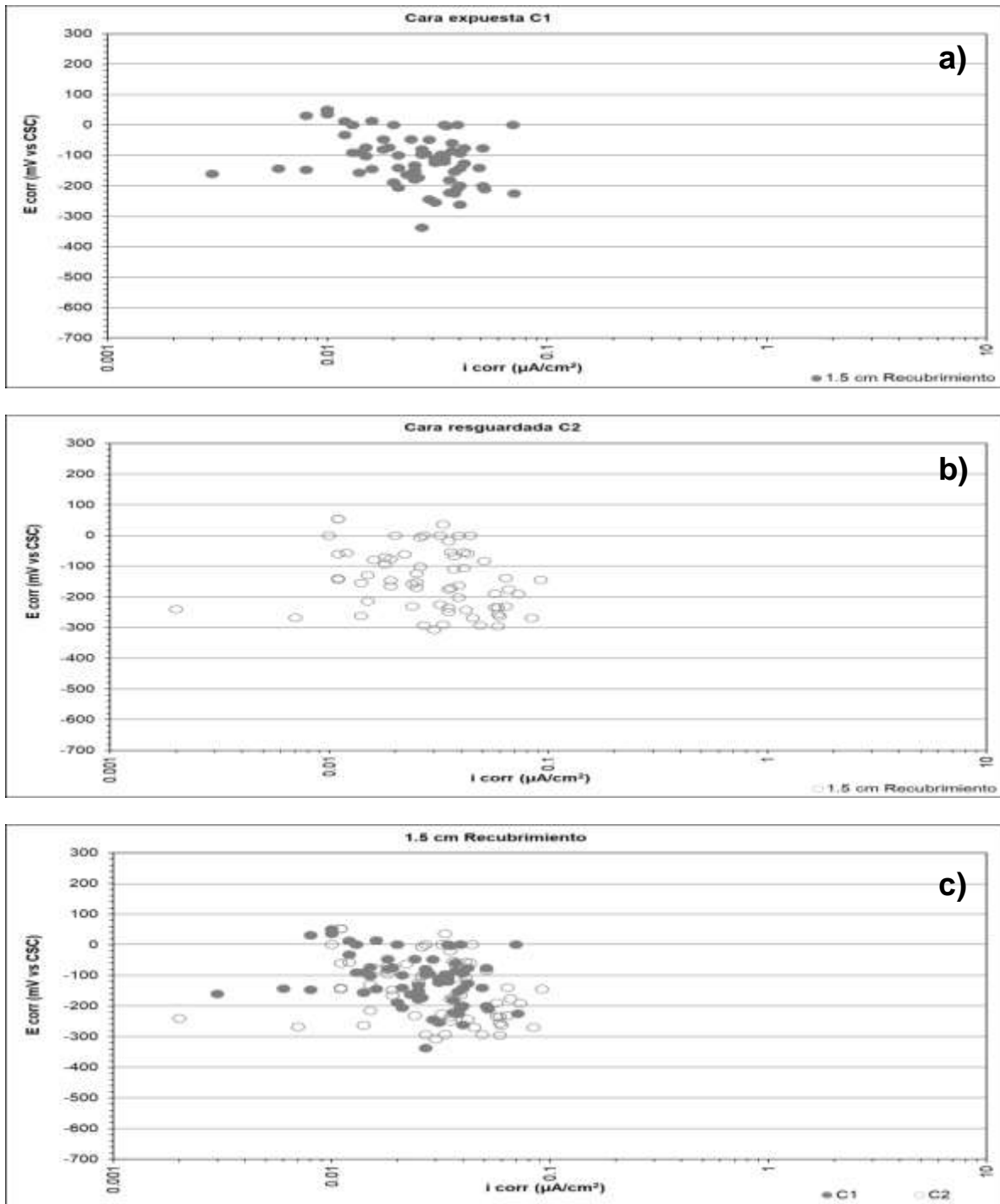


Figura C.6.3 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

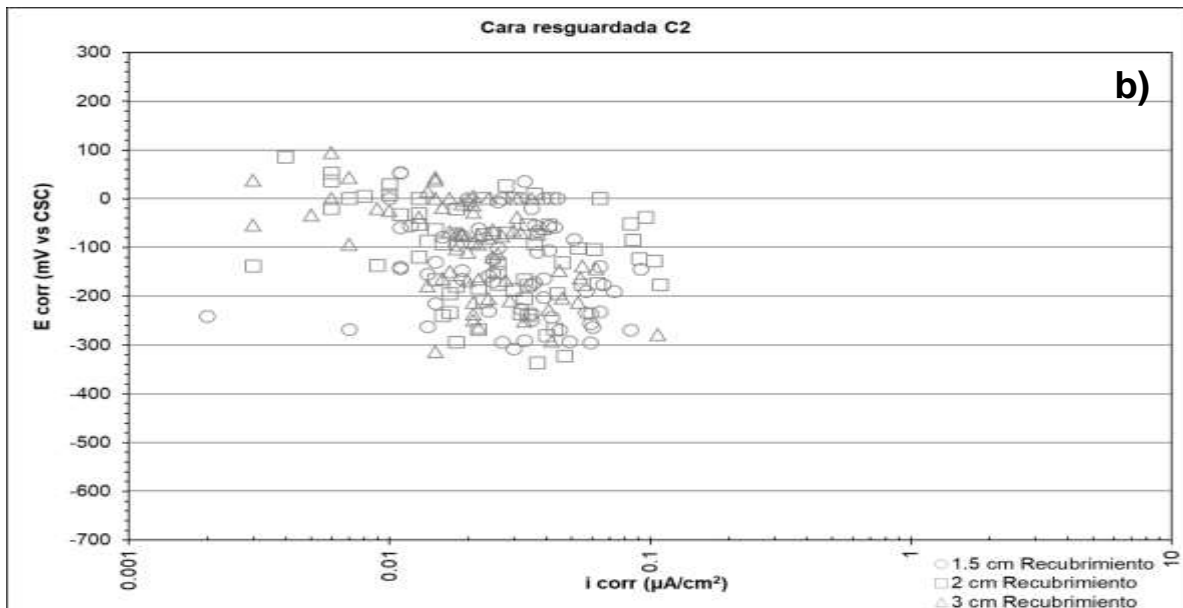
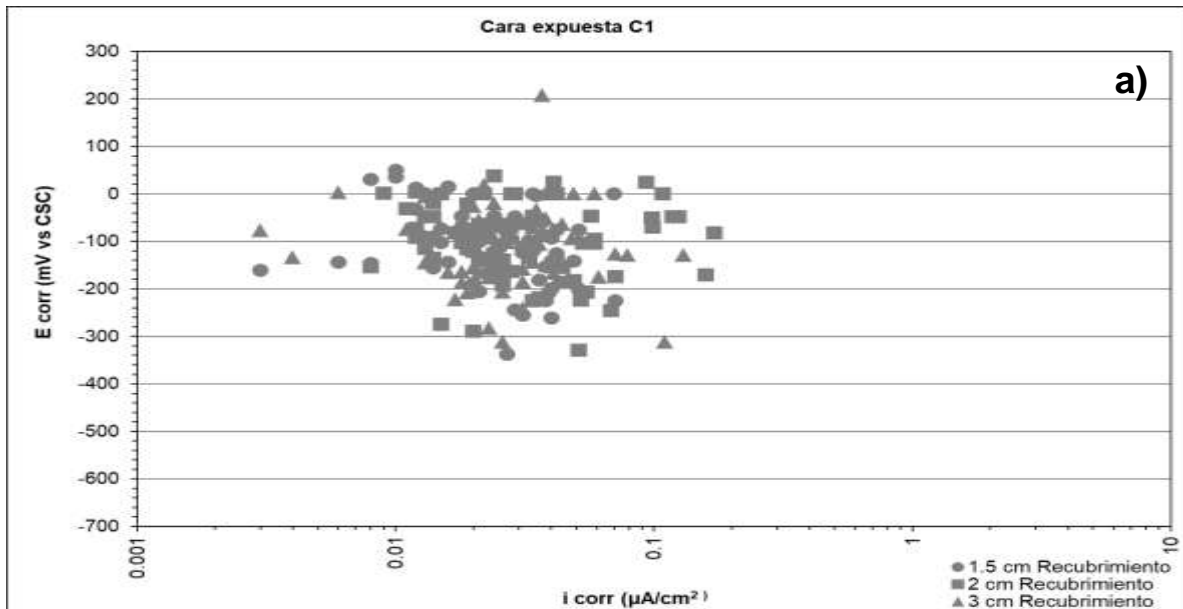


Figura C.6.4 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

Anexo C.7 Estación Toluca (Mx9)

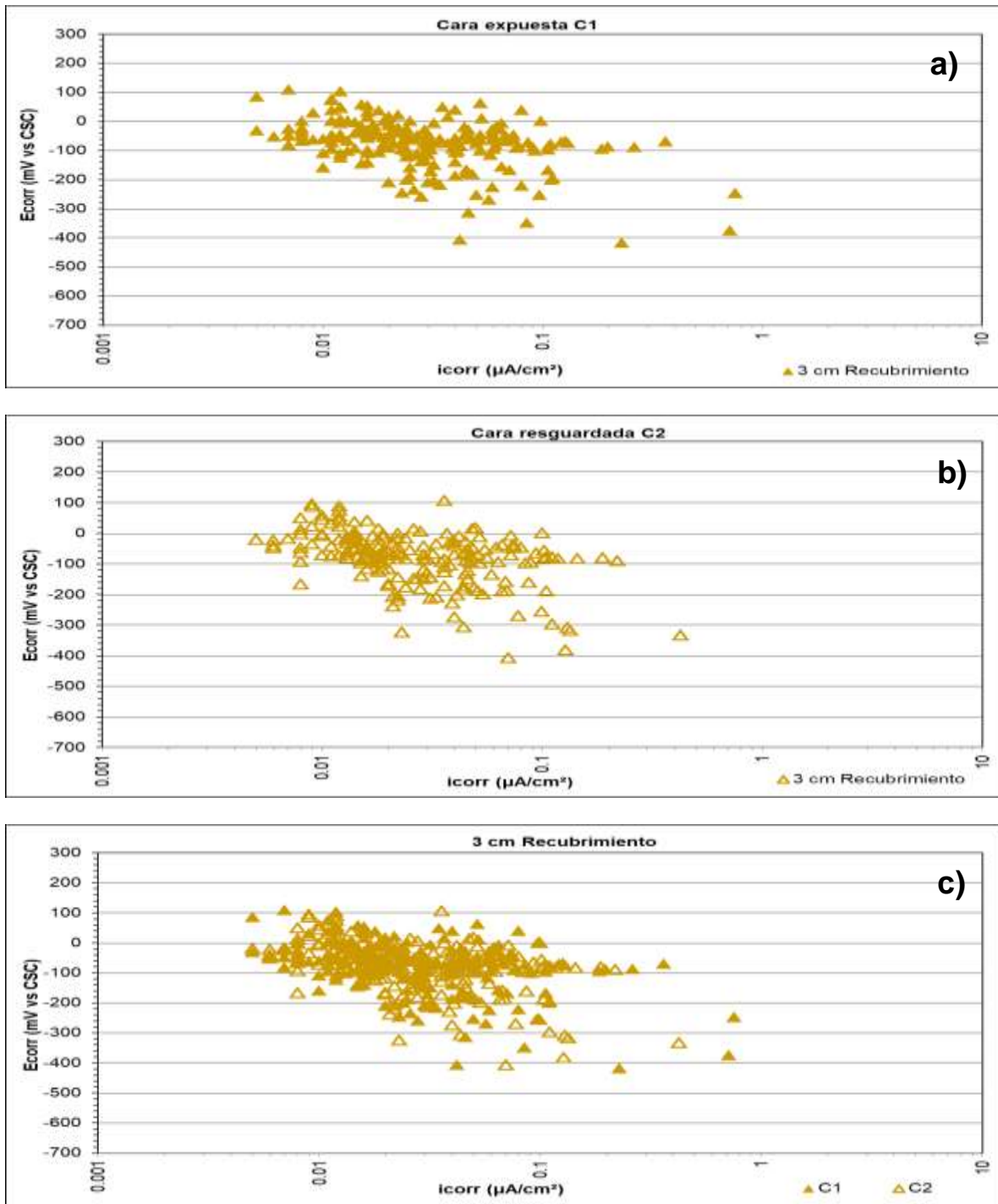


Figura C.7.1 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

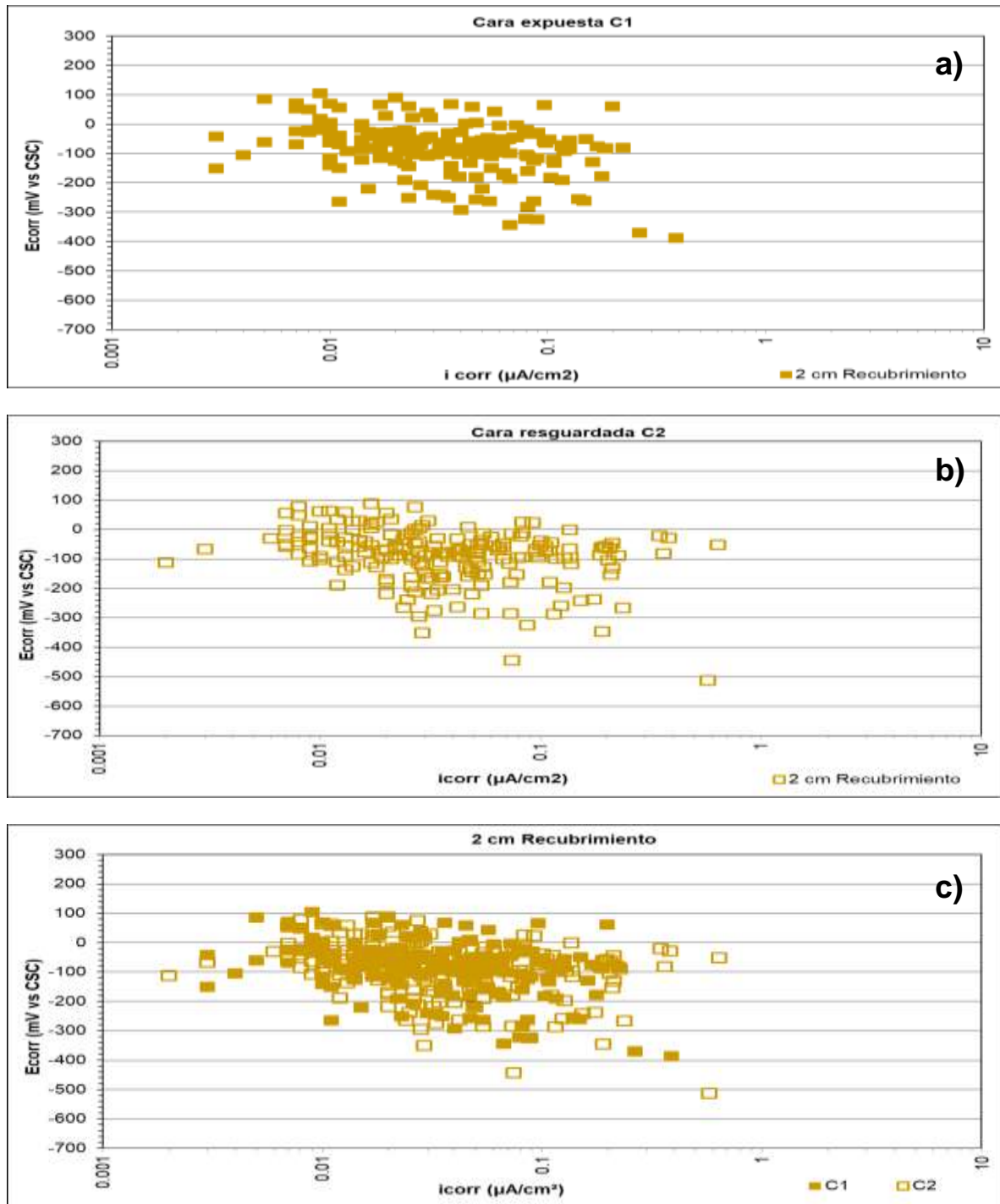


Figura C.7.2 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

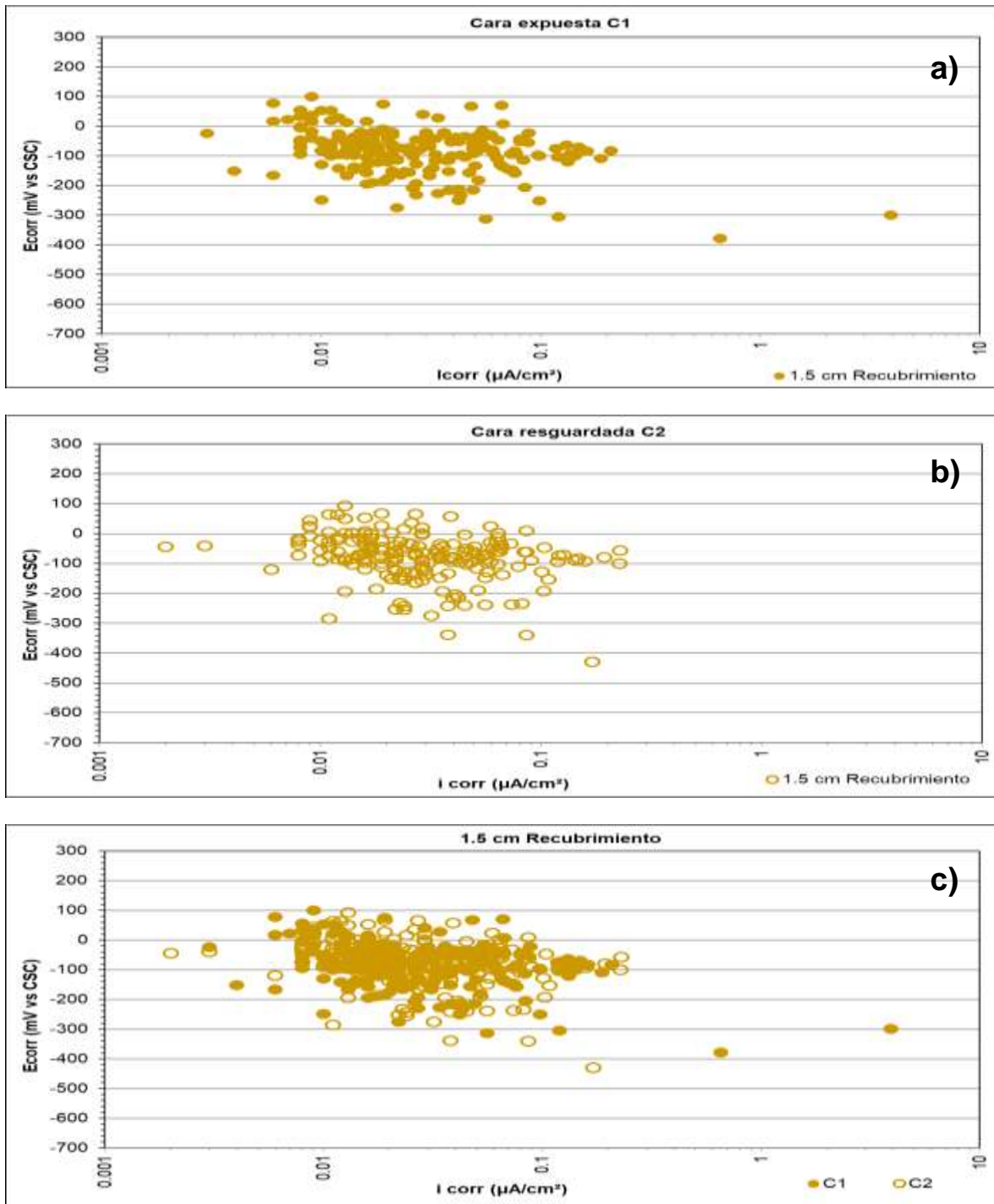


Figura C.7.3 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

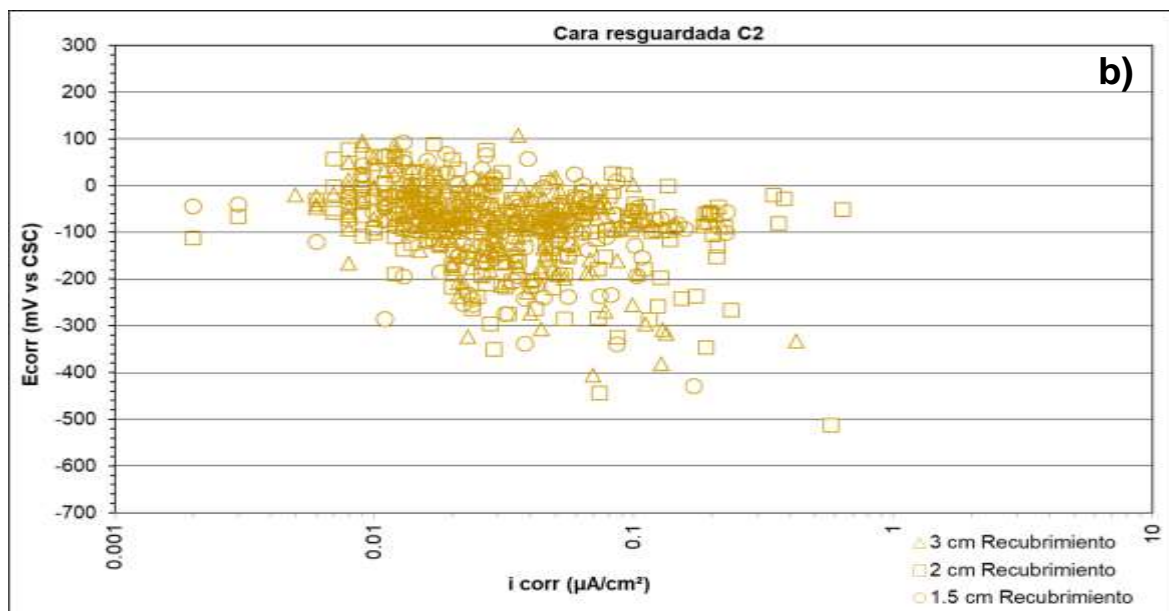
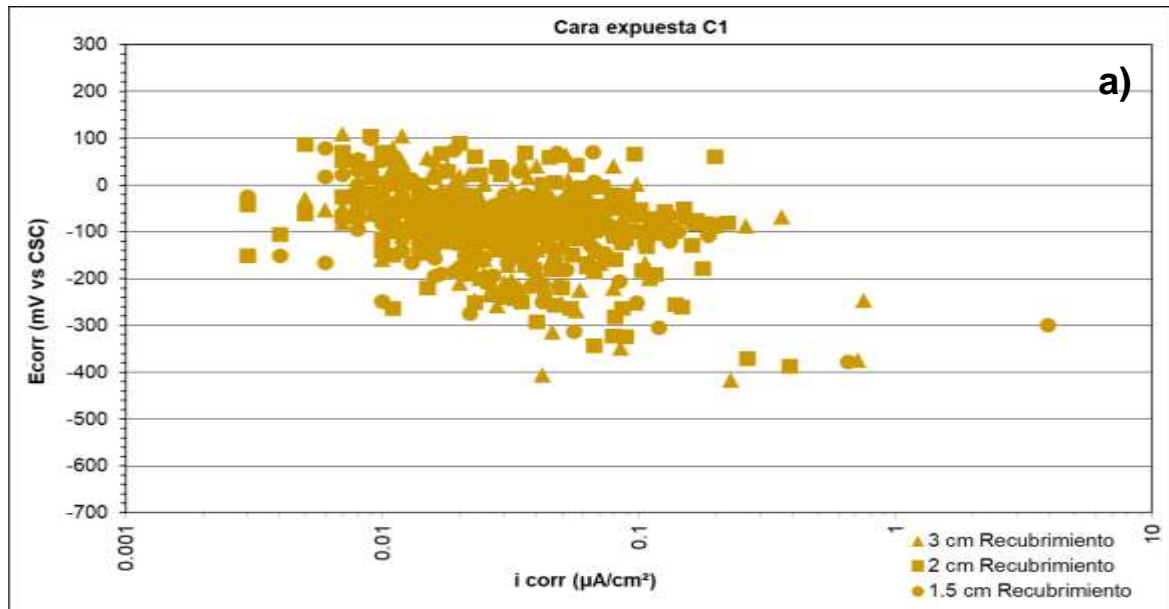


Figura C.7.4 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

Anexo C.8 Estación Xalapa (Mx14)

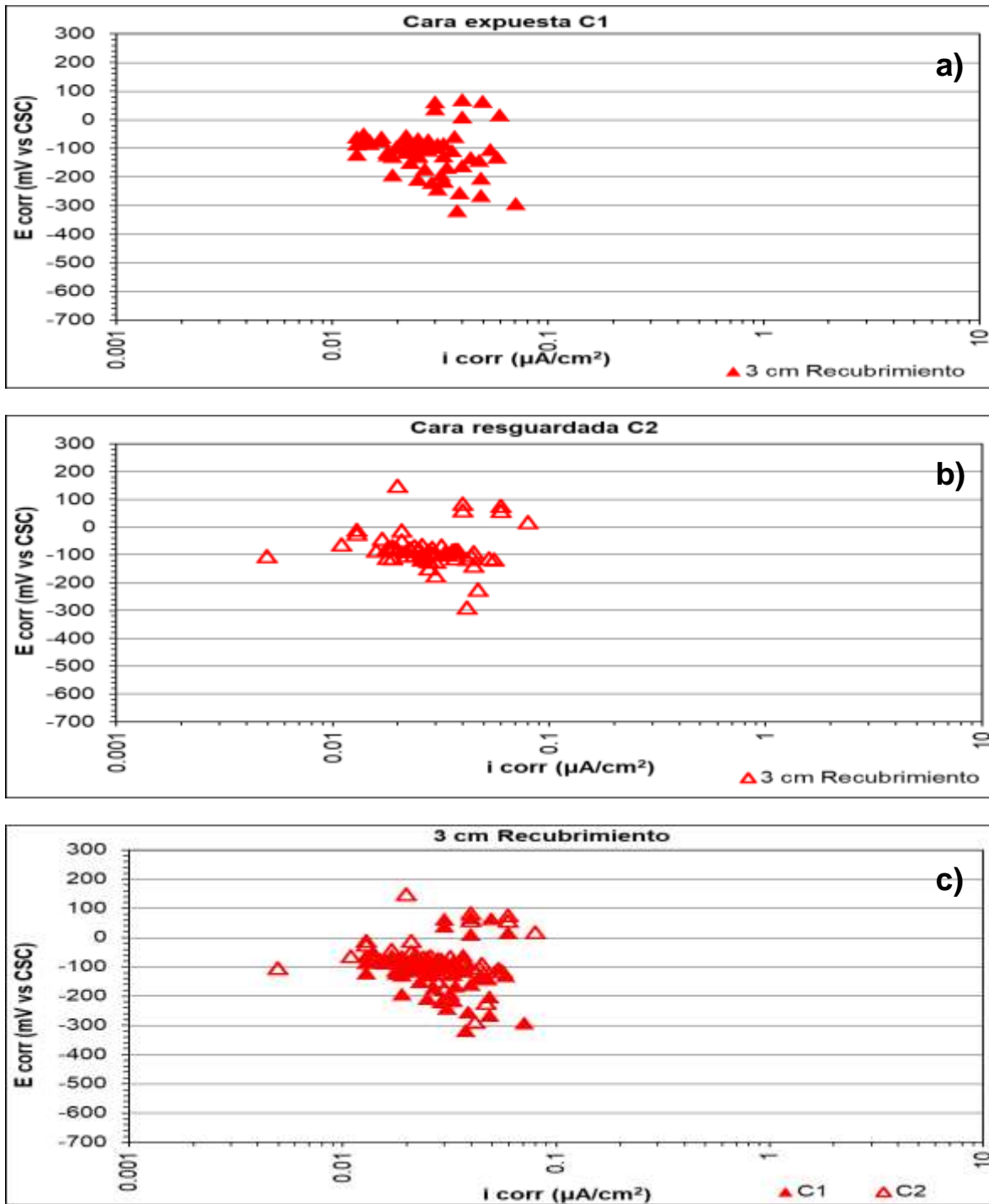


Figura C.8.1 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

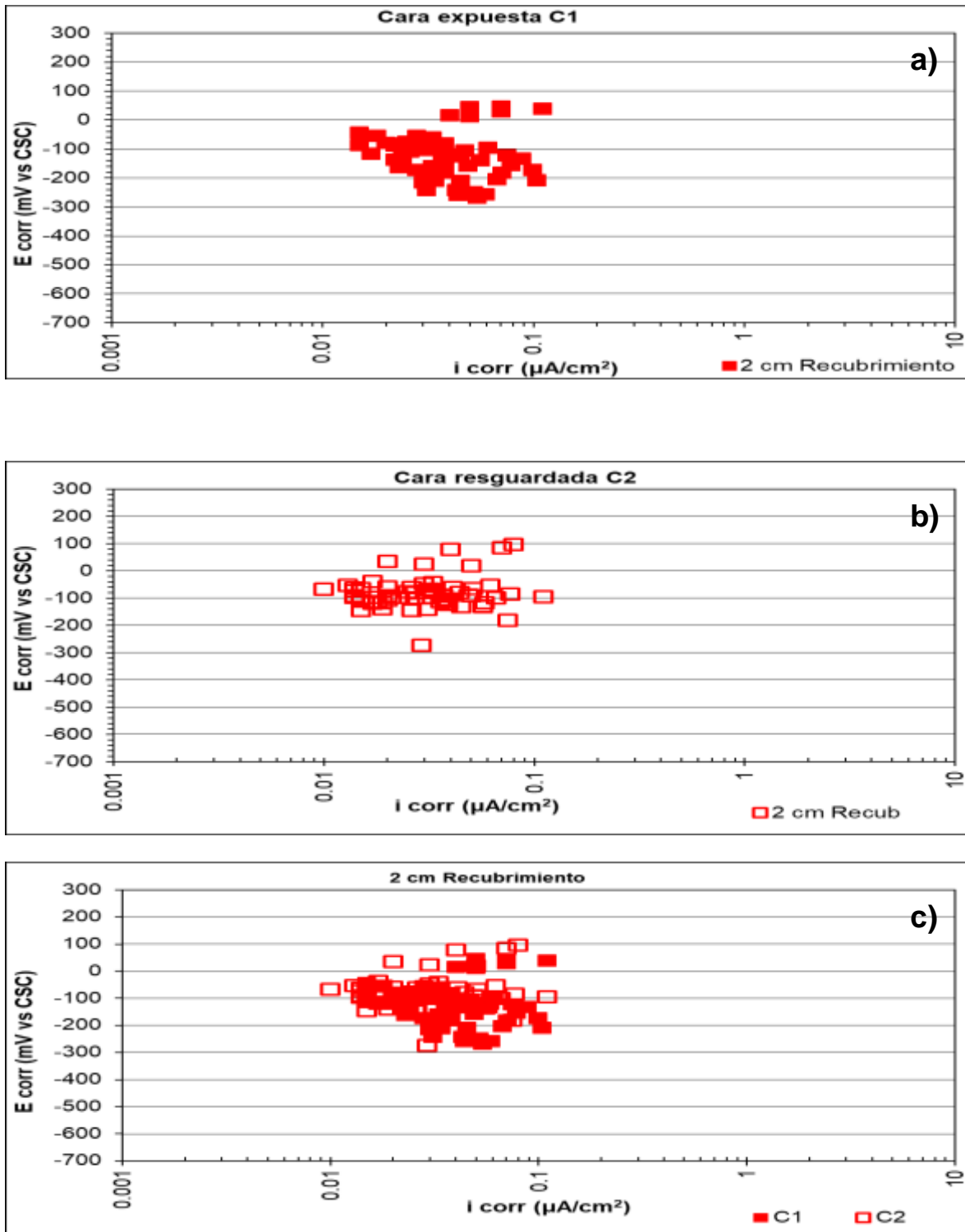


Figura C.8.2 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

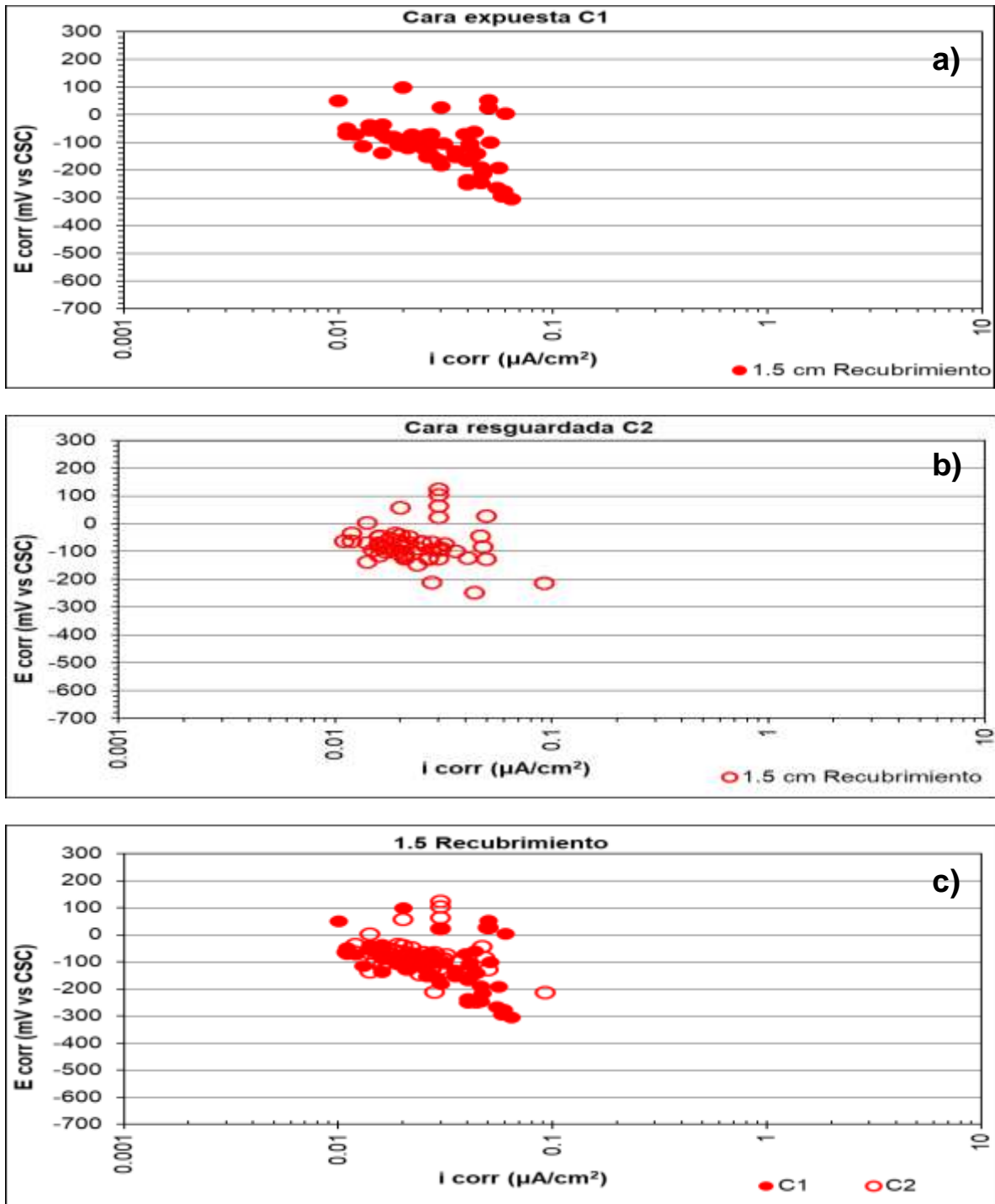


Figura C.8.3 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

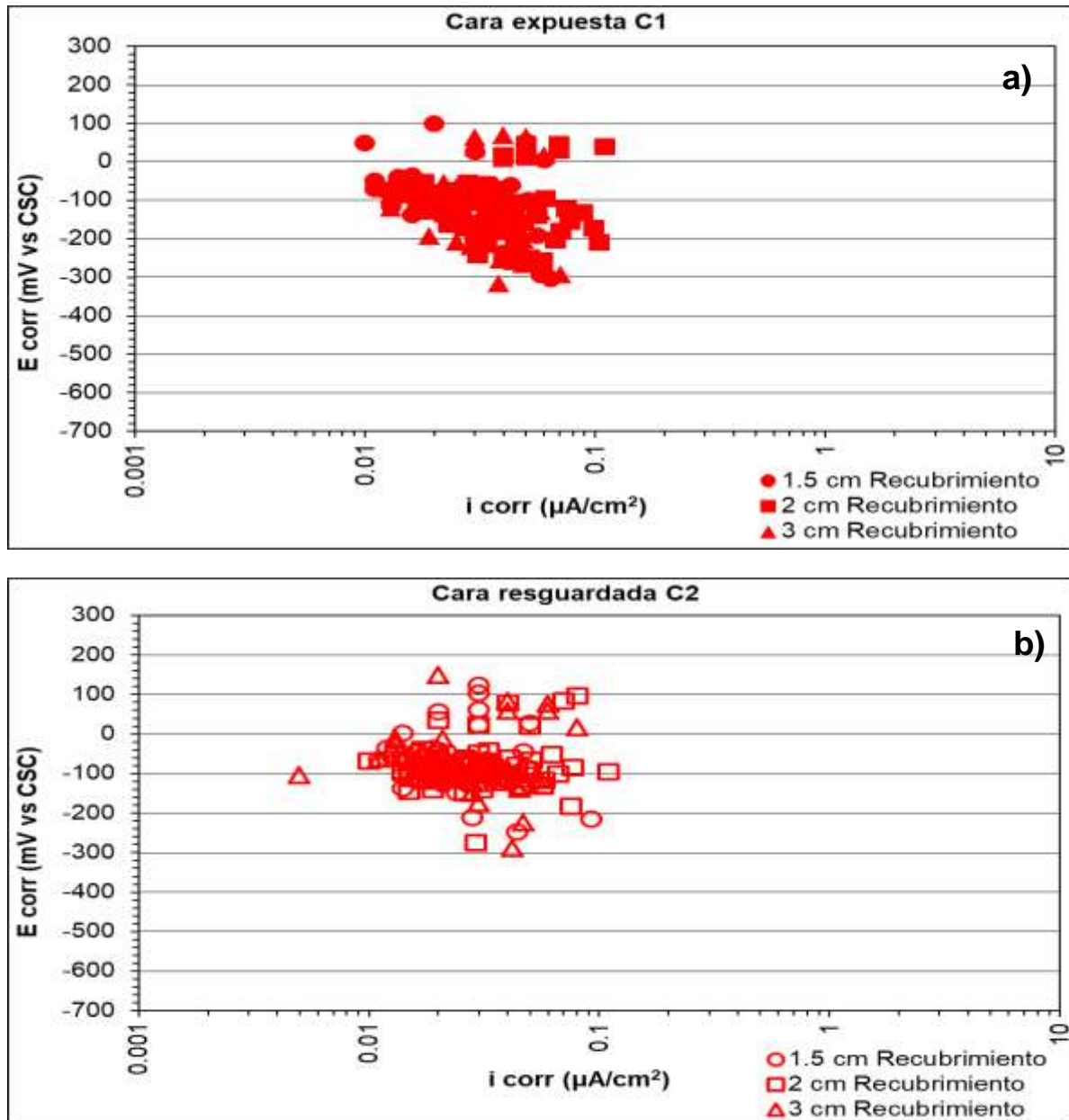


Figura C.8.4 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. velocidad de corrosión (i_{corr}) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

Anexo D. Correlación i_{corr} vs. resistencia eléctrica

Anexo D.1 Estación Mexicali (Mx10)

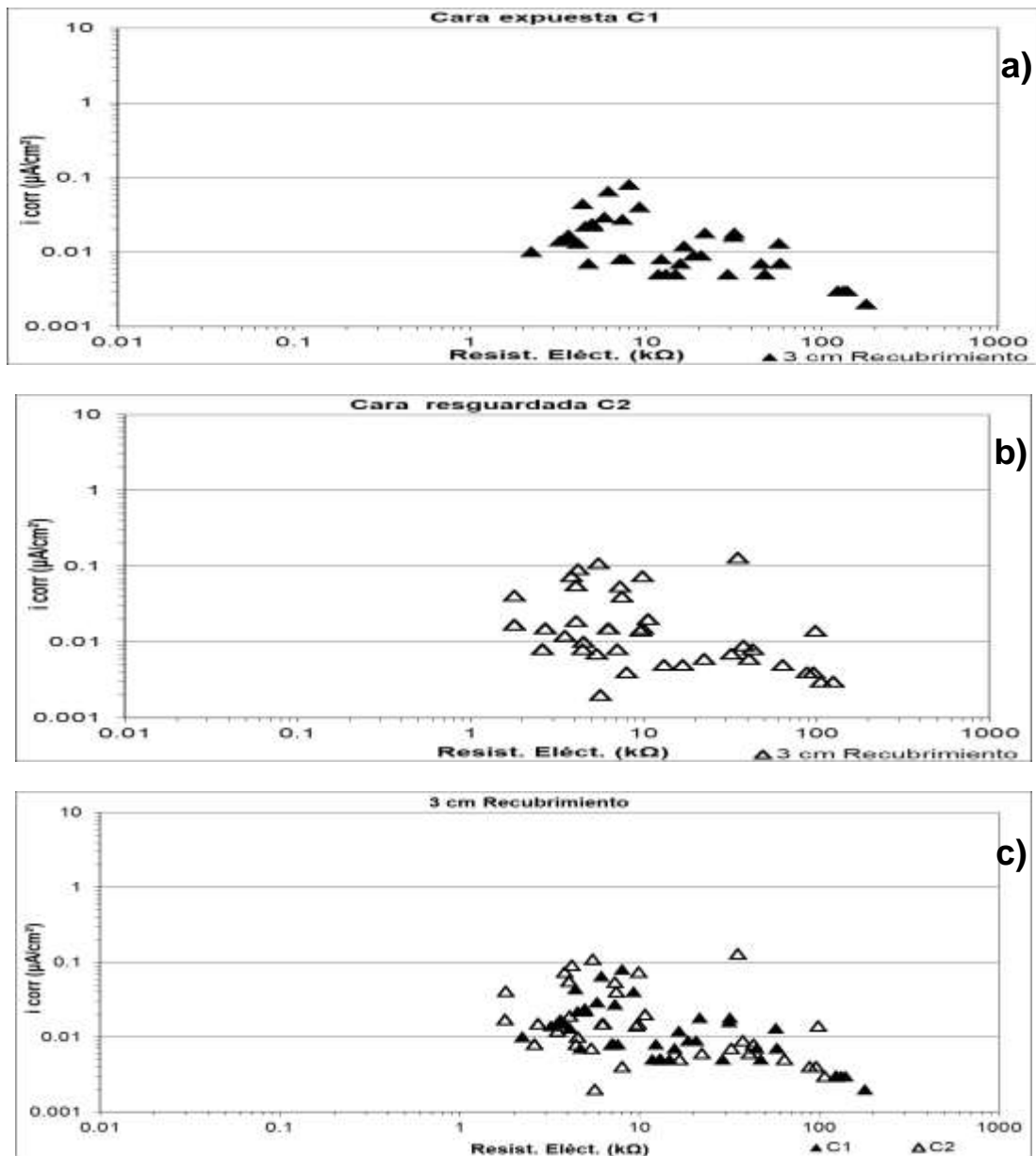


Figura D.1.1 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

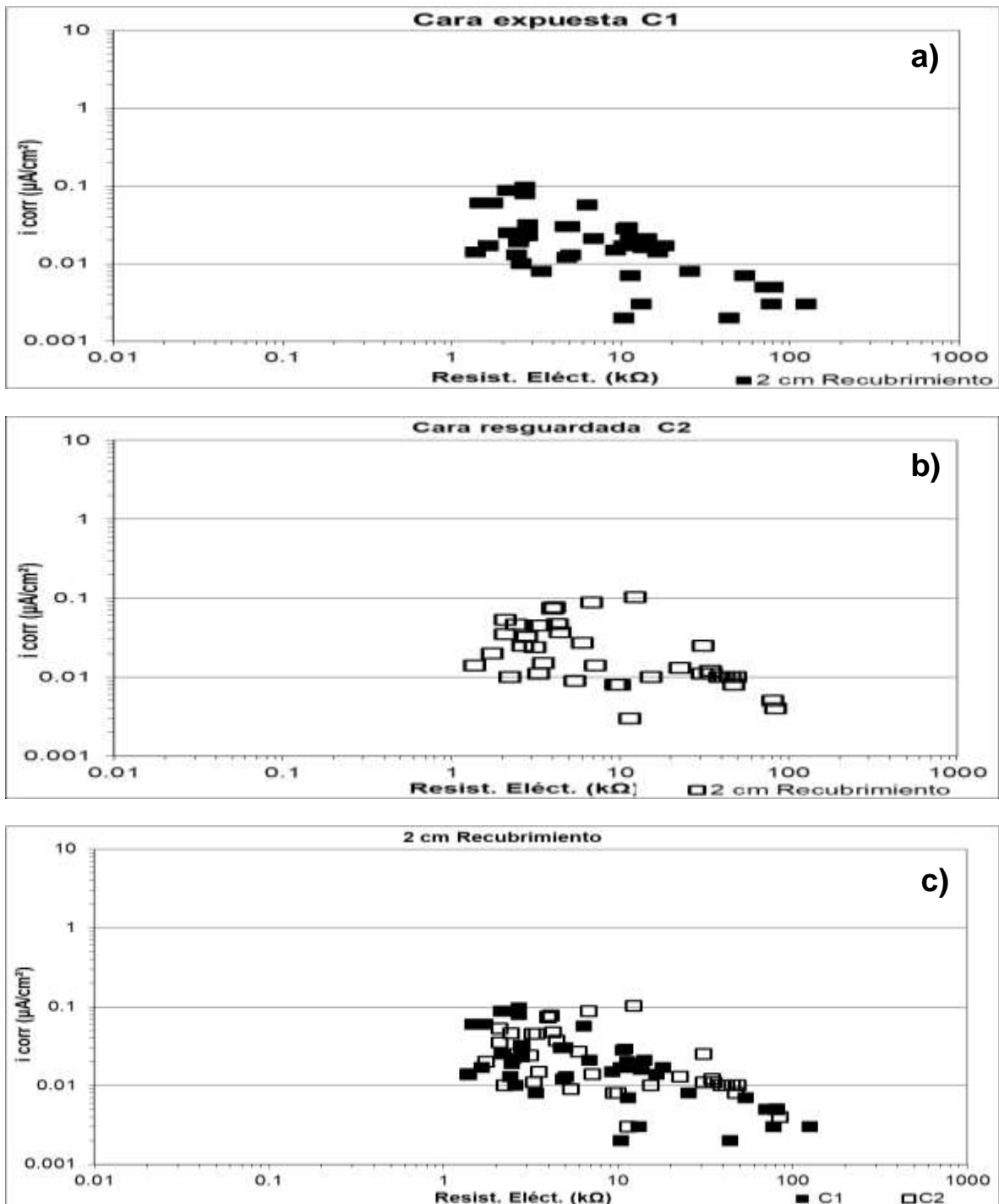


Figura D.1.2 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

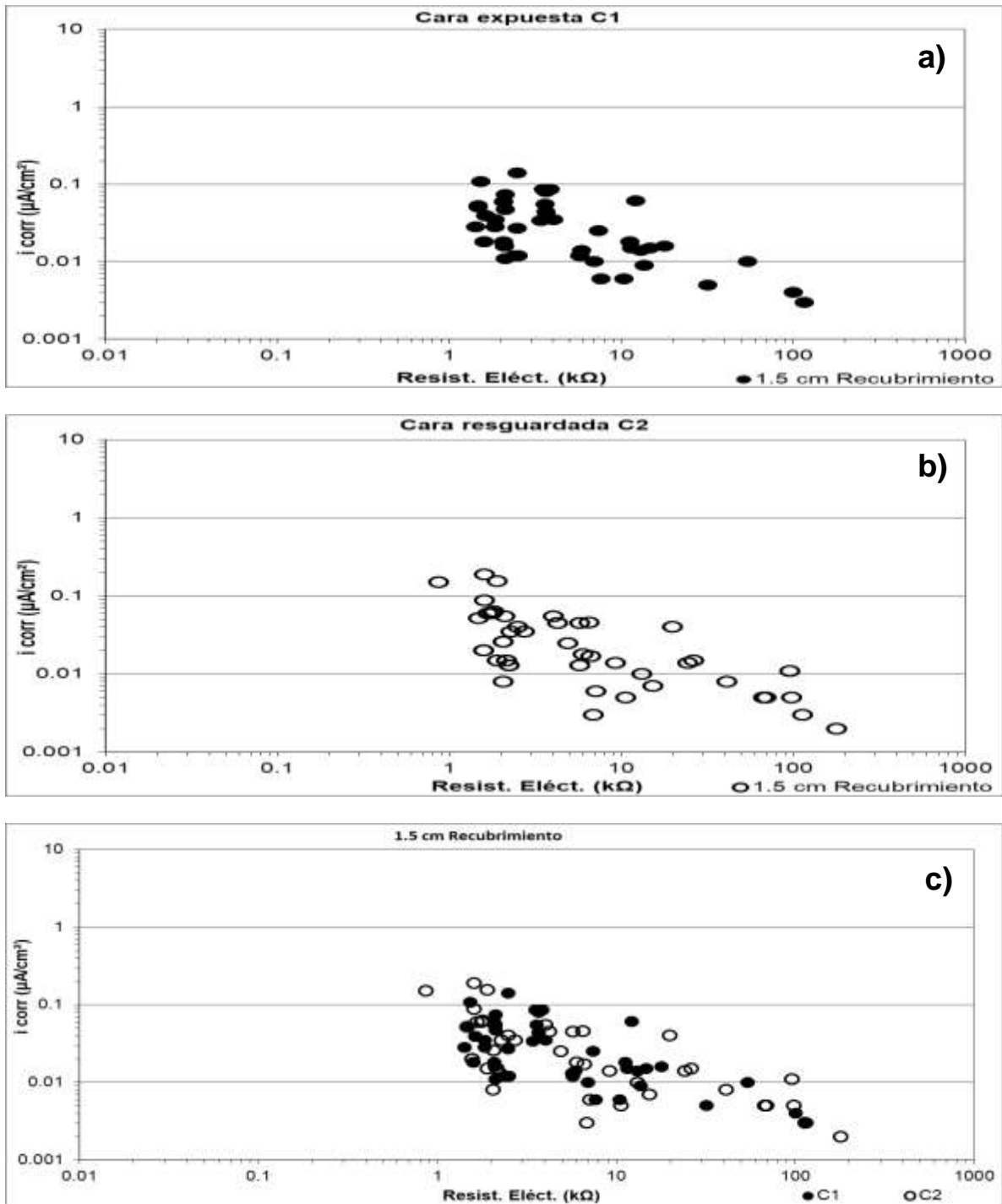


Figura D.1.3 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

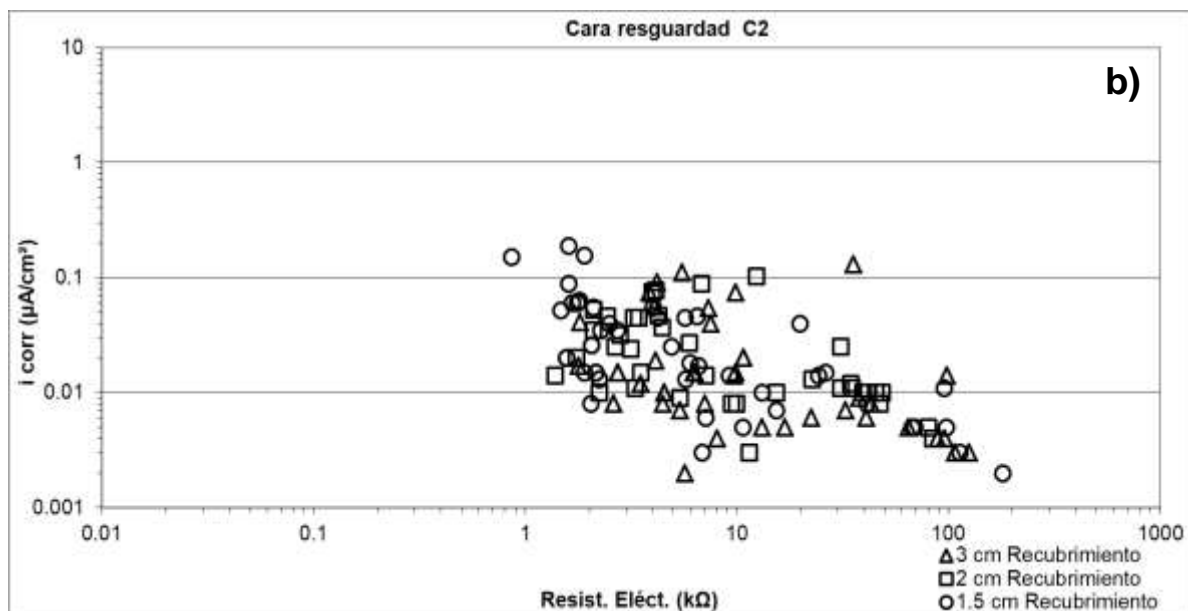
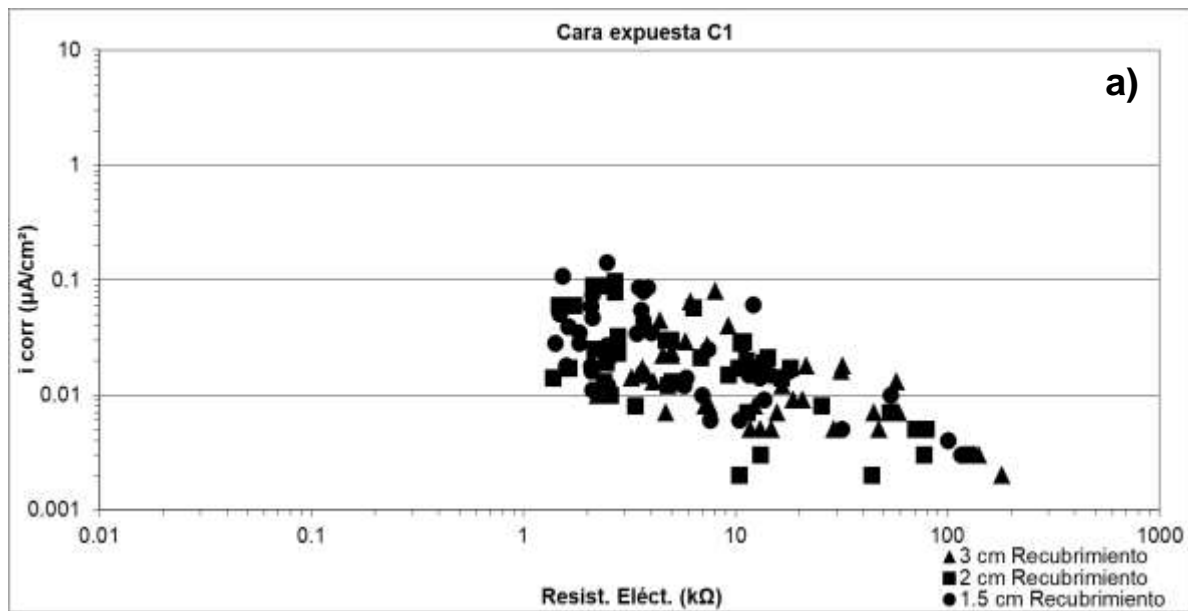


Figura D.1.4 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) eléctrica para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

Anexo D.2 Estación México, D.F. (Mx7)

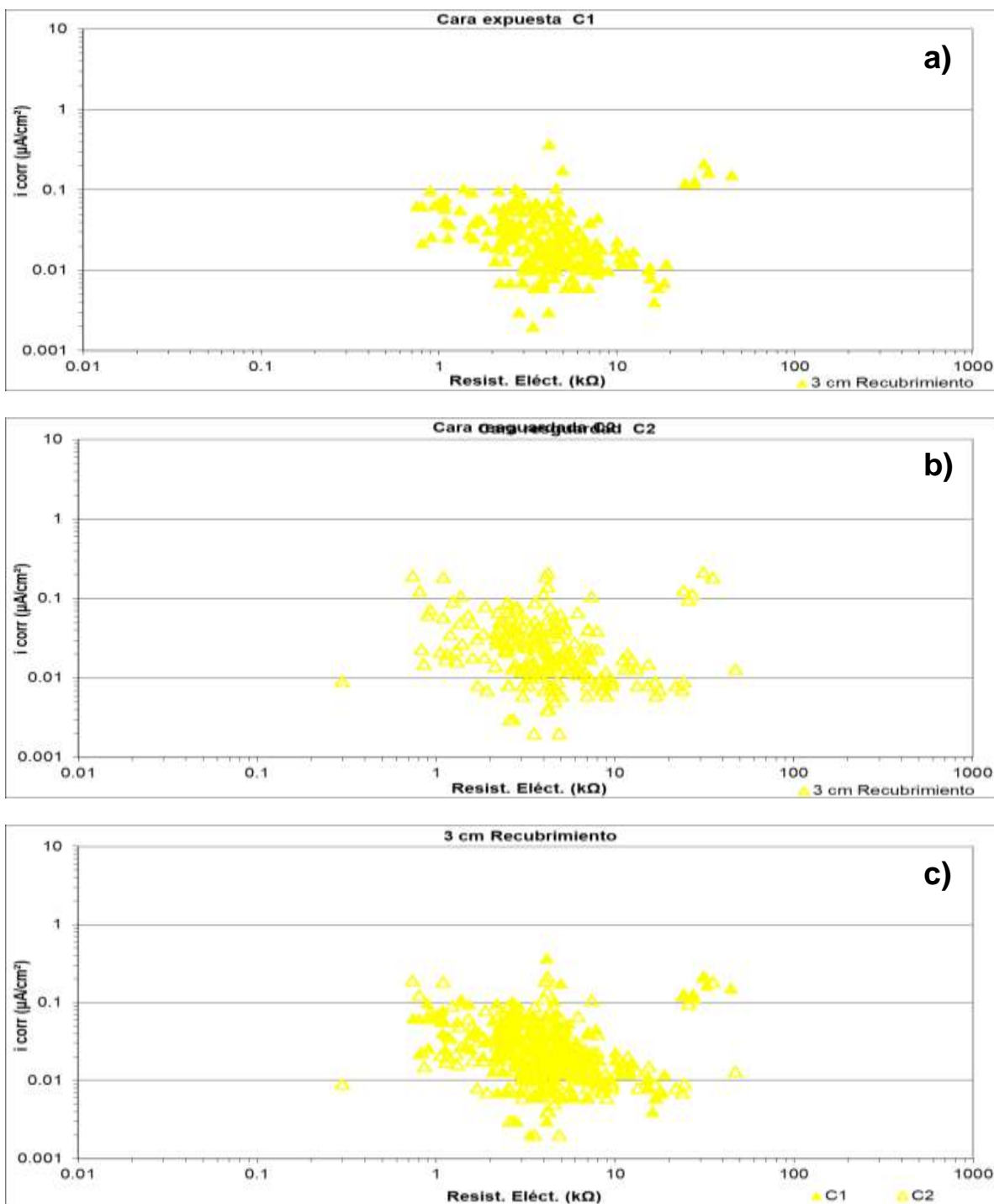


Figura D.2.1 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

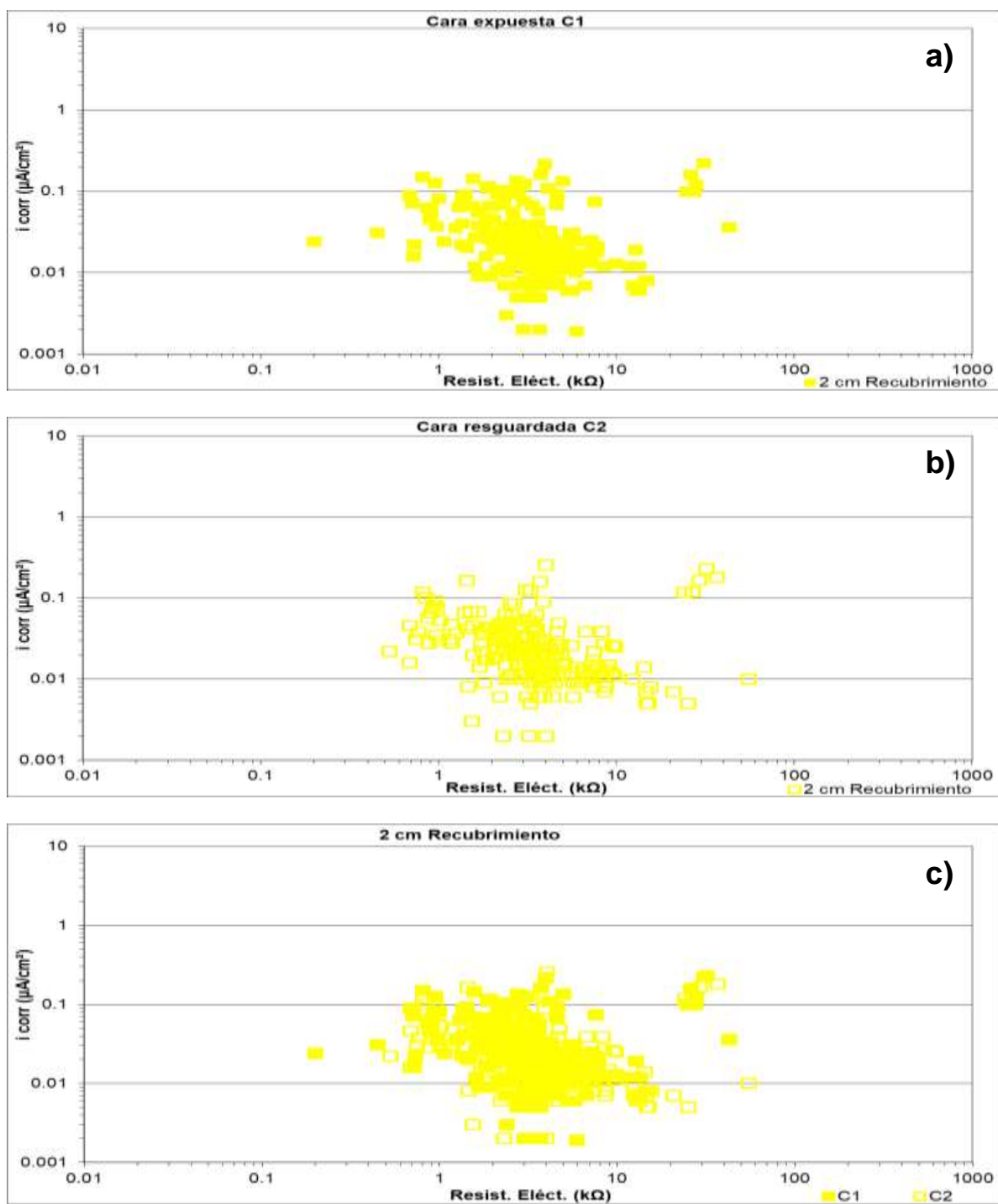


Figura D.2.2 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

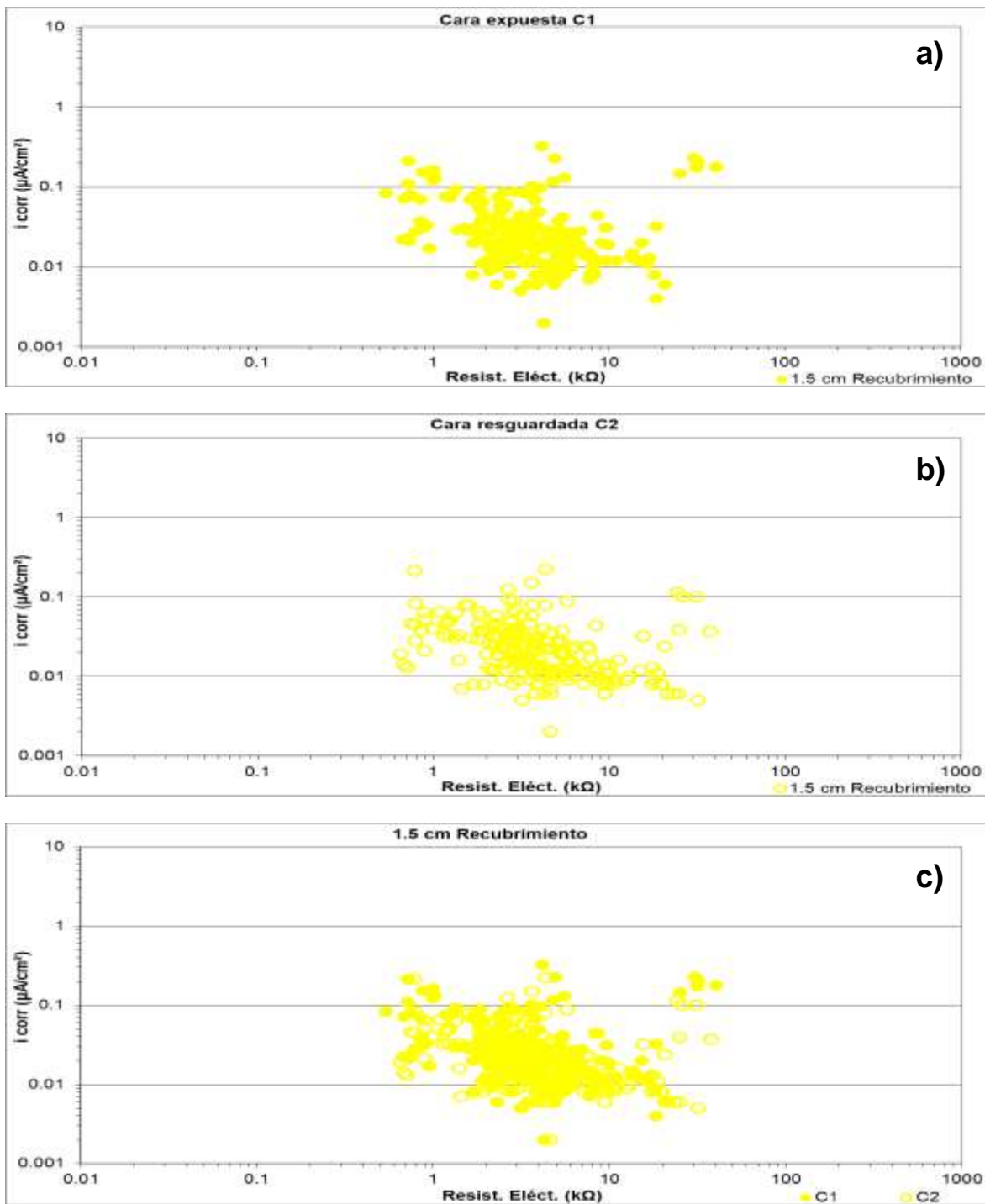


Figura D.2.3 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

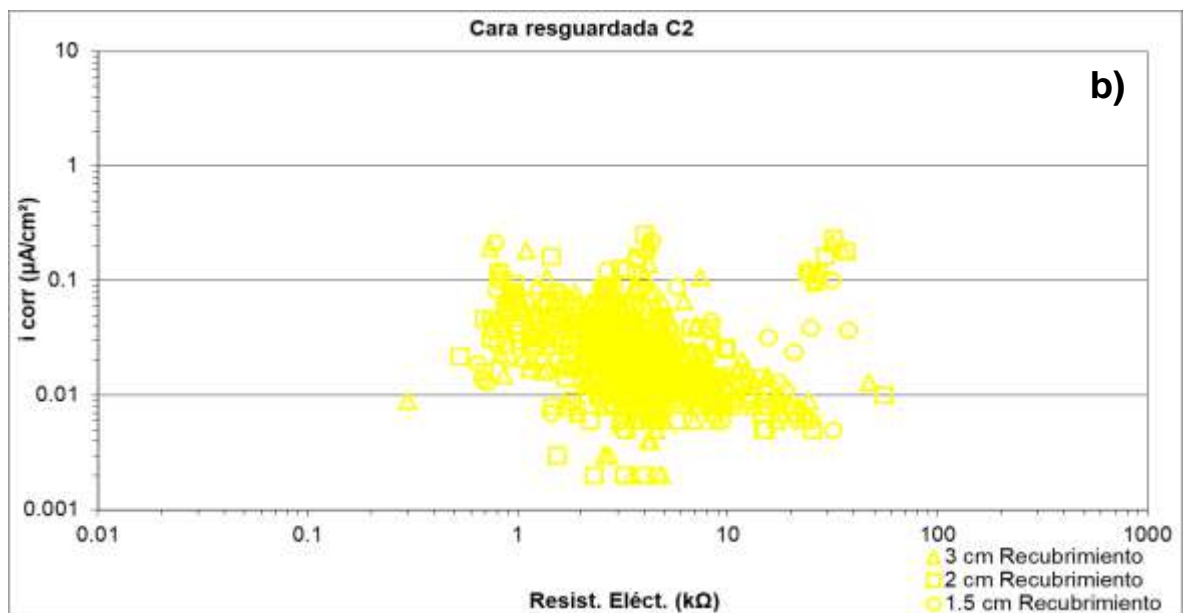
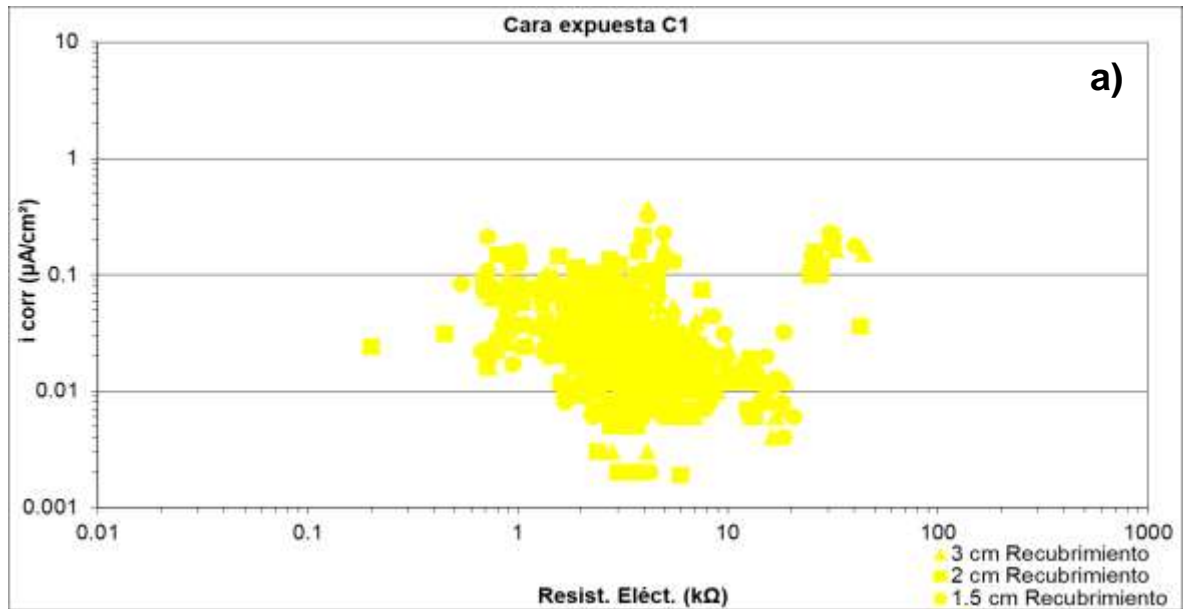


Figura D.2.4 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

Anexo D.3 Estación Morelia (Mx5)

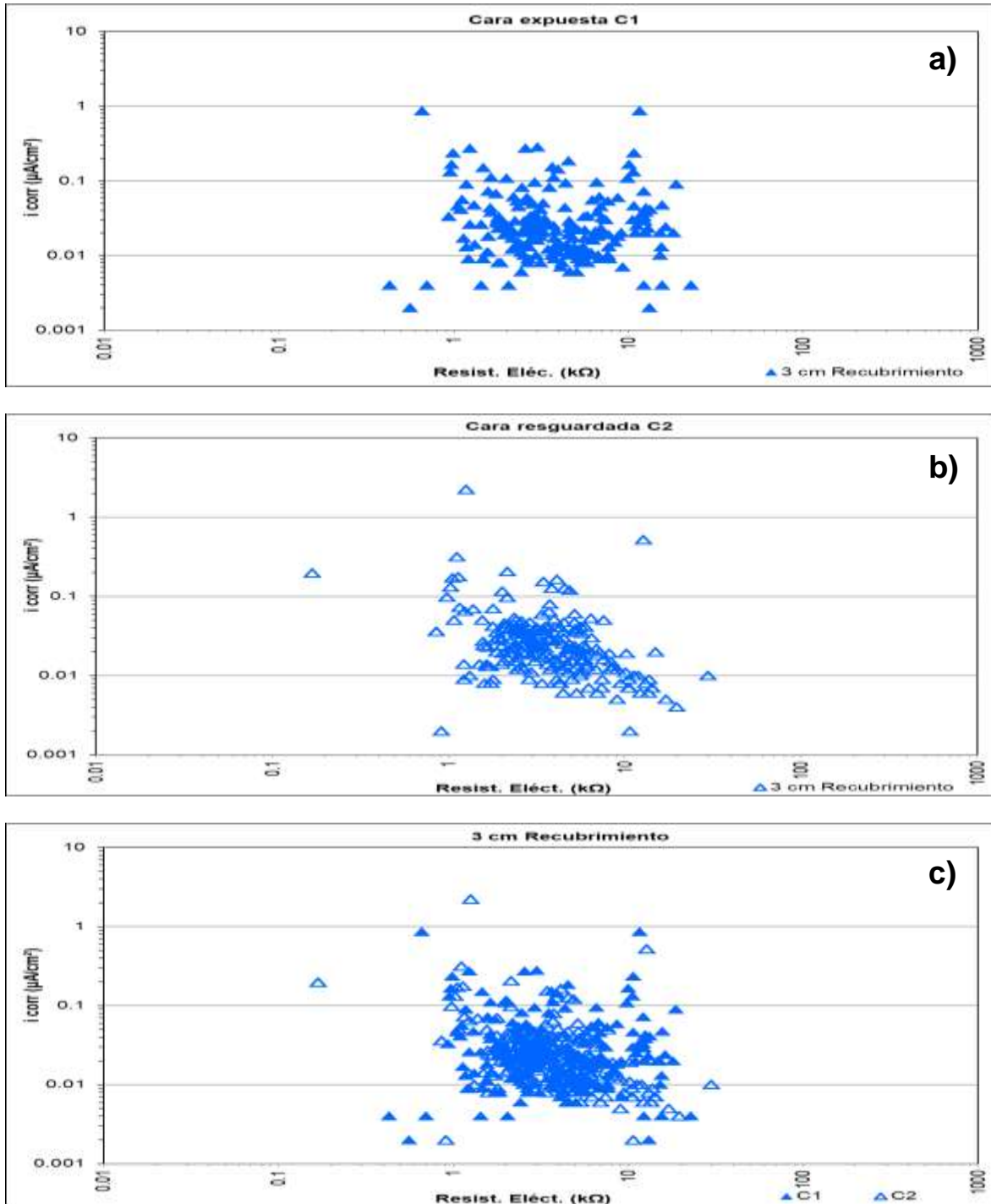


Figura D.3.1 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

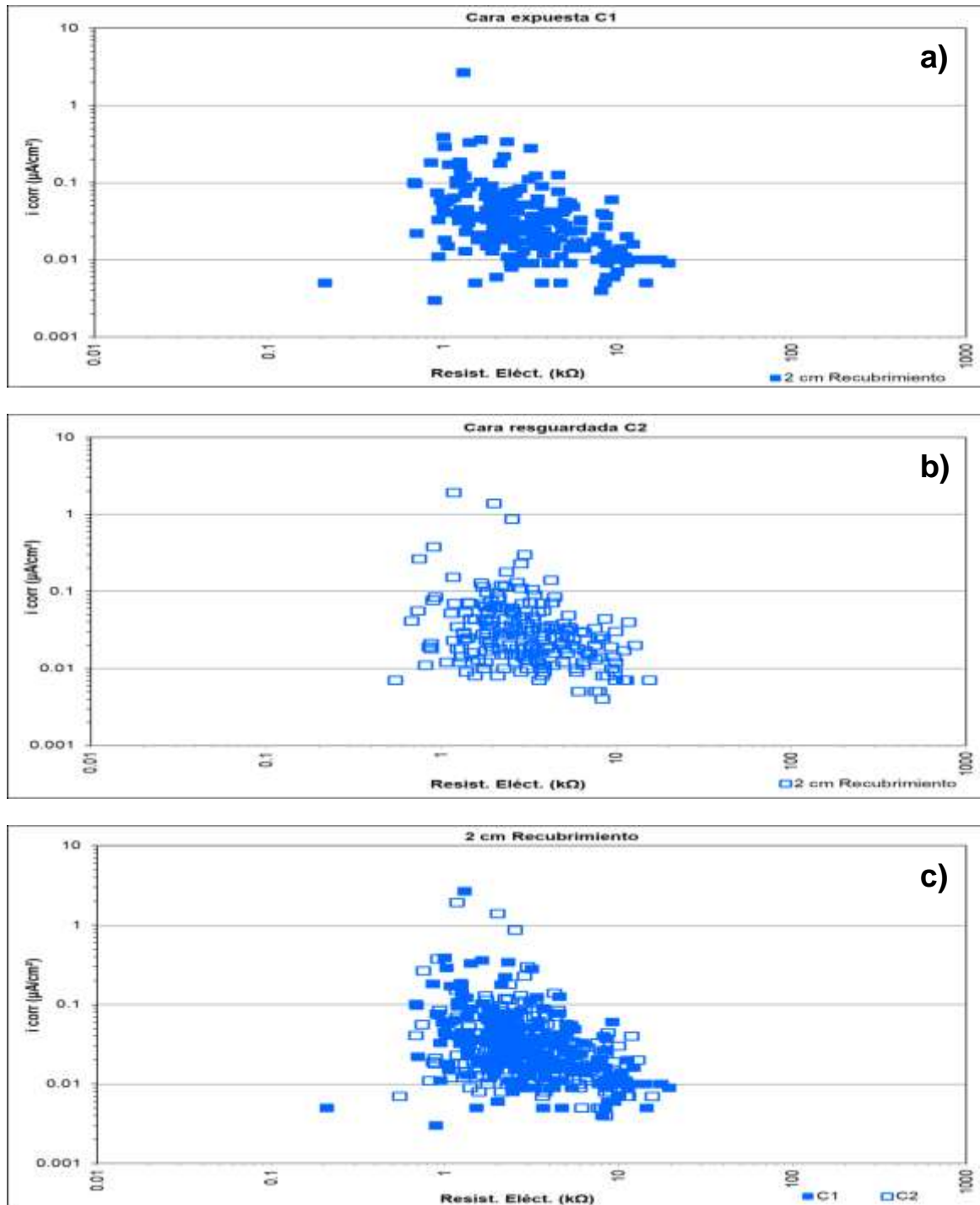


Figura D.3.2 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

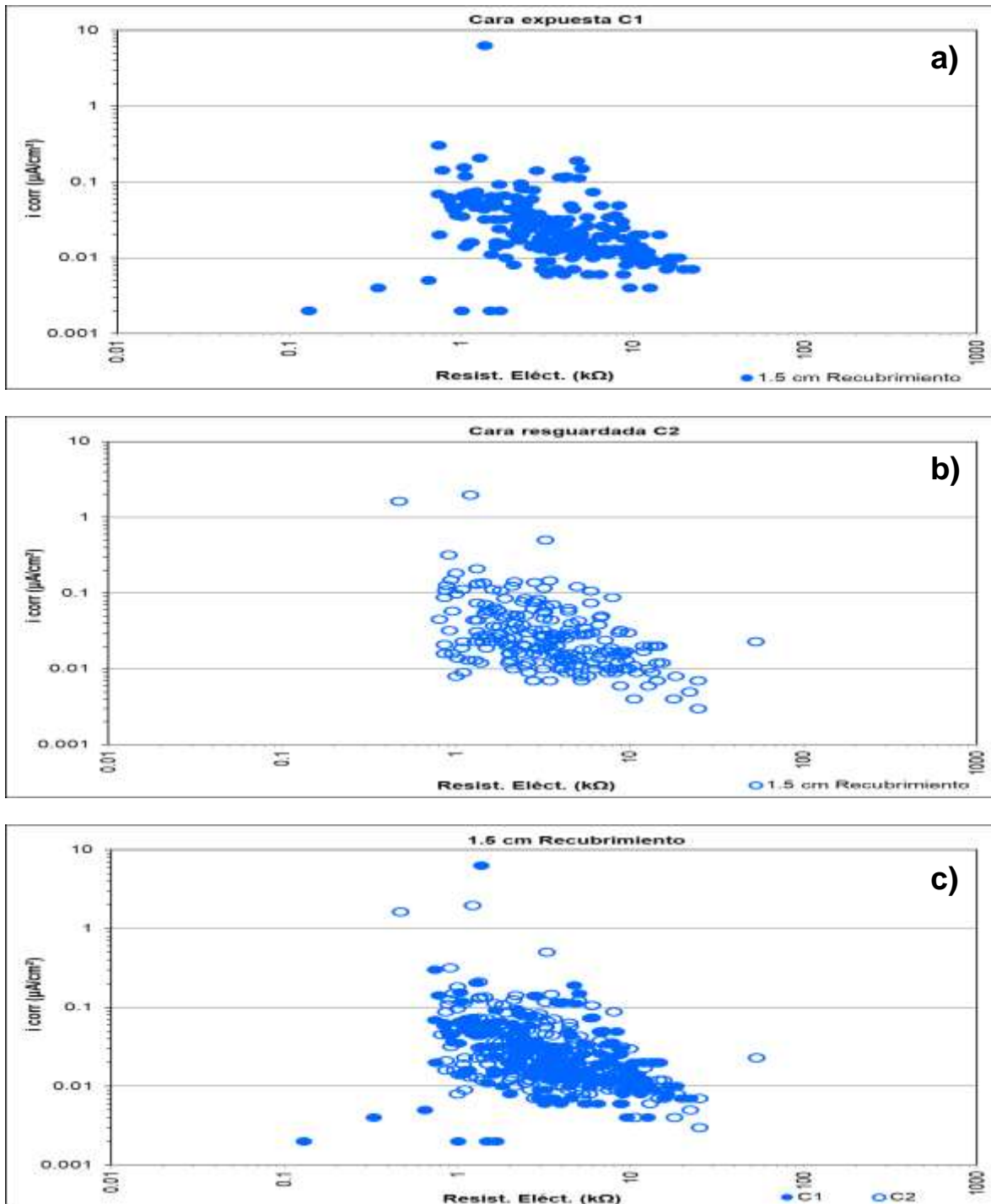


Figura D.3.3 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

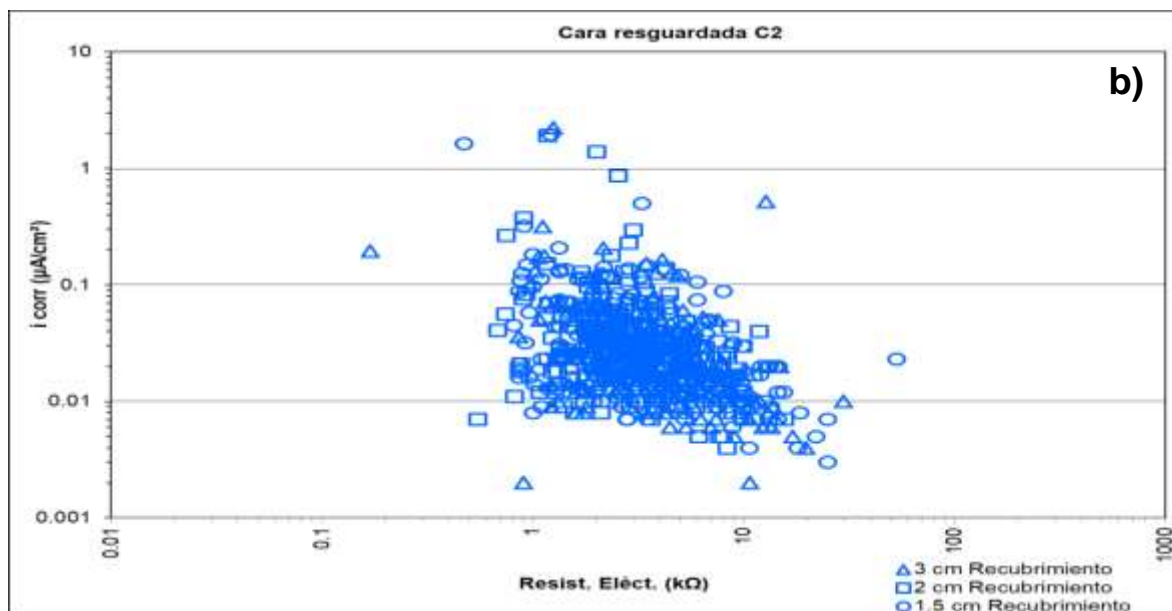
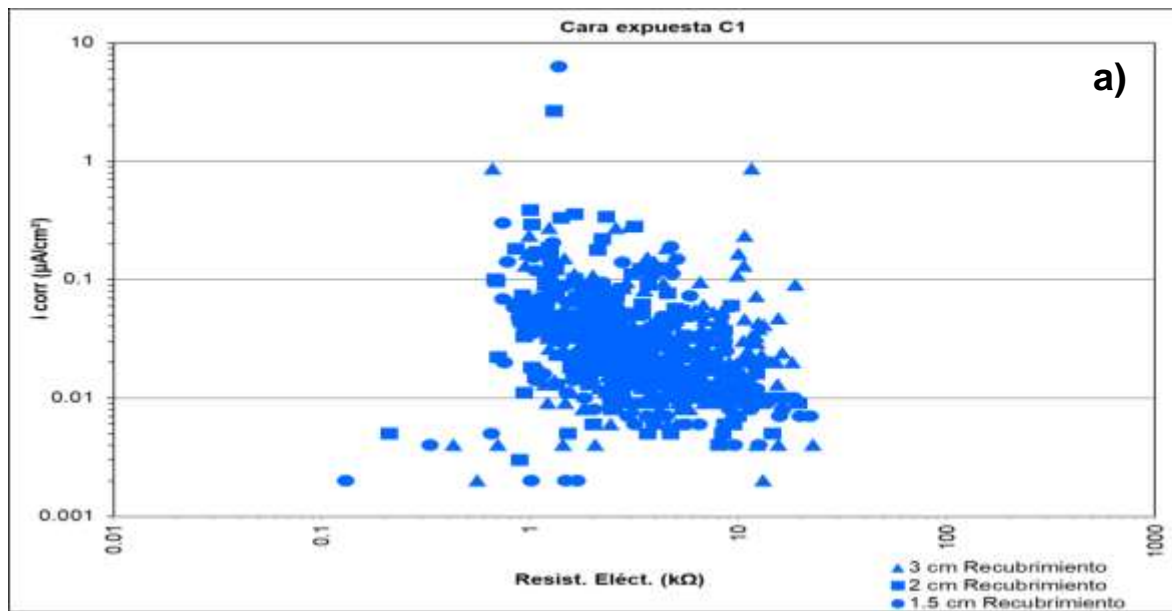


Figura D.3.4 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

Anexo D.4 Estación Oaxaca (Mx4)

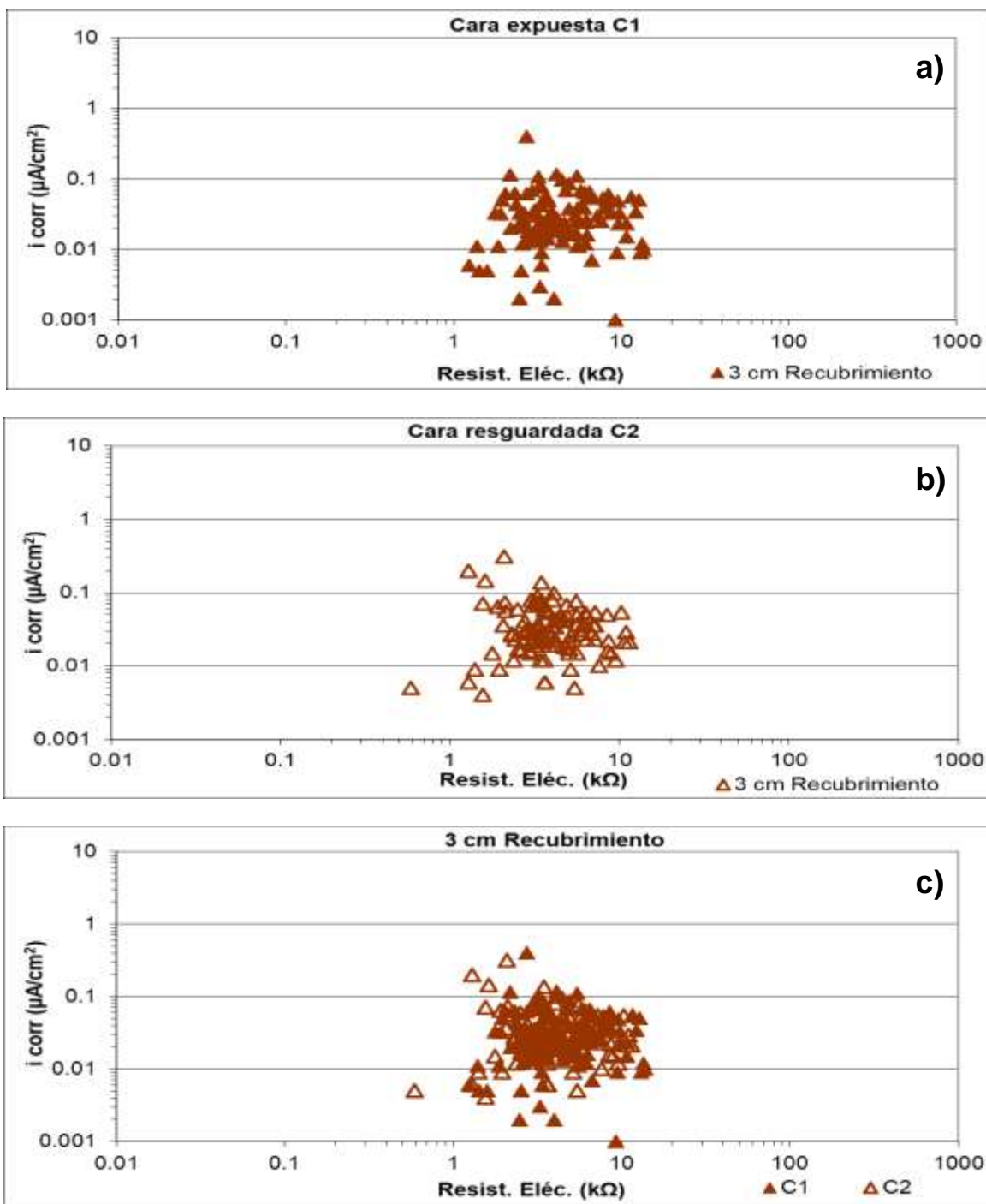


Figura D.4.1 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléc.) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

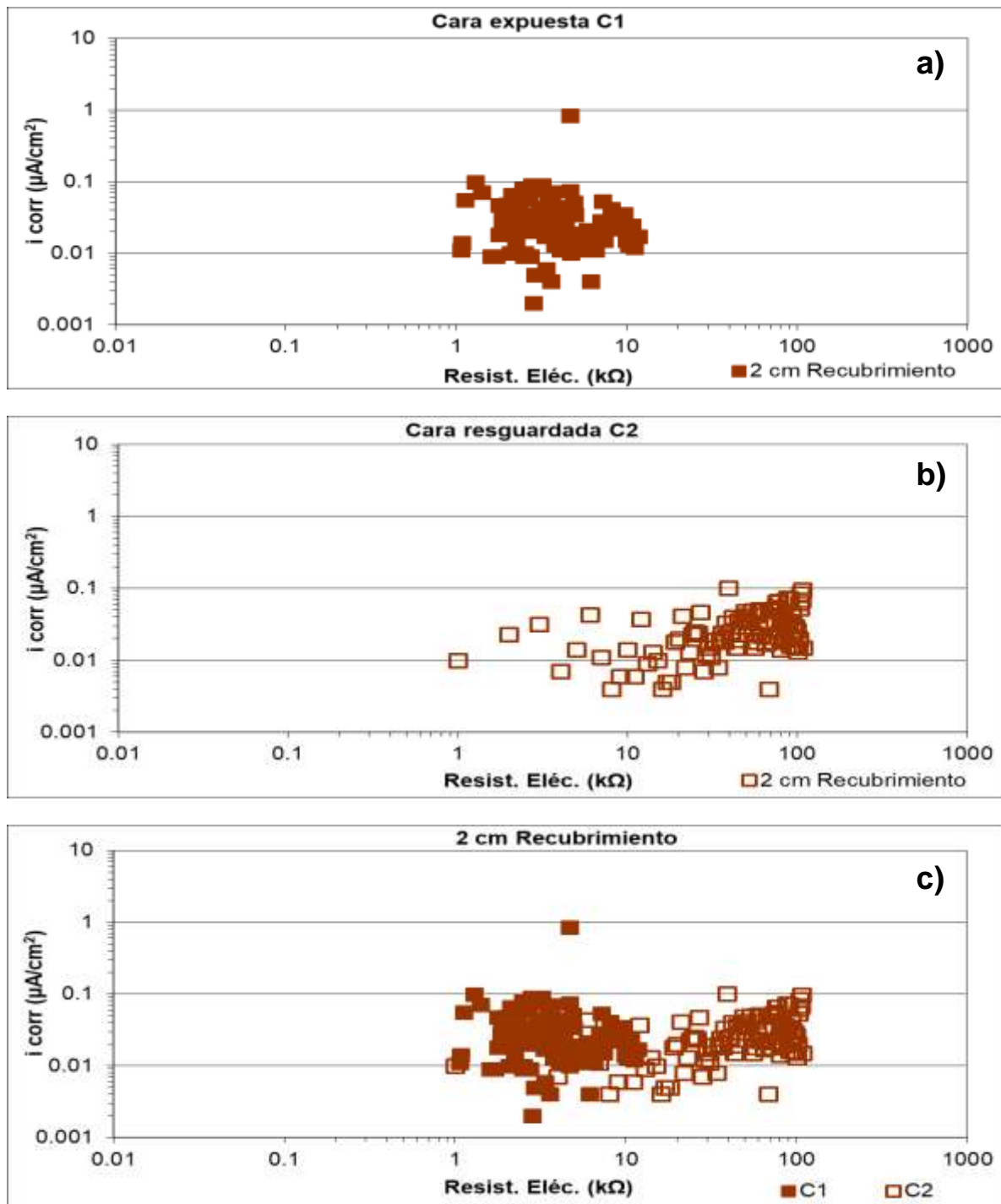


Figura D.4.2 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

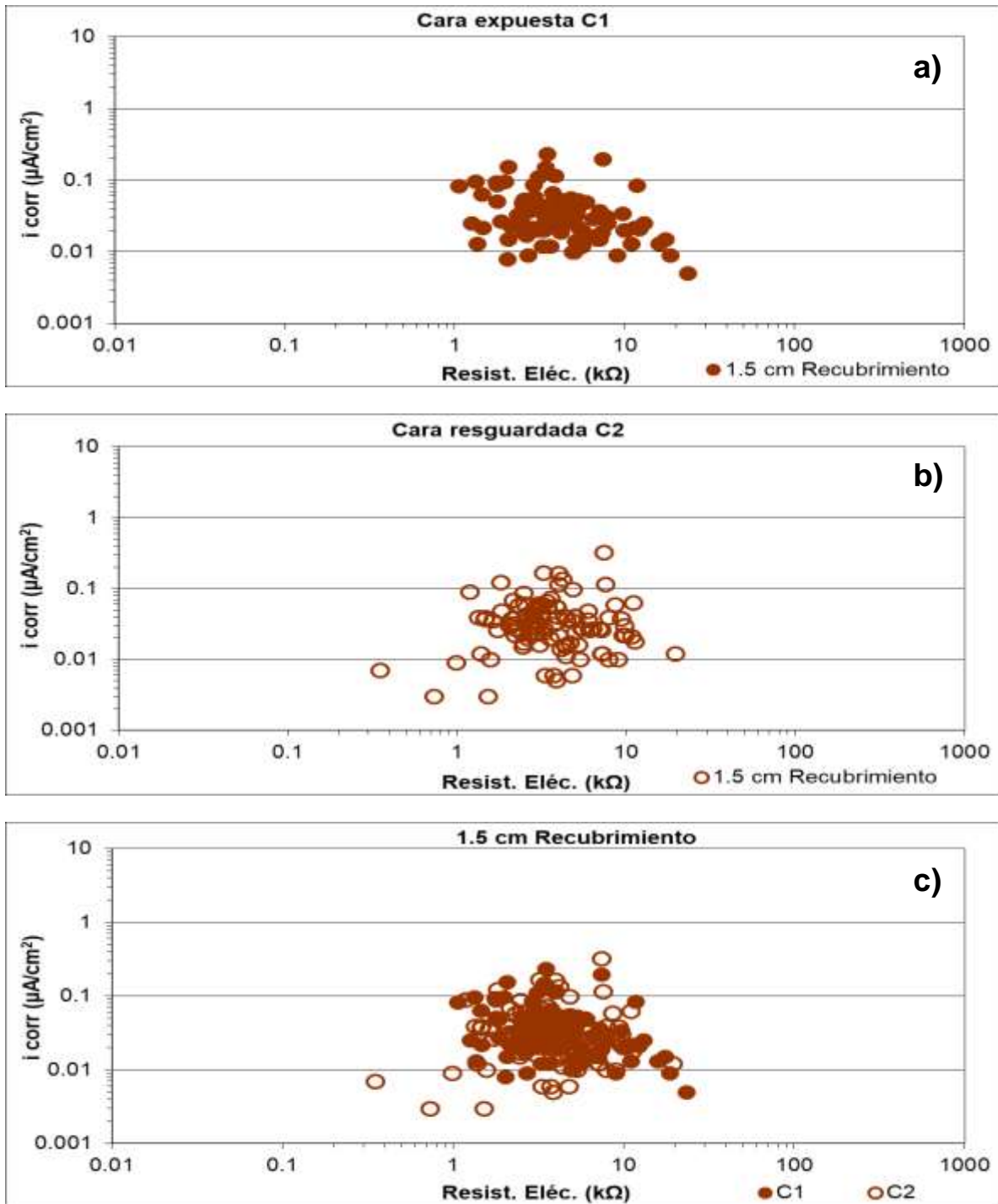


Figura D.4.3 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléc.) 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

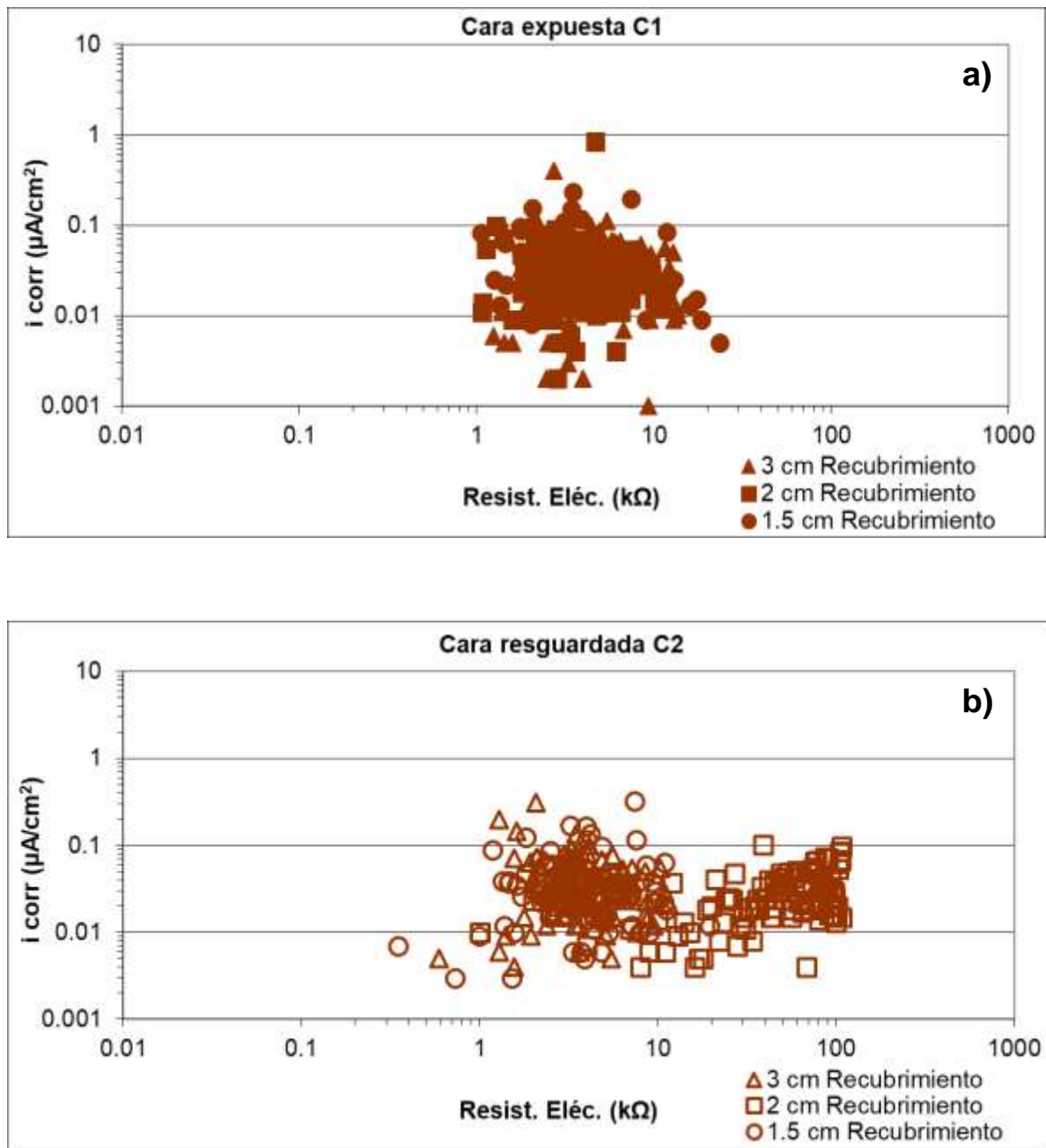


Figura D.4.4 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléc.) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

Anexo D.5 Estación Progreso (Mx2)

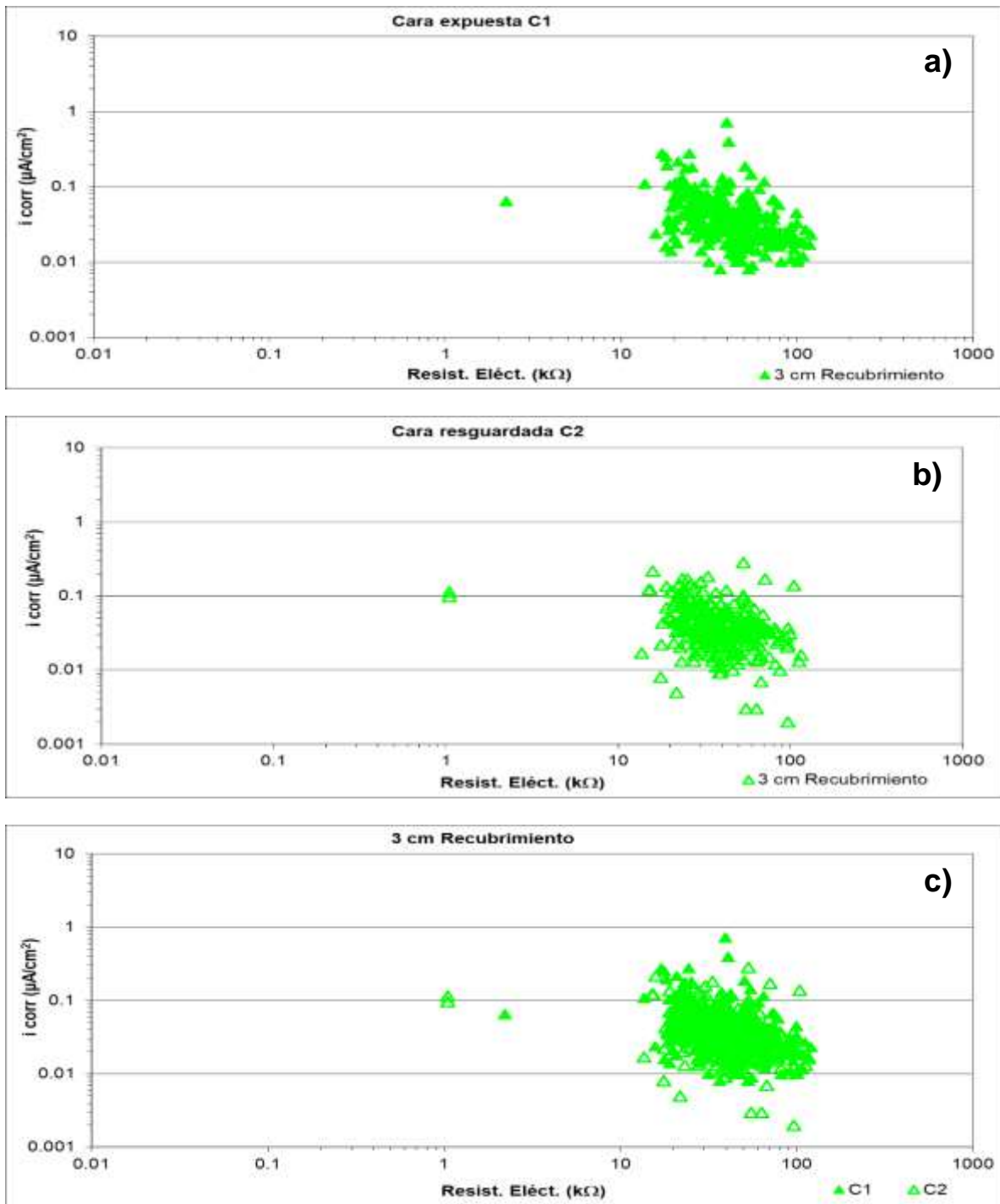


Figura D.5.1 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

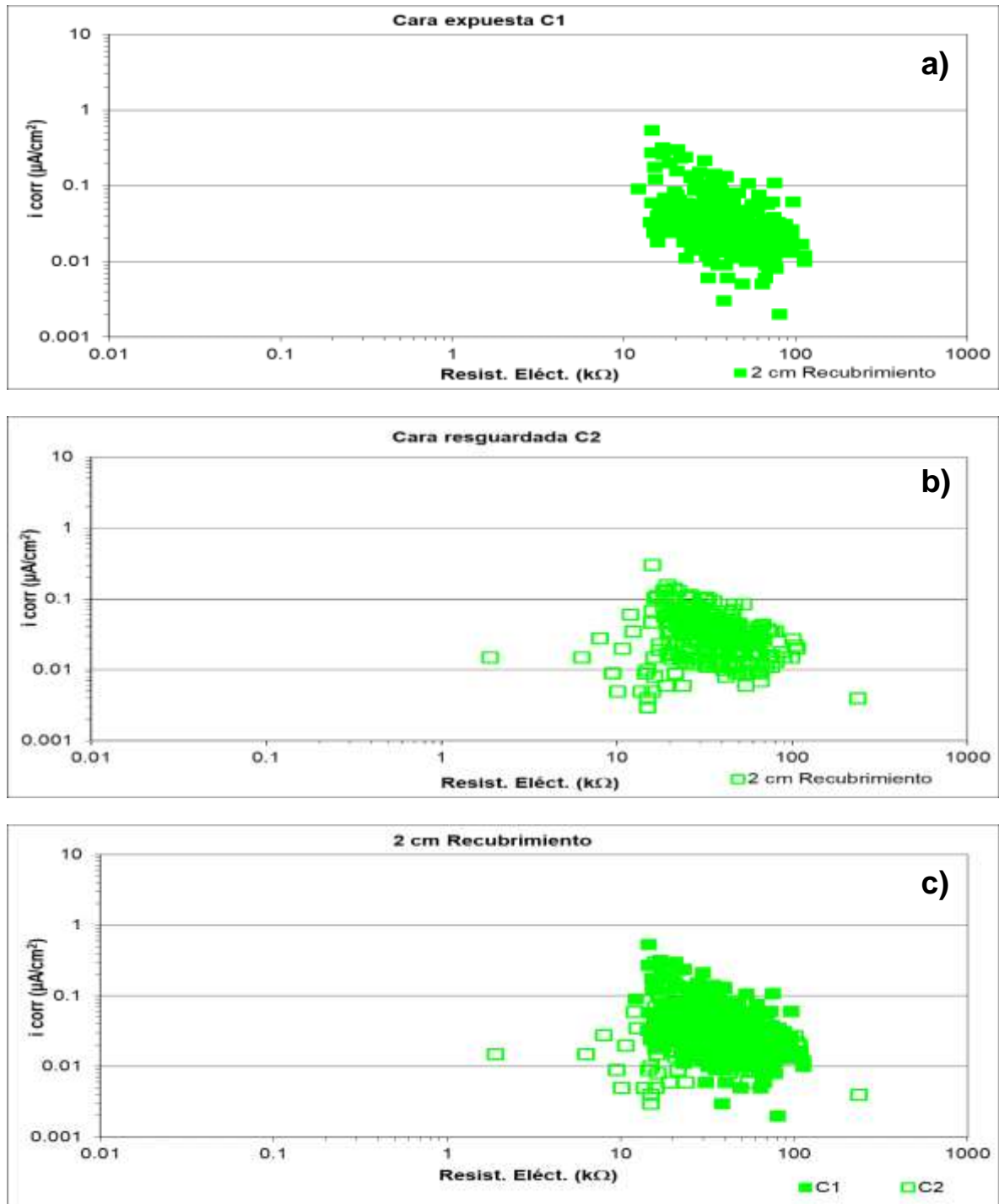


Figura D.5.2 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

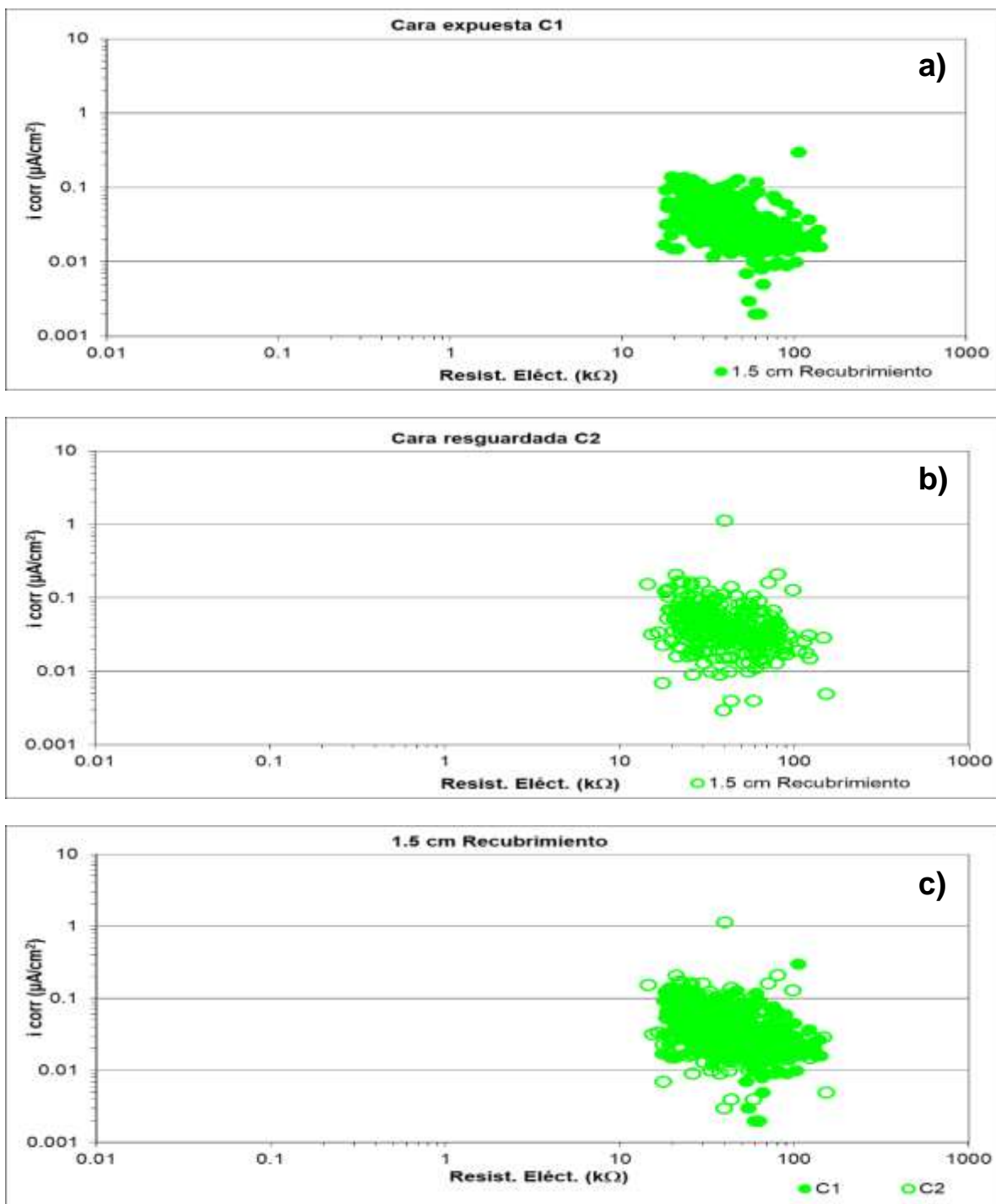


Figura D.5.3 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

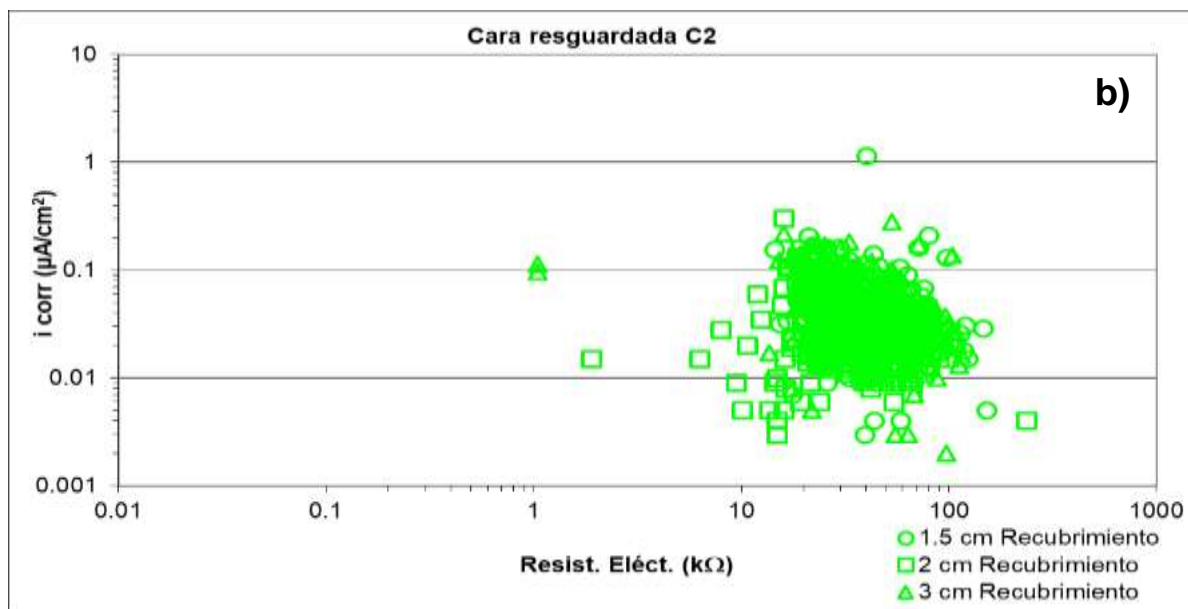
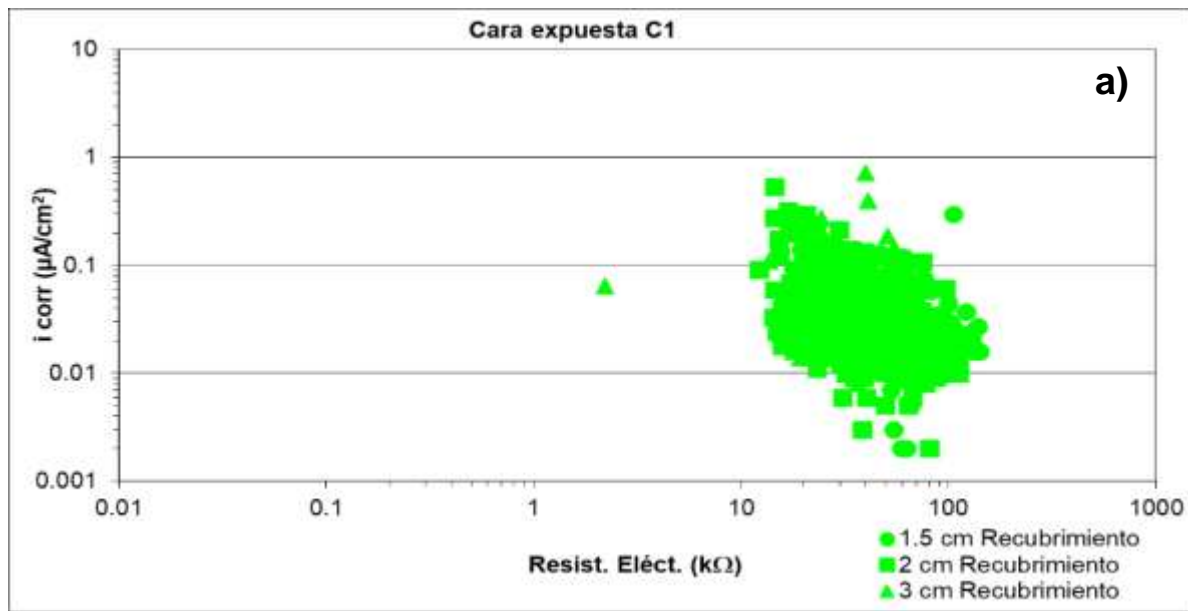


Figura D.5.4 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

Anexo D.6 Estación Tampico (Mx15)

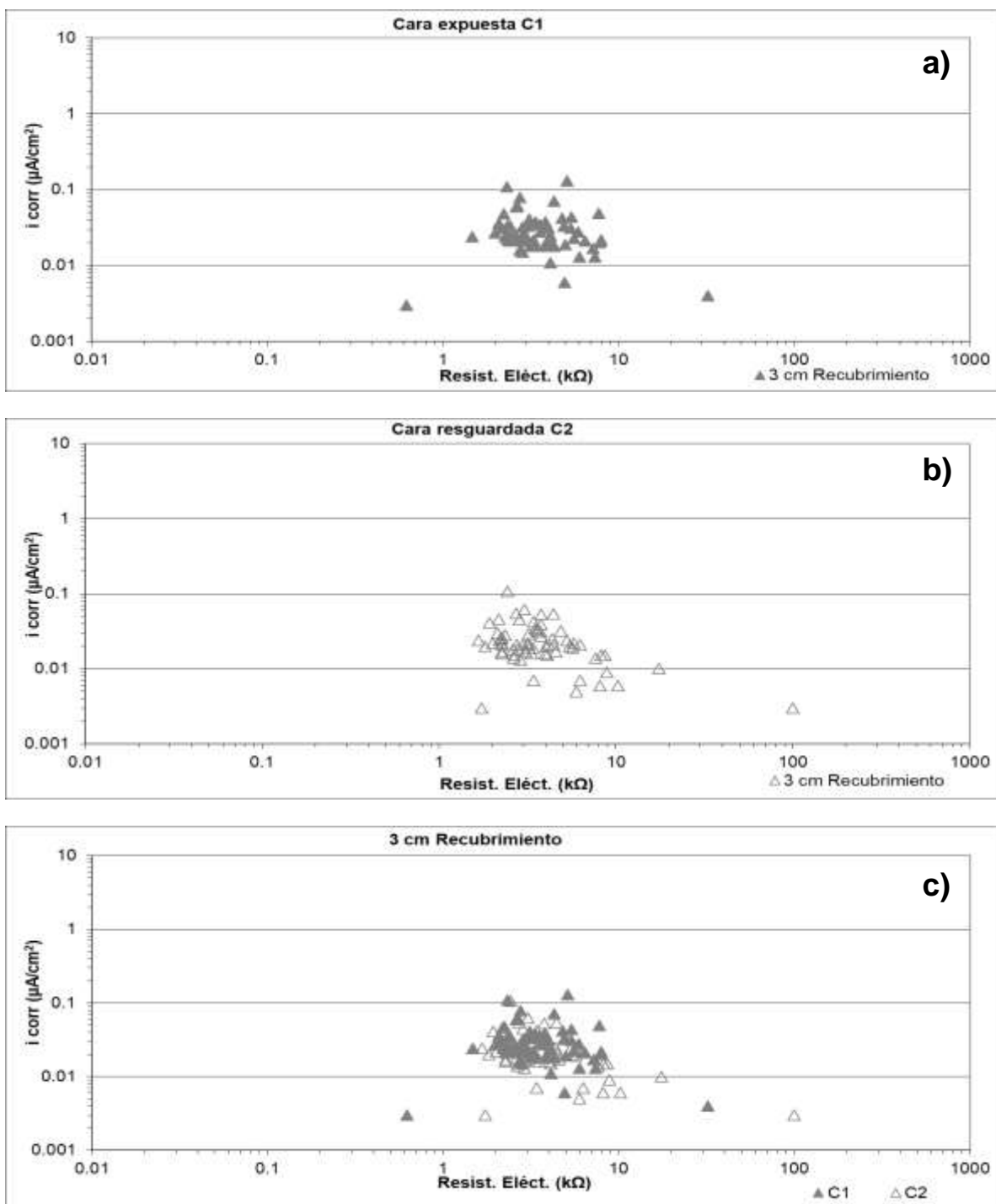


Figura D.6.1 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

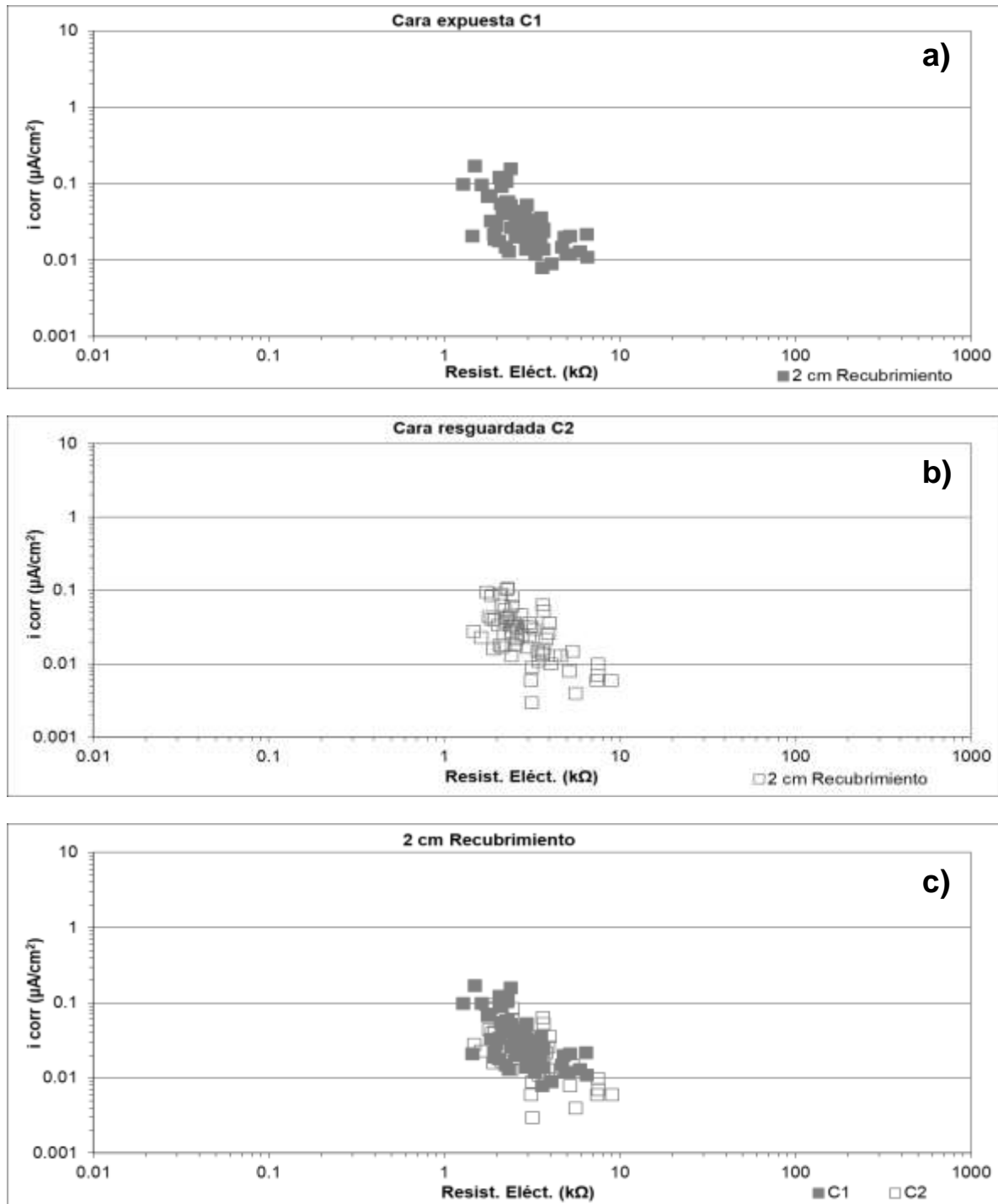


Figura D.6.2 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

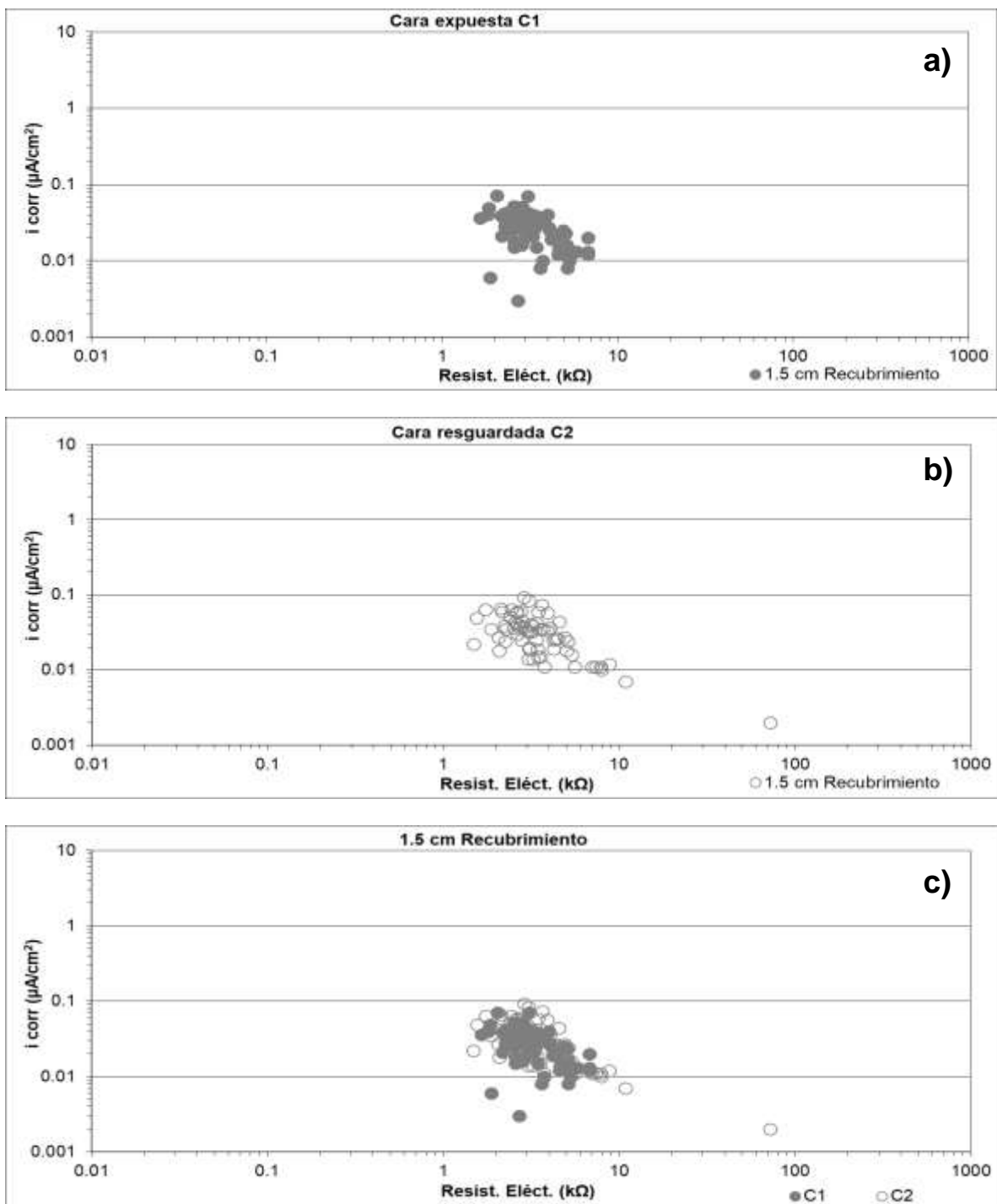


Figura D.6.3 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

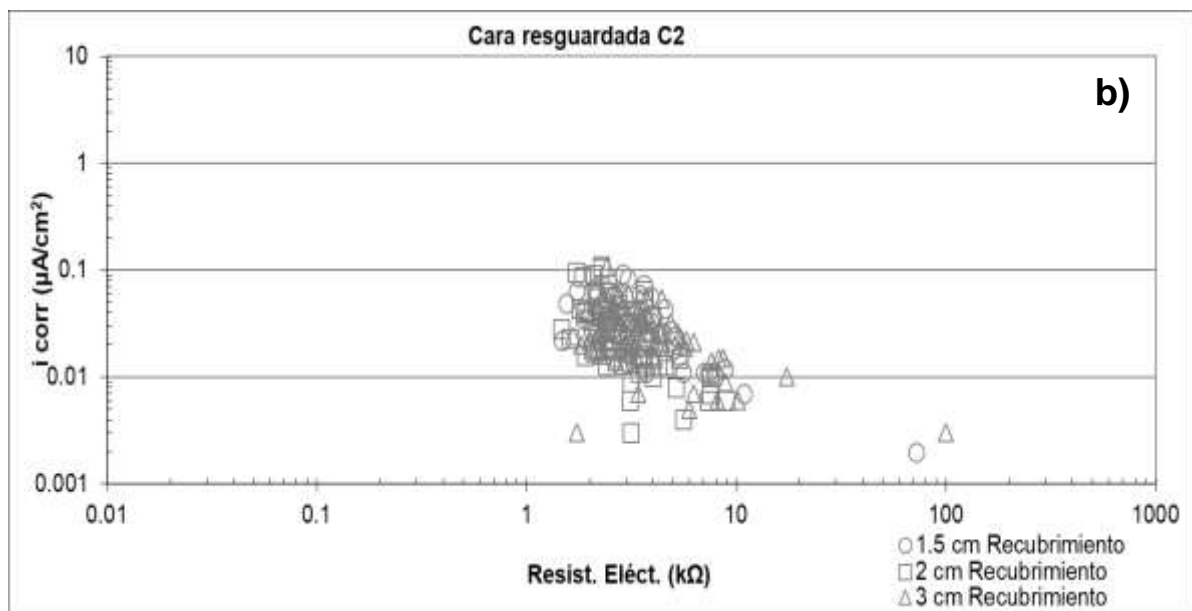
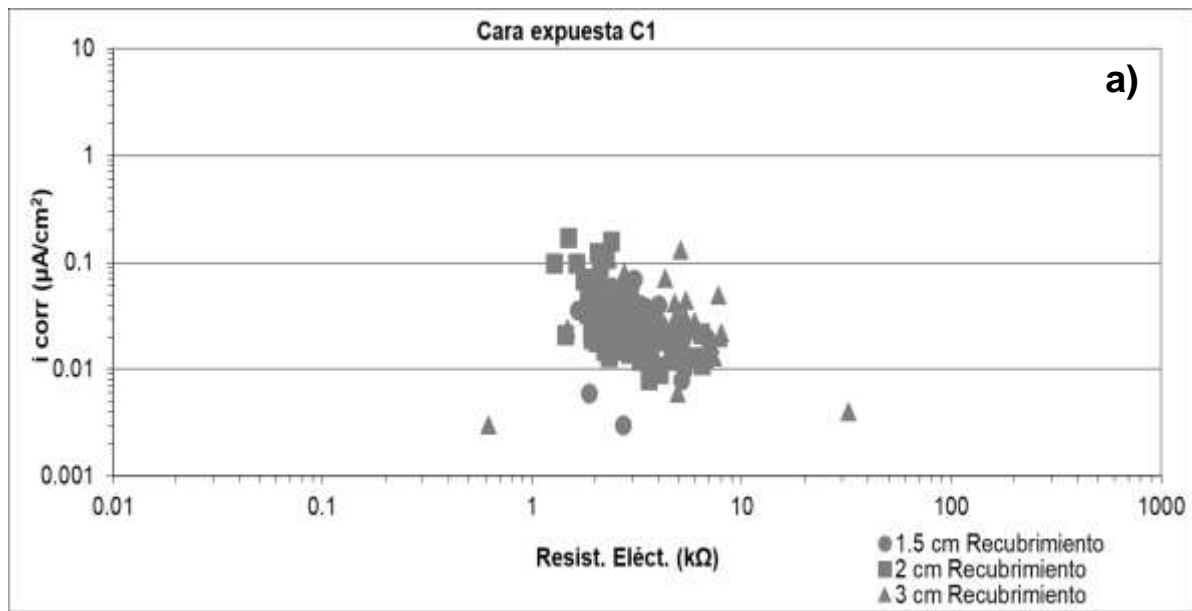


Figura D.6.4 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

Anexo D.7 Estación Toluca (Mx9)

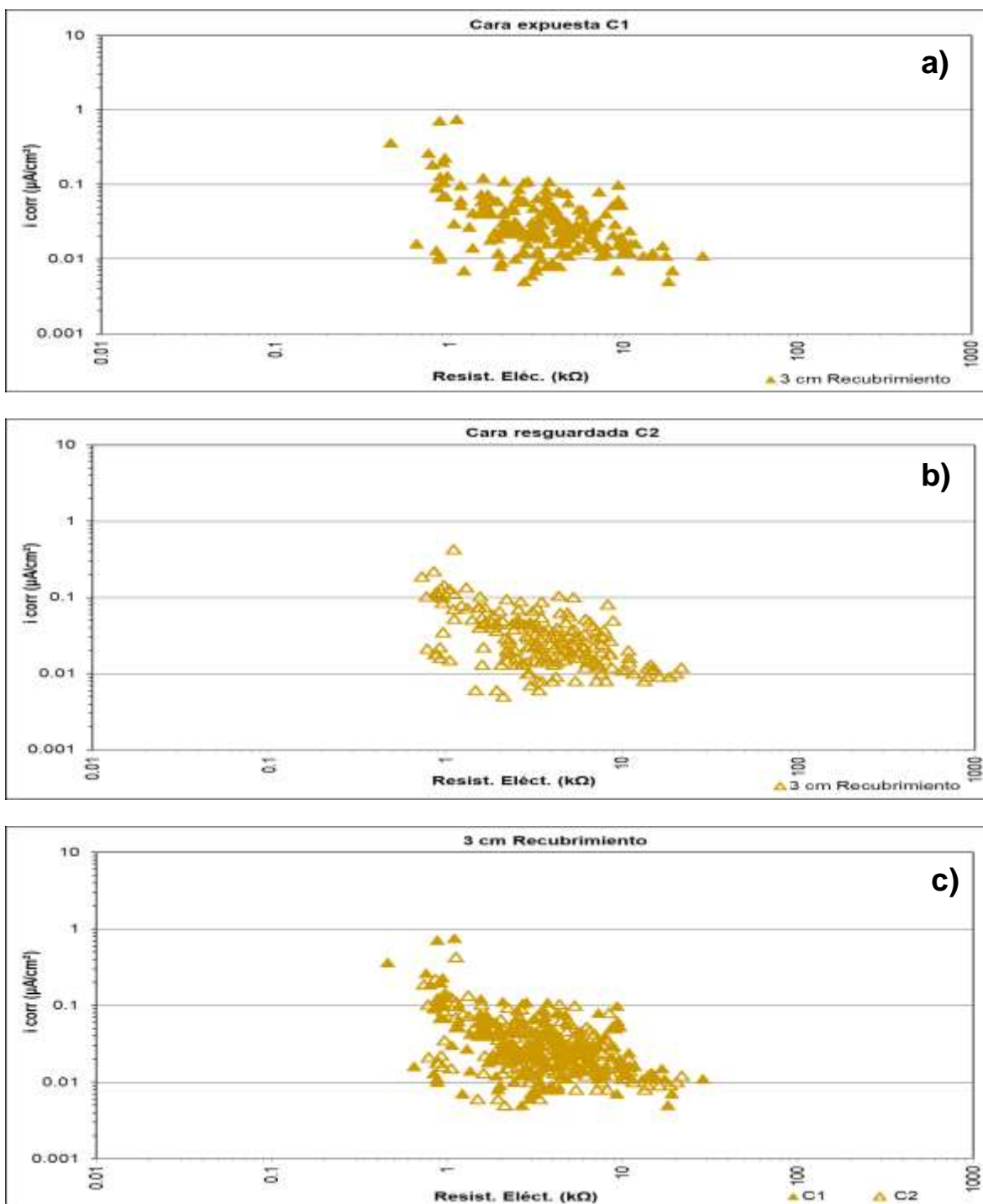


Figura D.7.1 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléc.) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

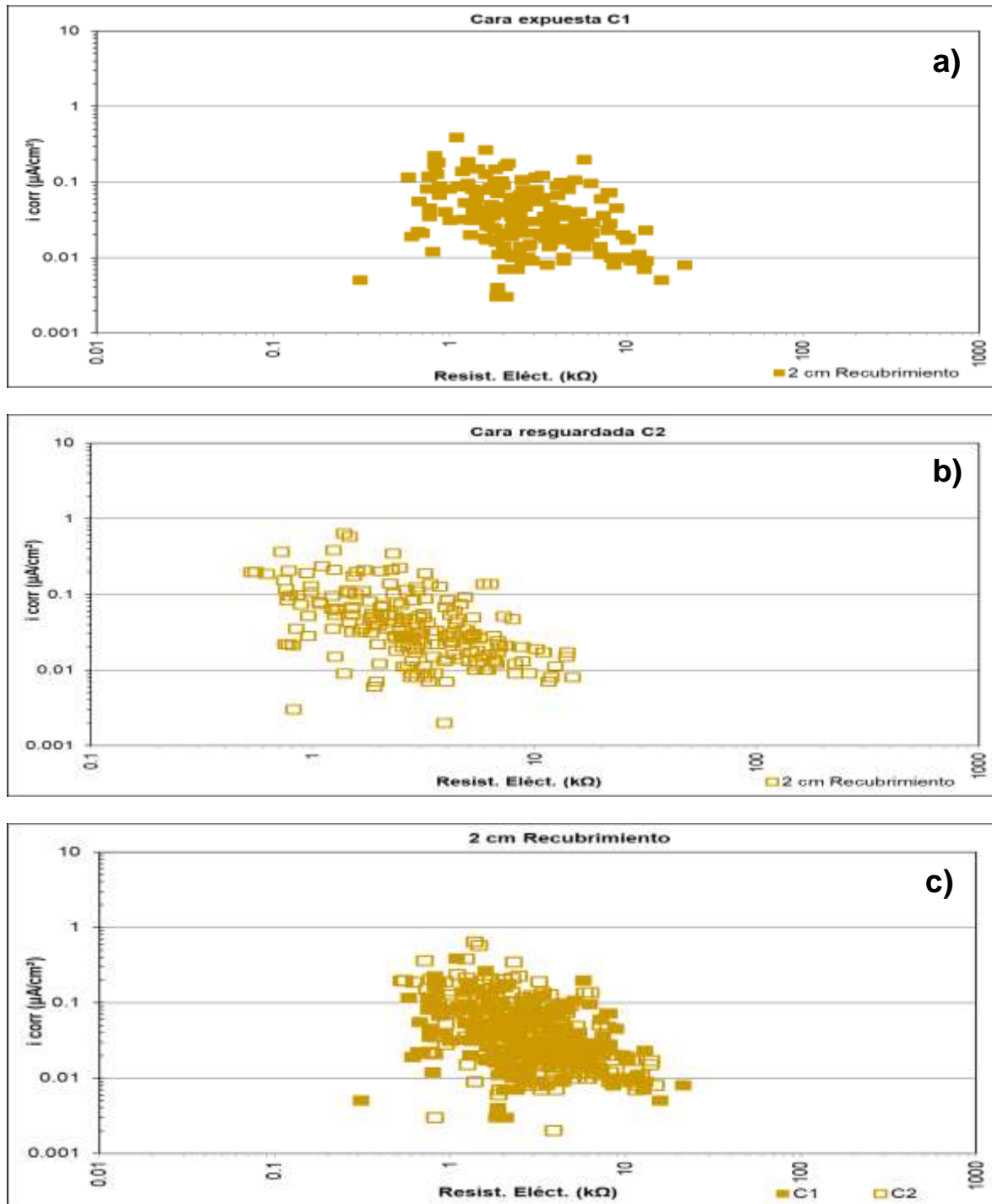


Figura D.7.2 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

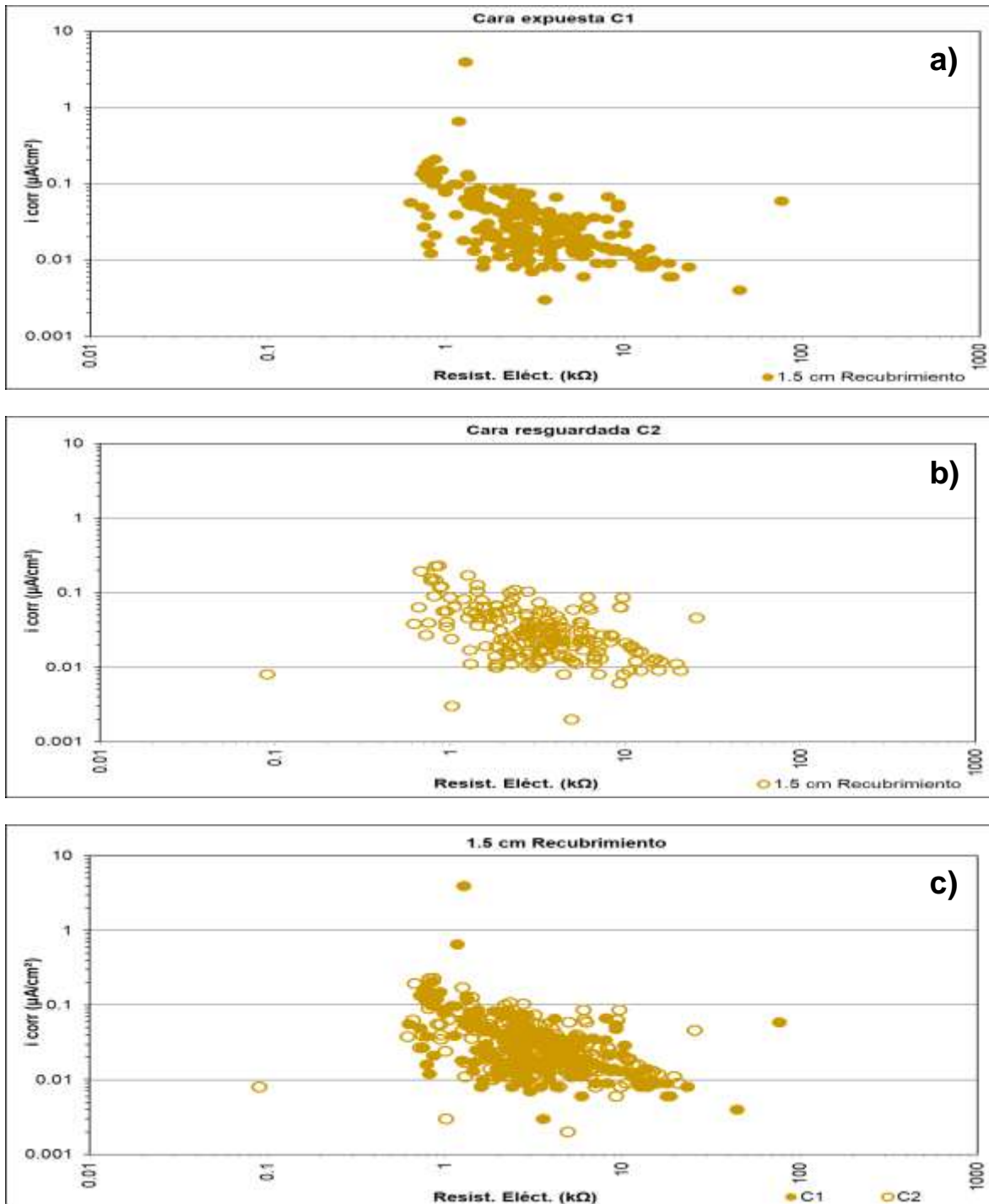


Figura D.7.3 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

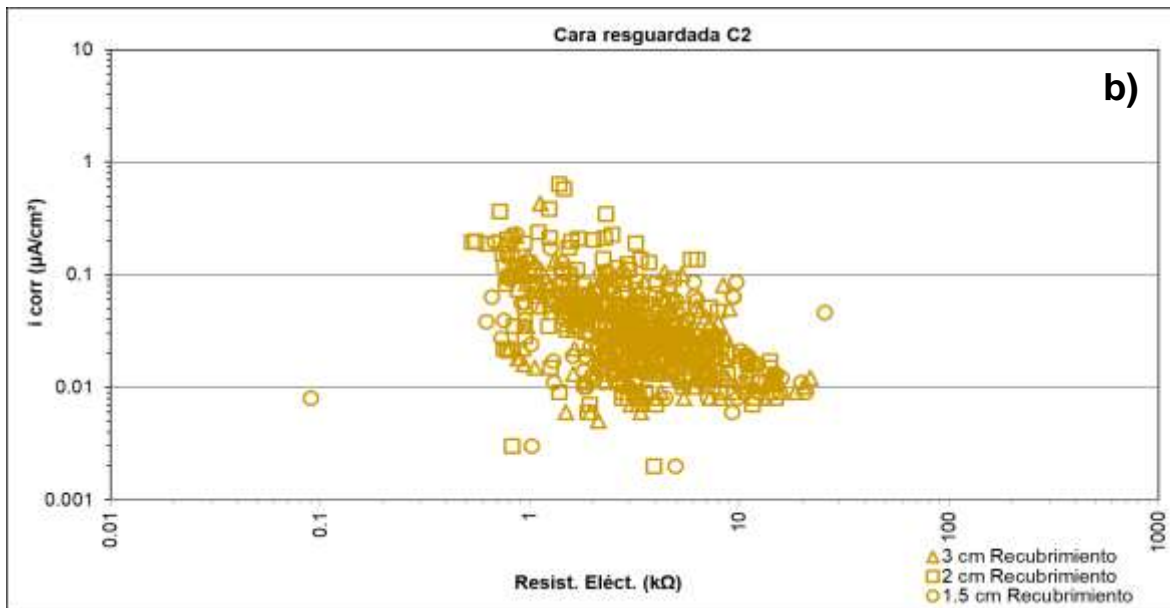
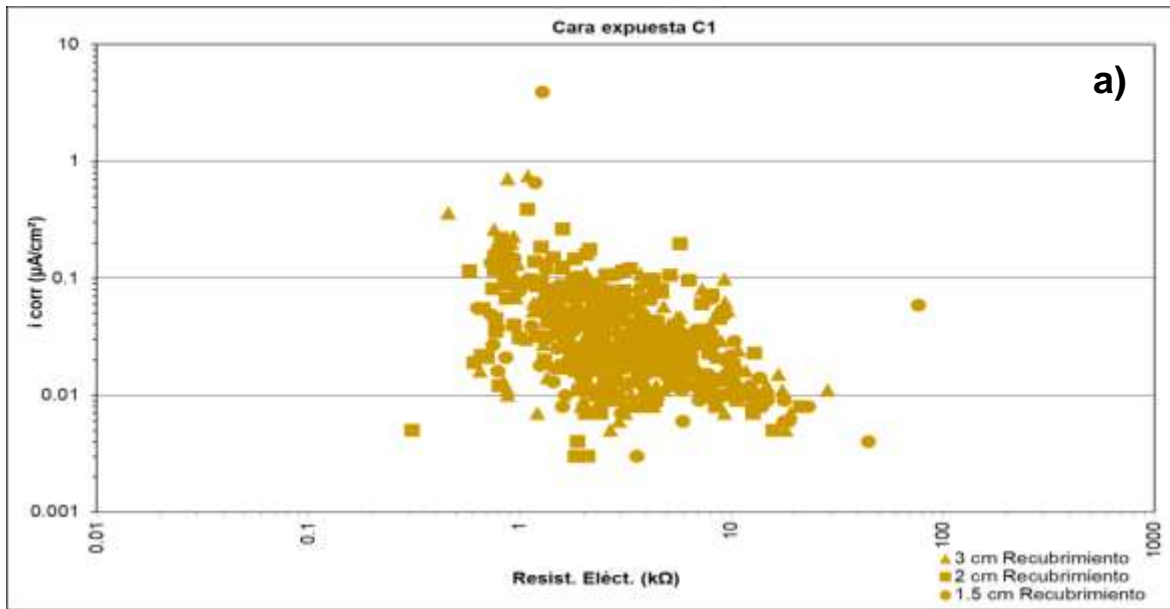


Figura D.7.4 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

Anexo D.8 Estación Xalapa (Mx14)

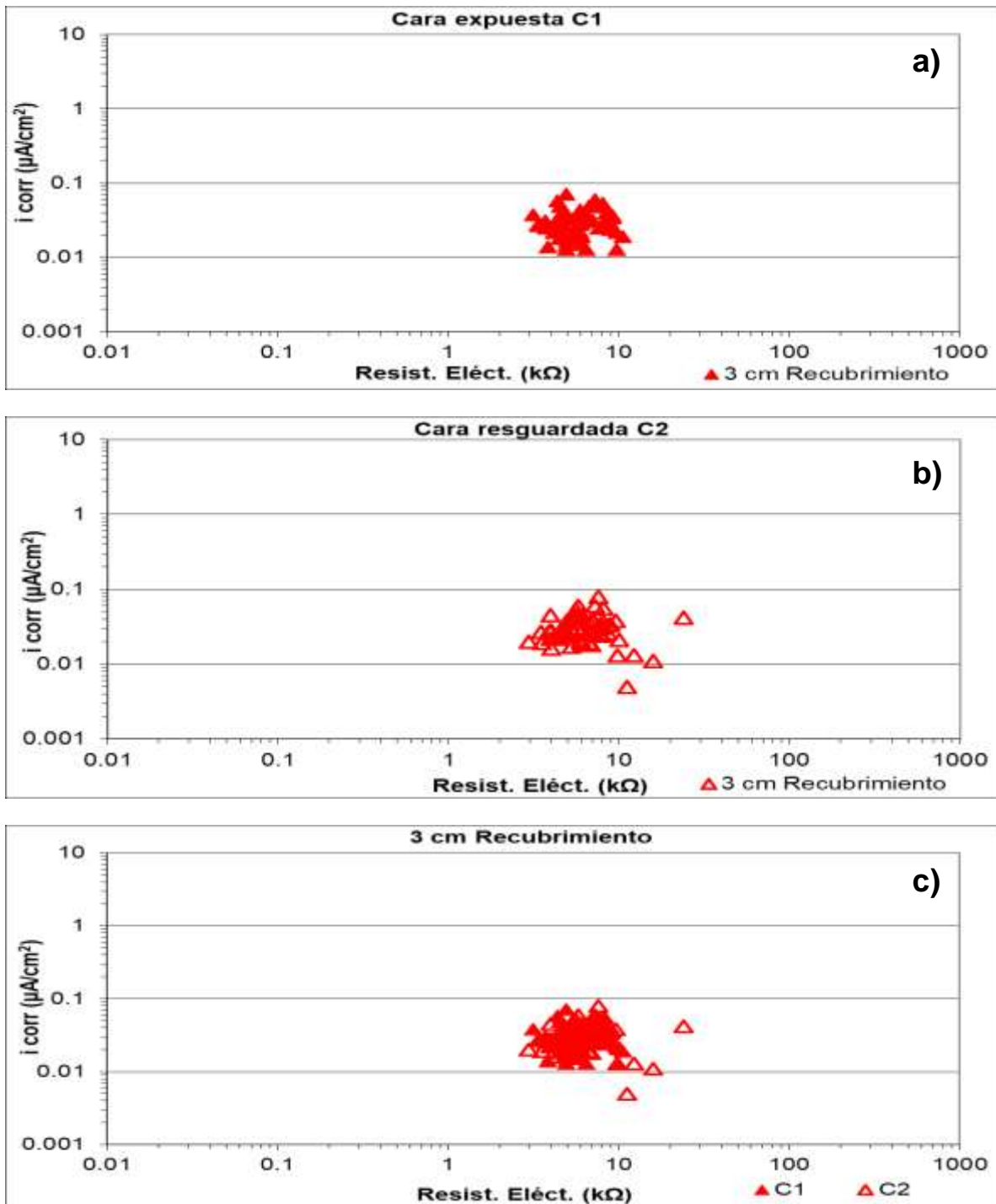


Figura D.8.1 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

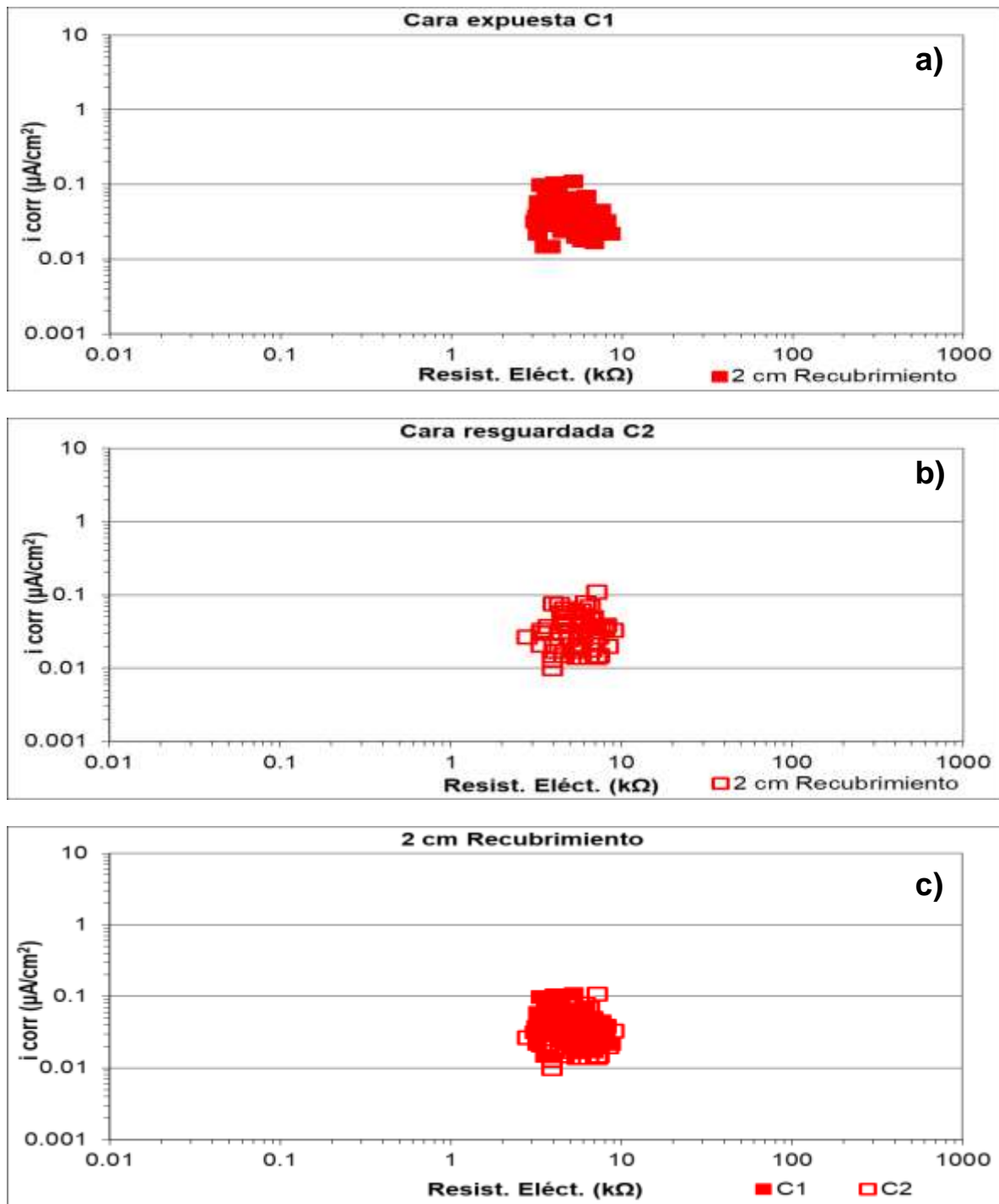


Figura D.8.2 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

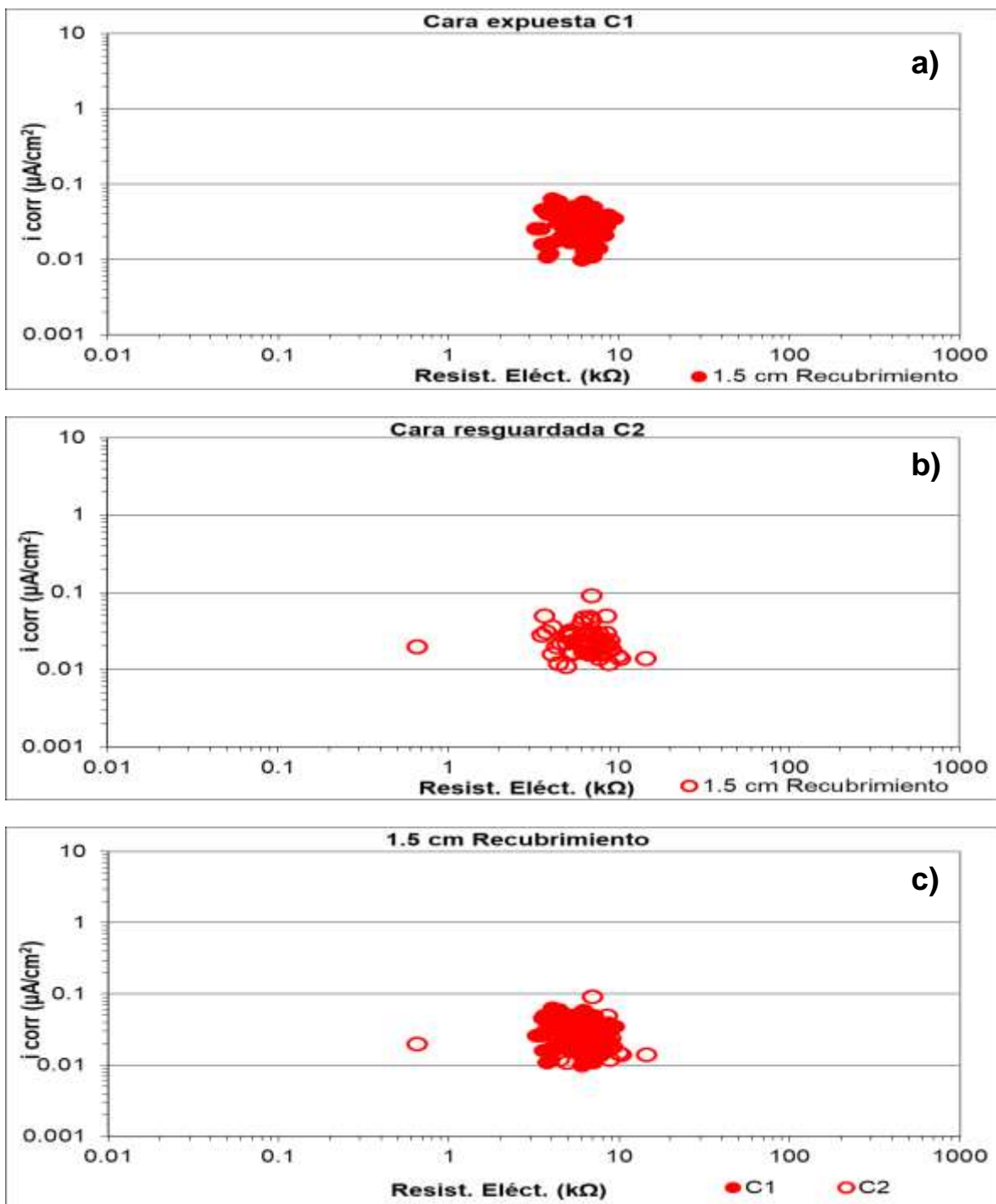


Figura D.8.3 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

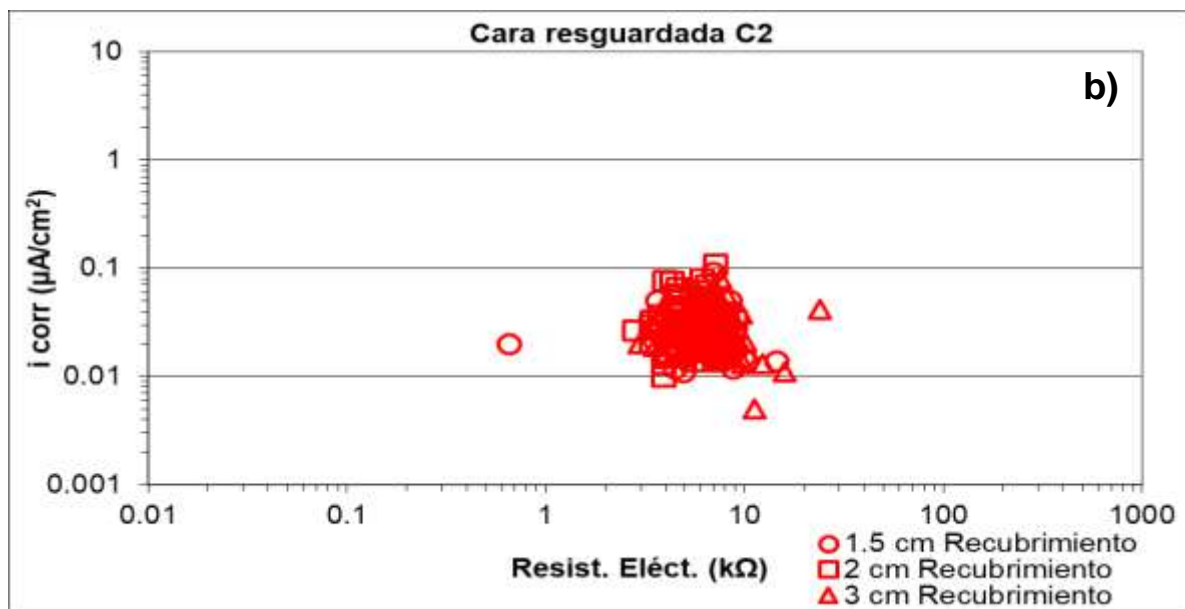
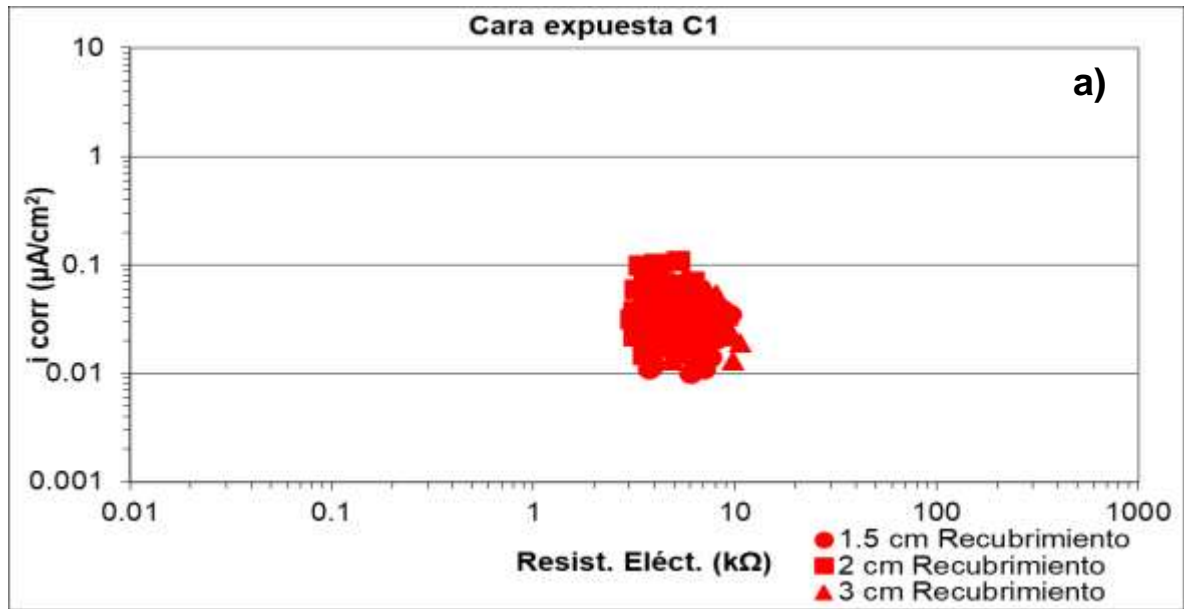


Figura D.8.4 Velocidad de corrosión (i_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

Anexo E. Correlación Ecorr vs. resistencia eléctrica

Anexo E.1 Estación Mexicali (Mx10)

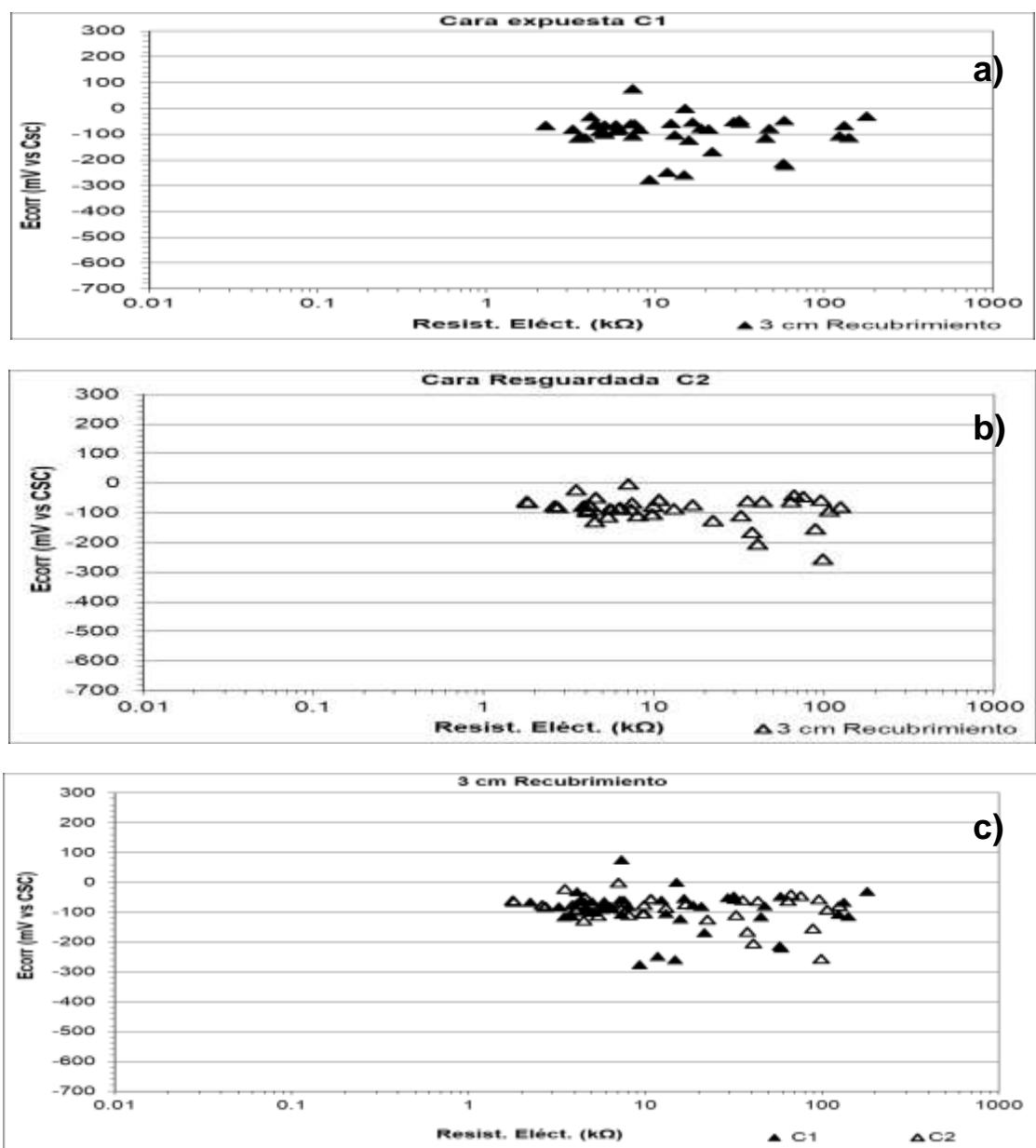


Figura E.1.1 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

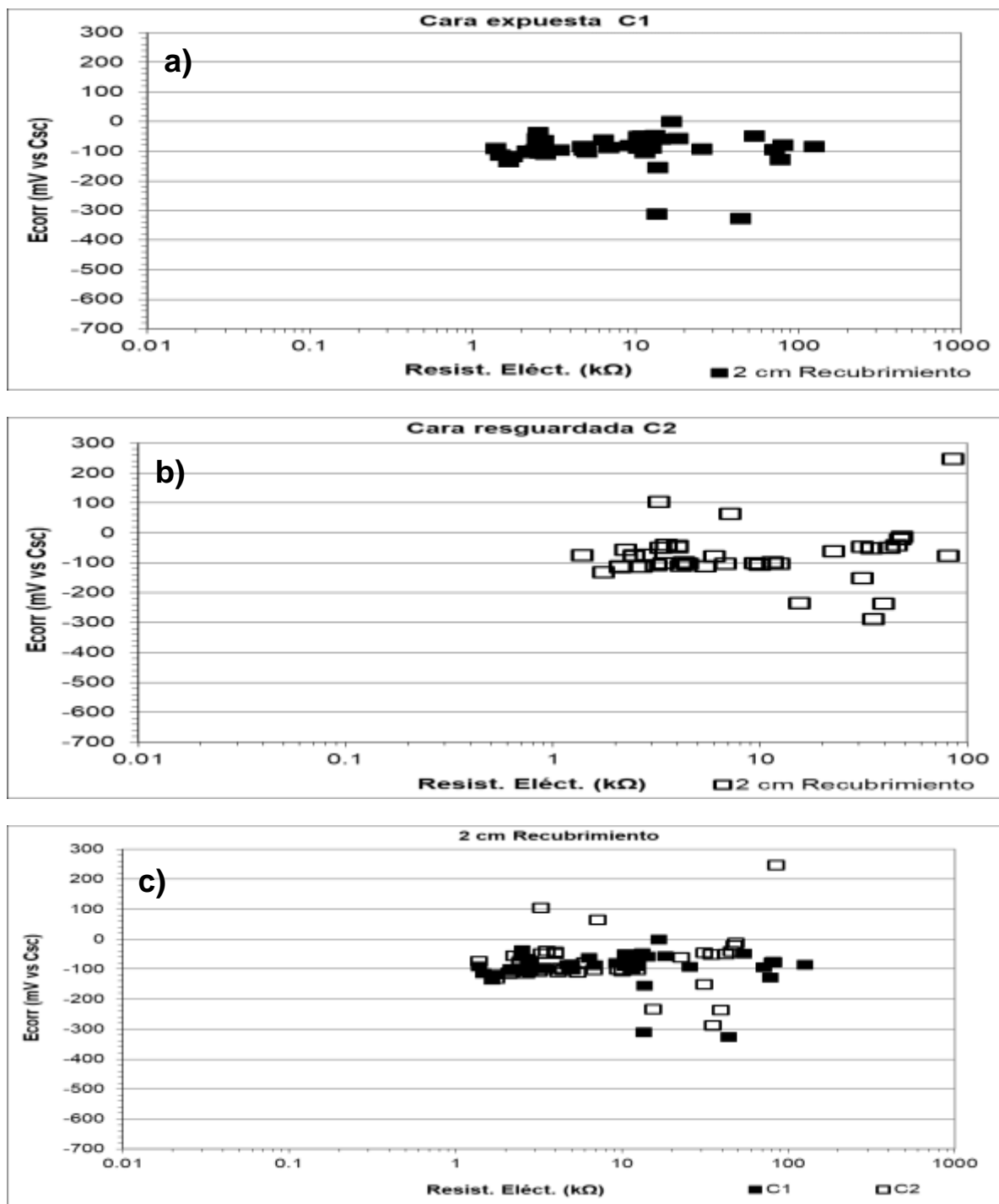


Figura E.1.2 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

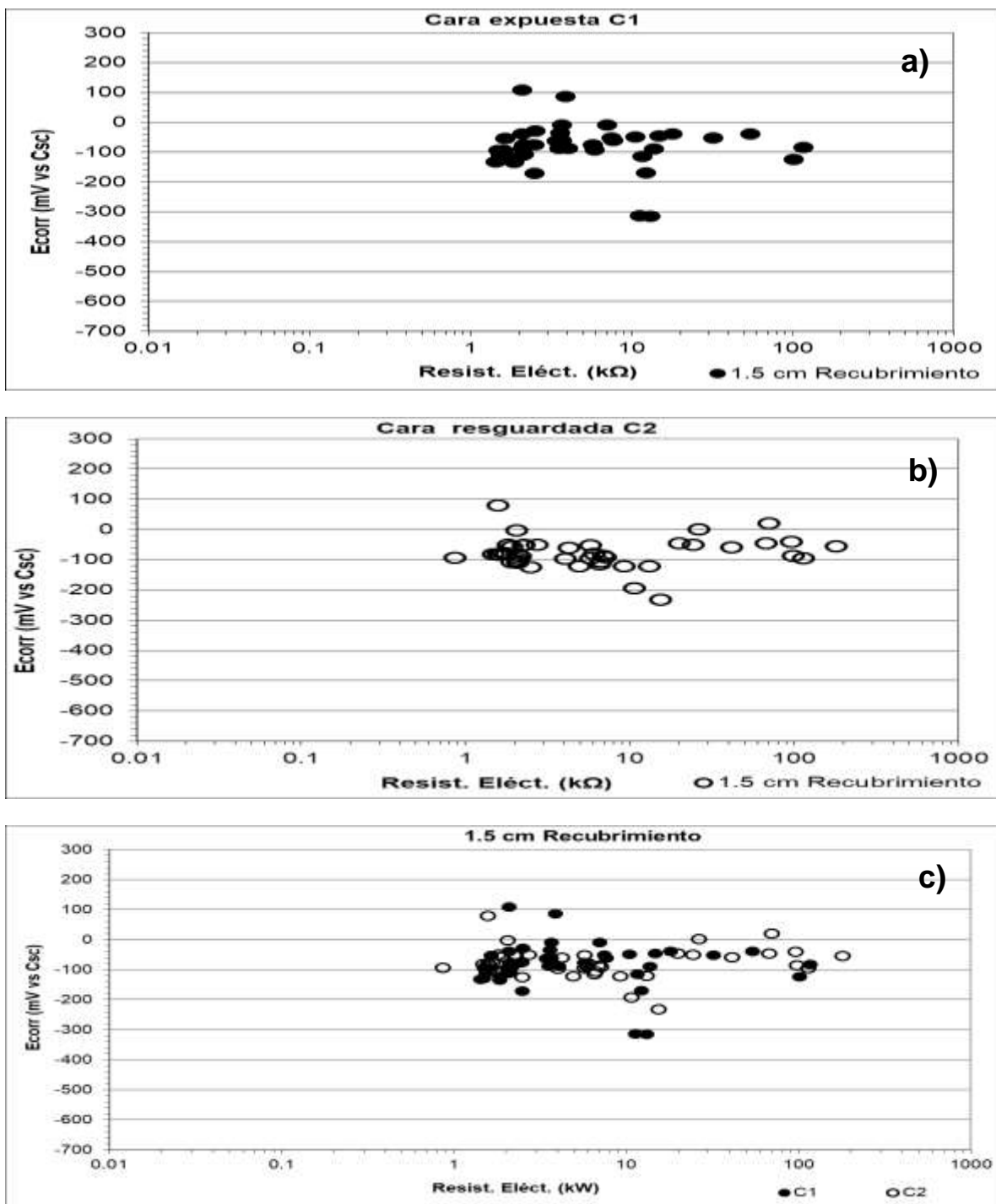


Figura E.1.3 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

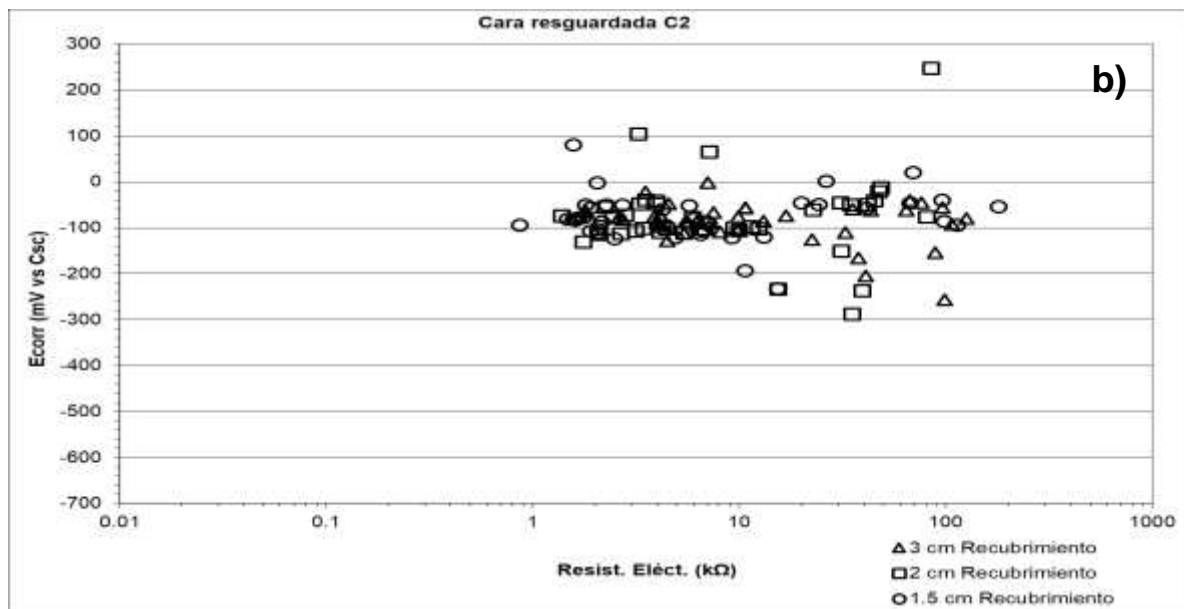
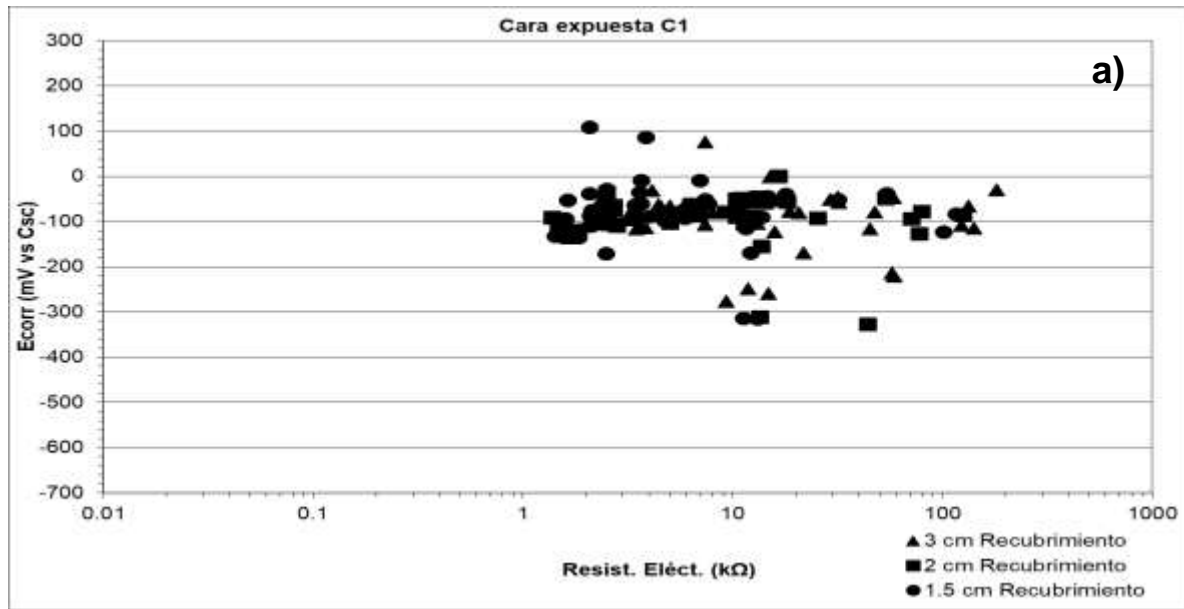


Figura E.1.4 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

Anexo E.2 Estación México, D.F. (Mx7)

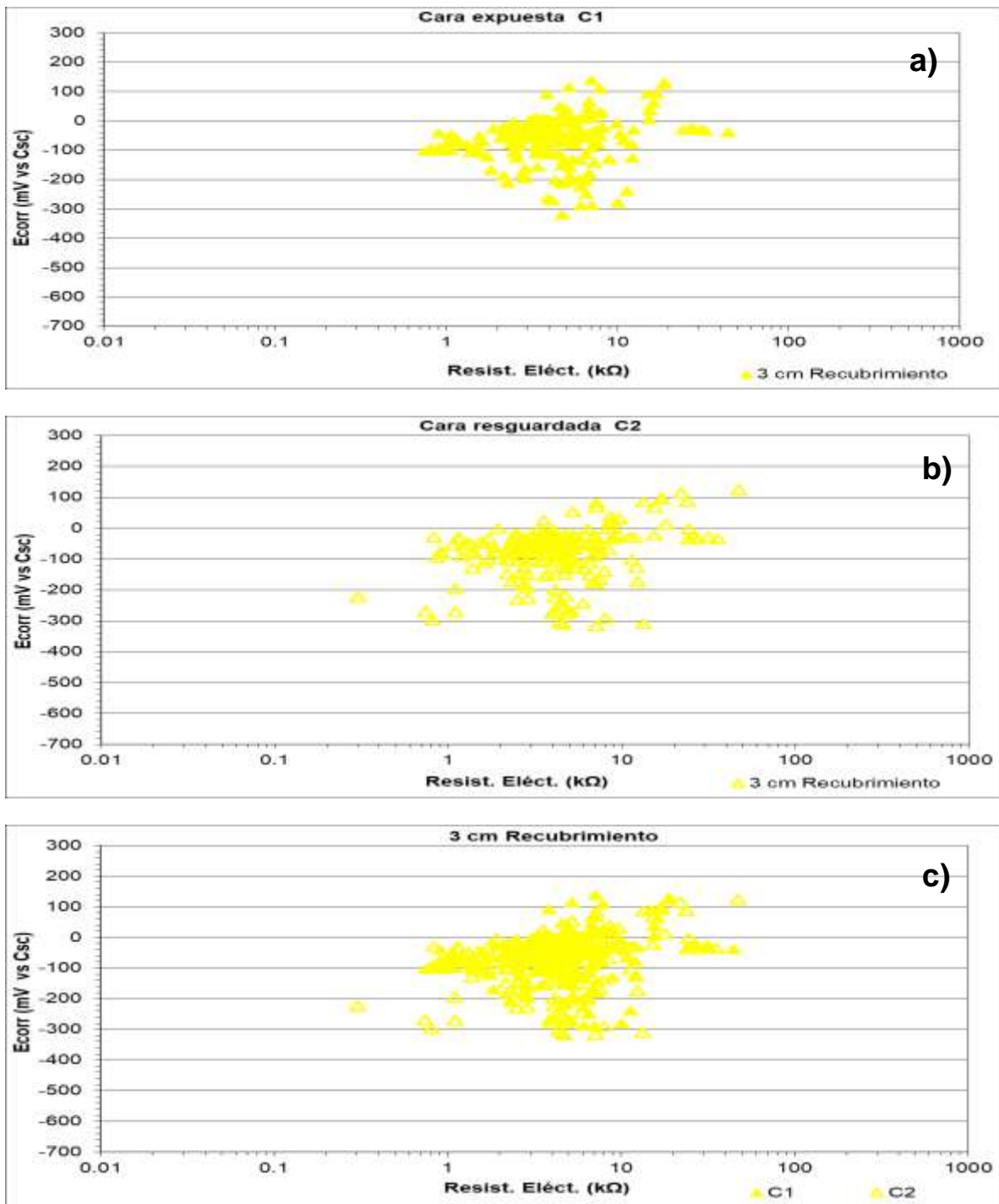


Figura E.2.1 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

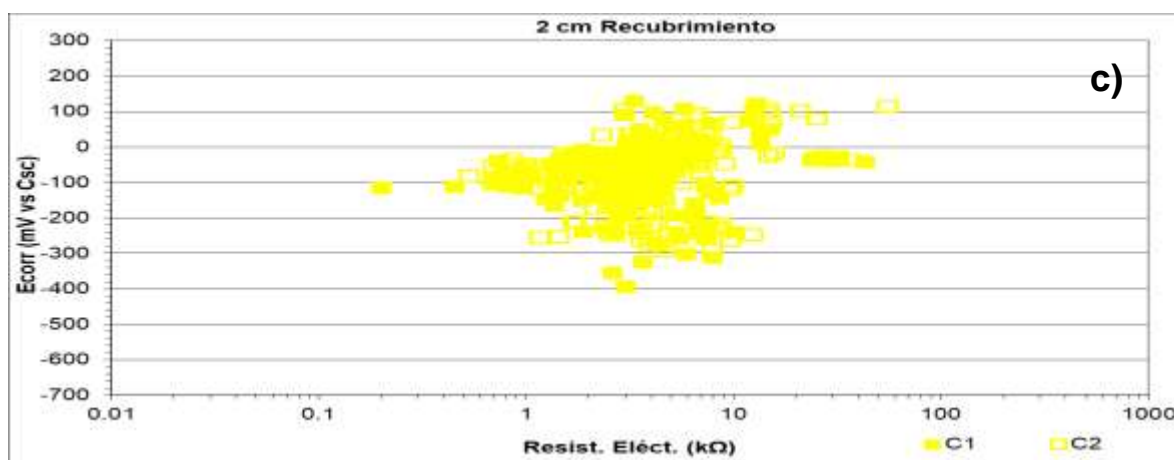
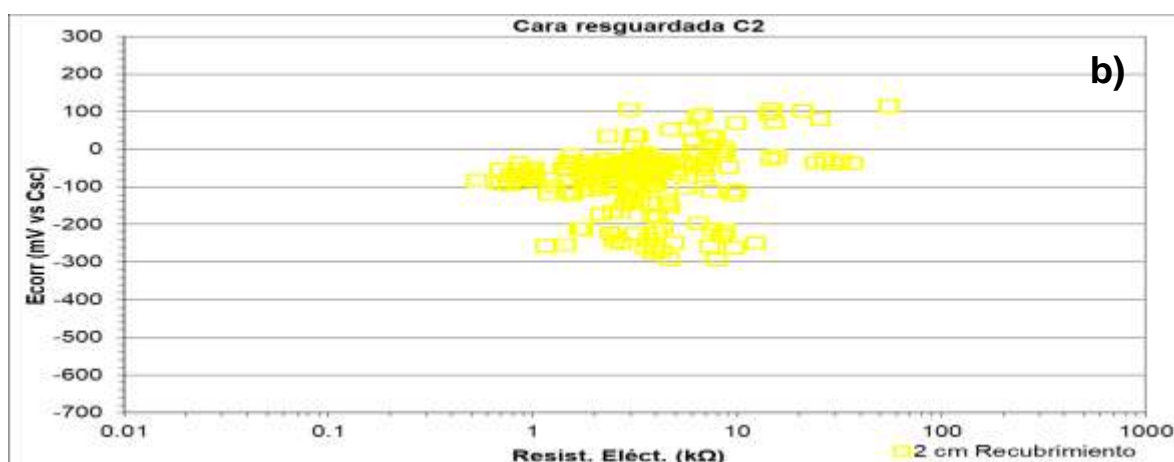
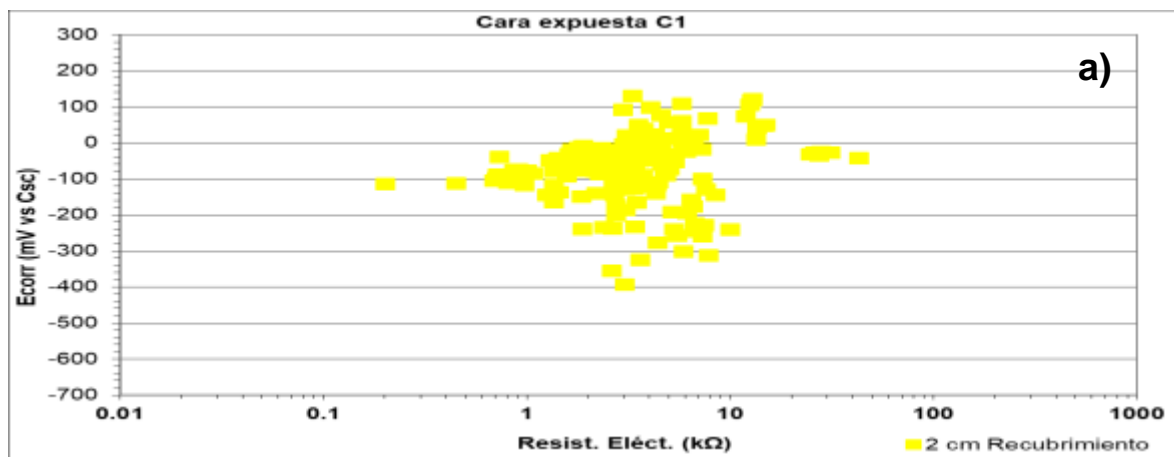


Figura E.2.2 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

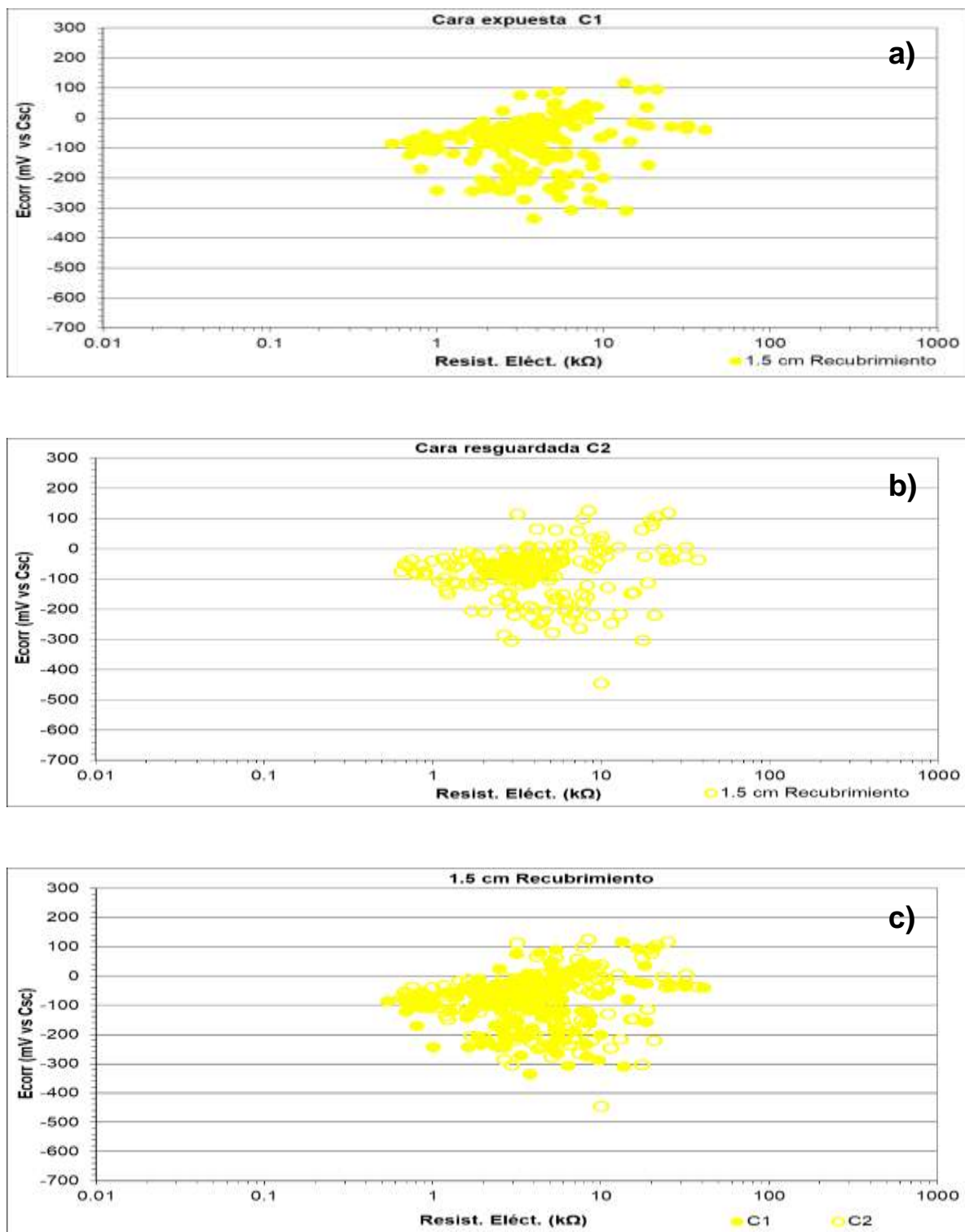


Figura E.2.3 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

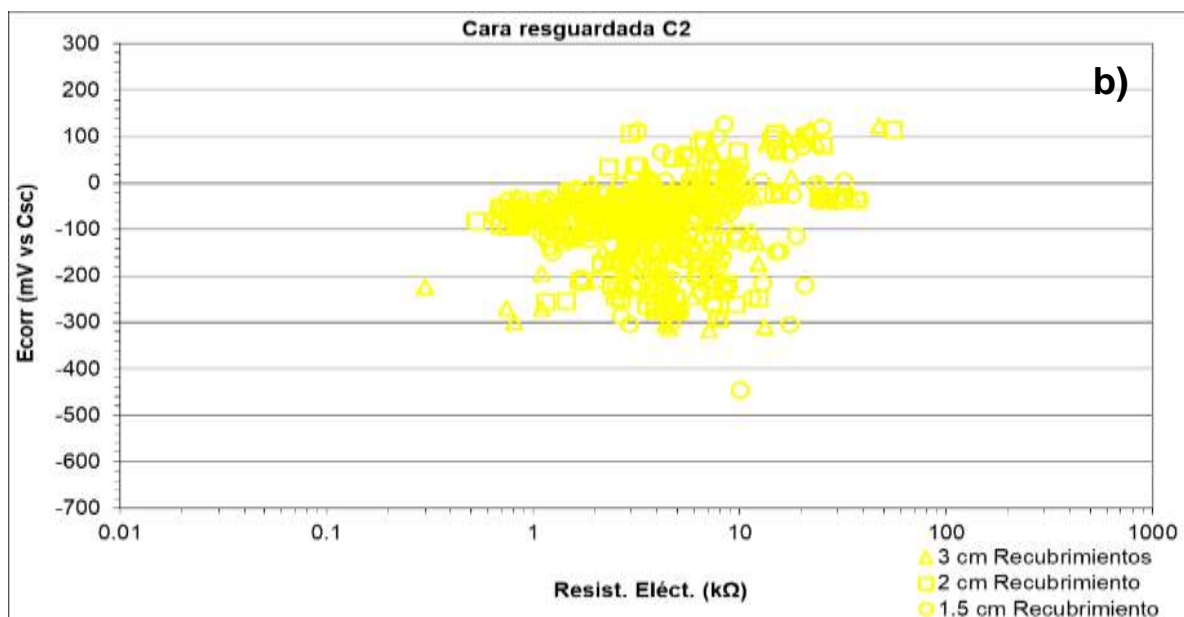
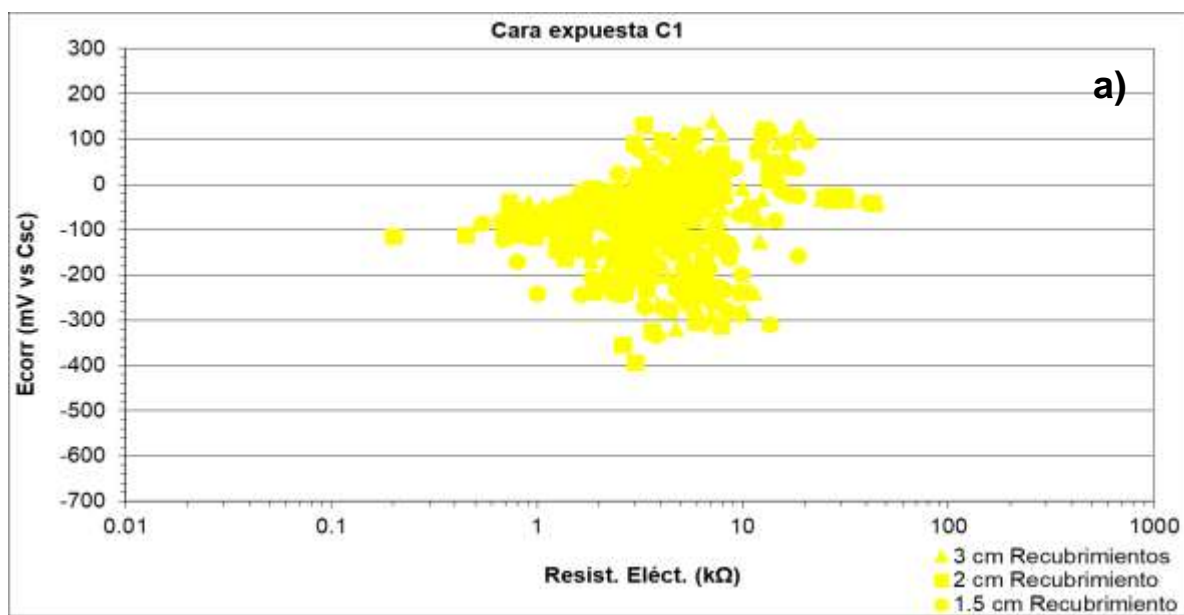


Figura E.2.4 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

Anexo E.3 Estación Morelia (Mx5)

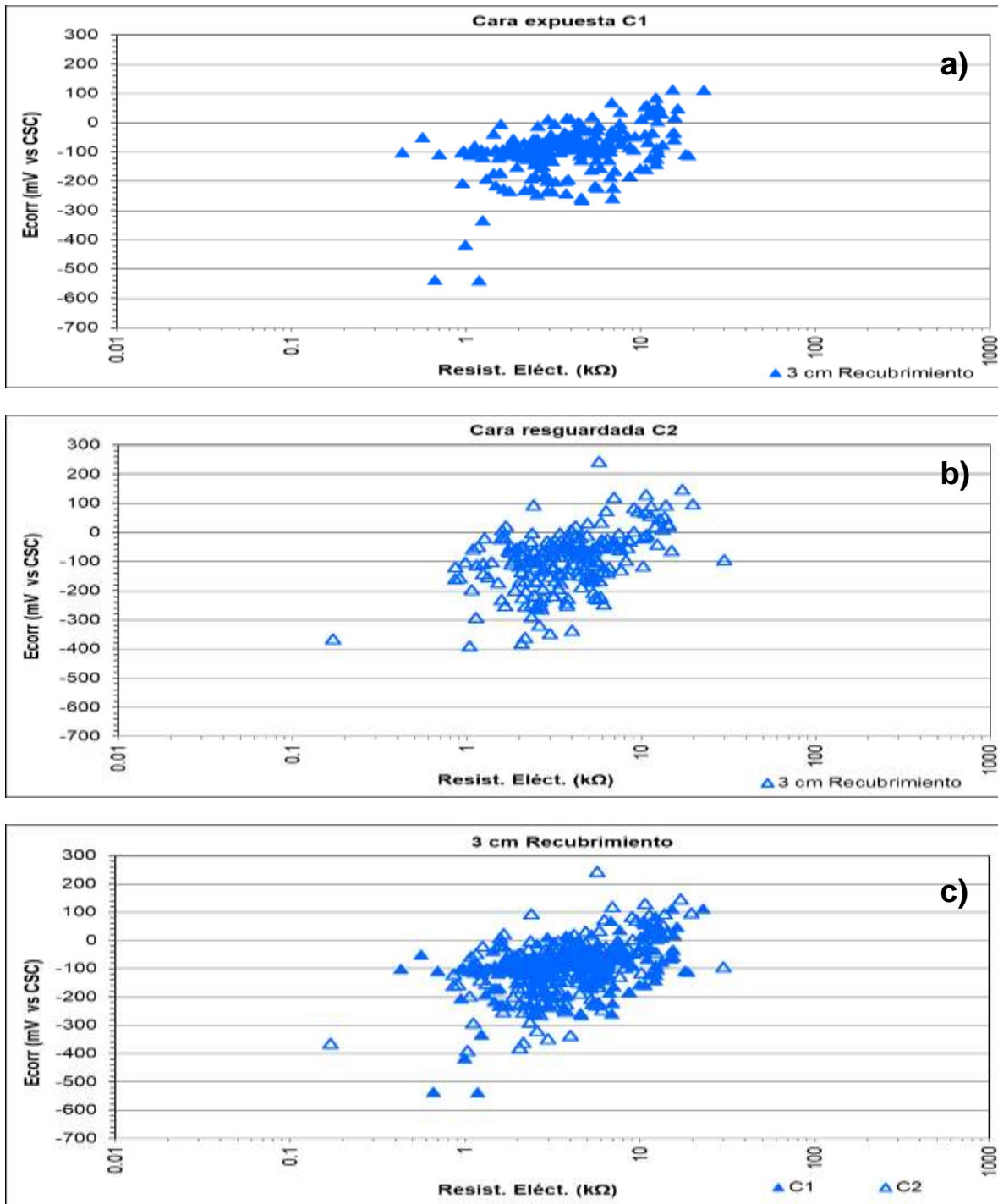


Figura E.3.1 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

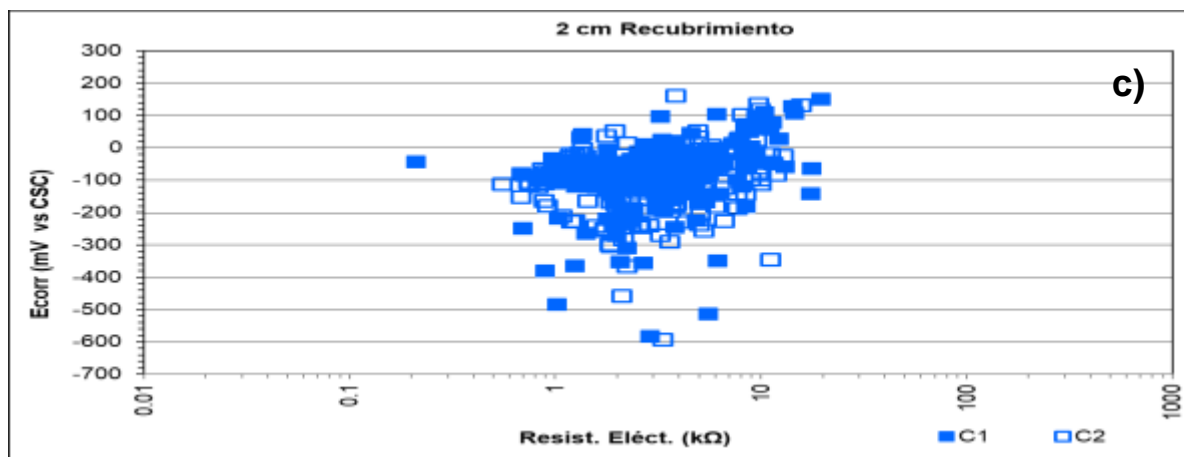
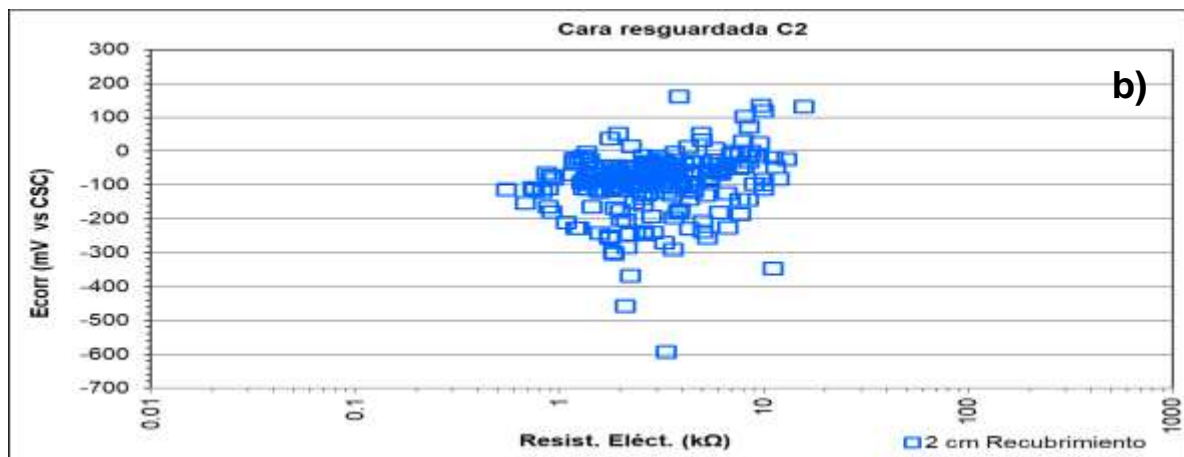
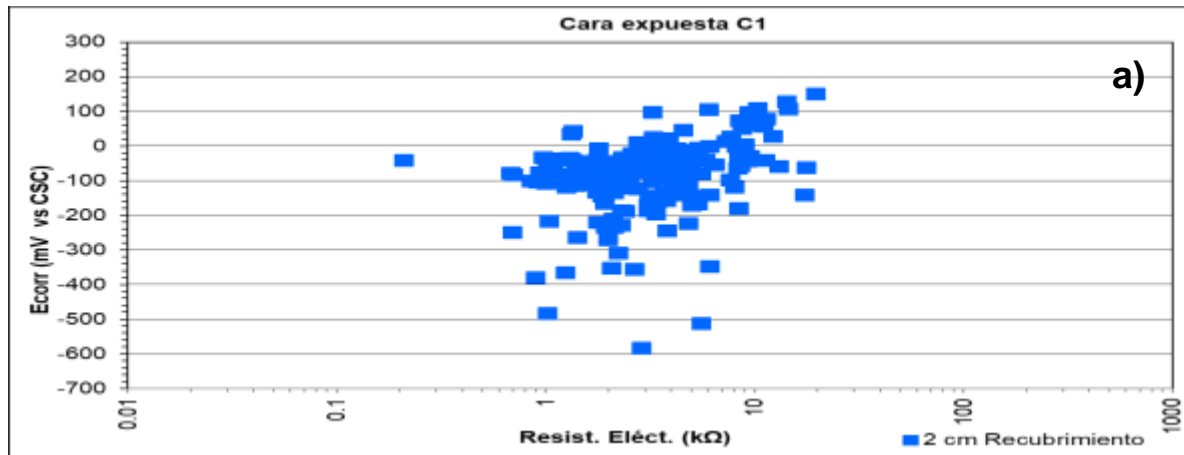


Figura E.3.2 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

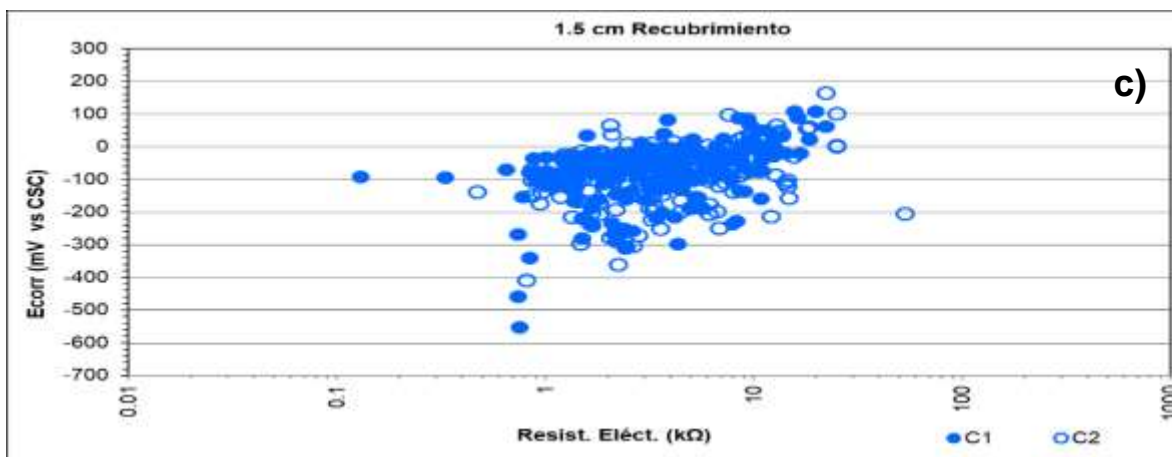
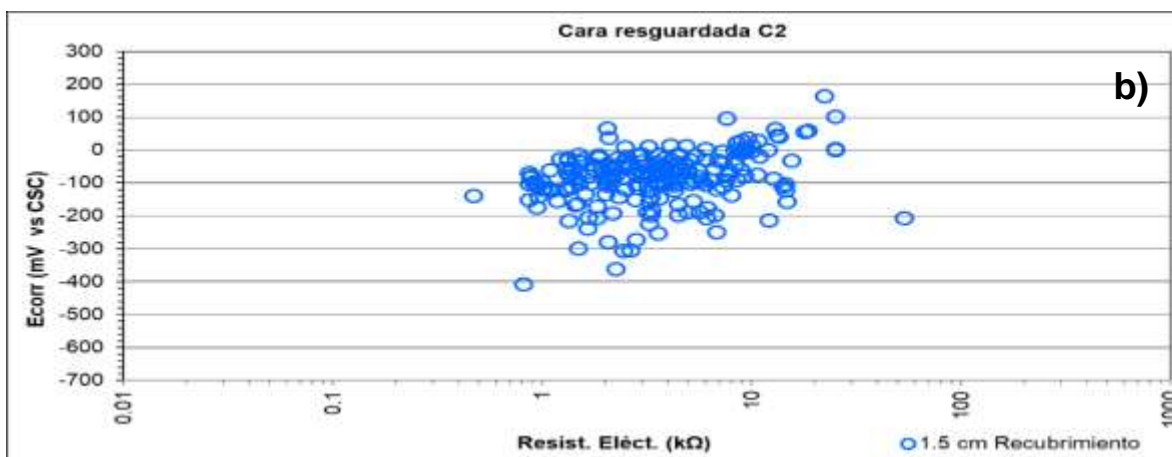
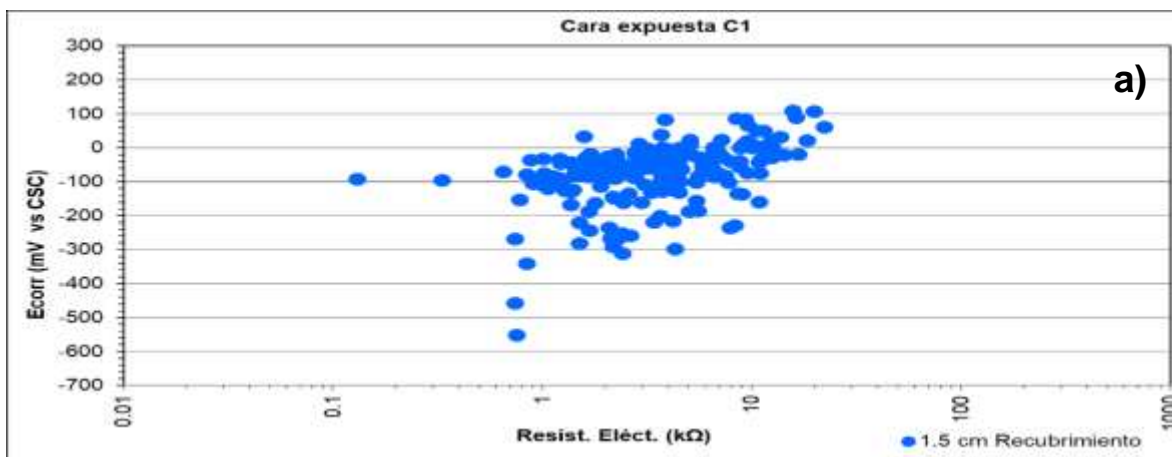


Figura E.3.3 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

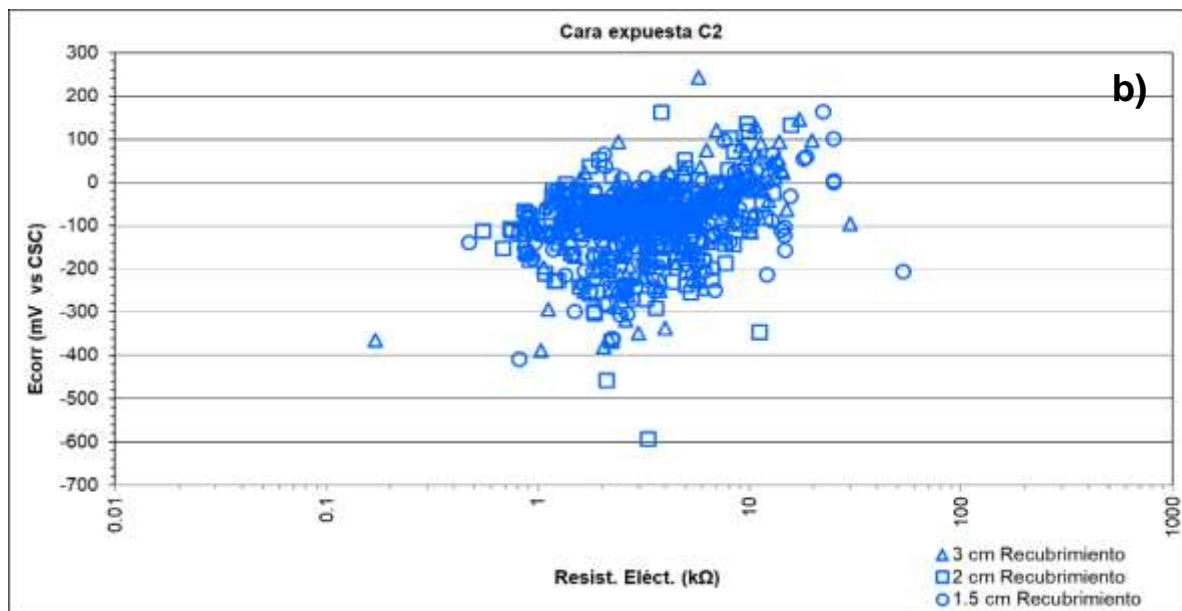
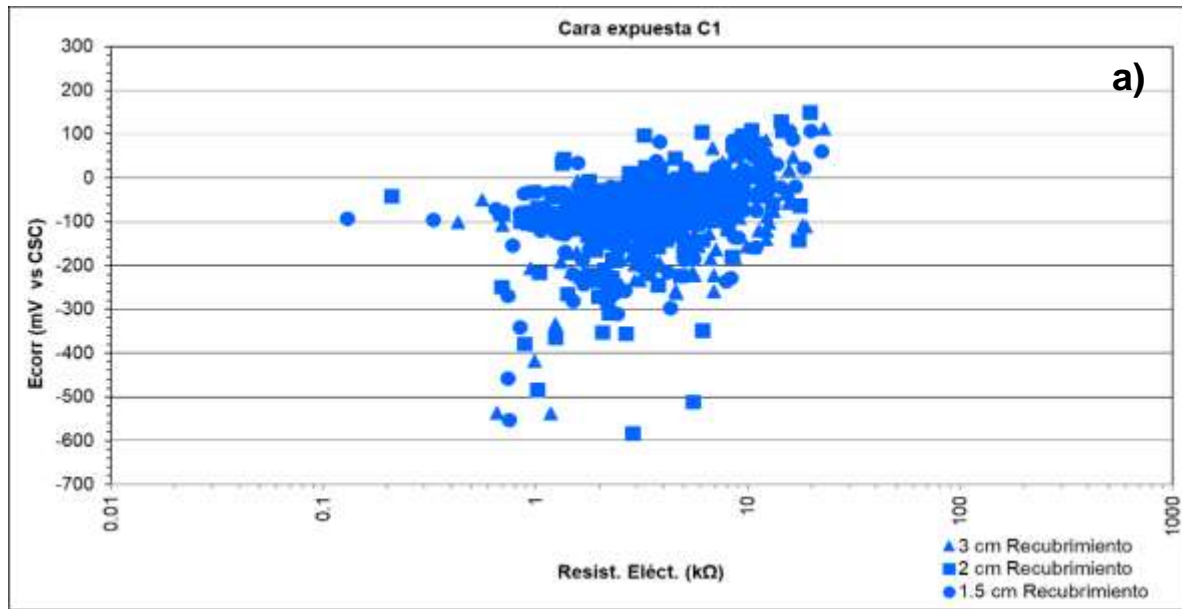


Figura E.3.4 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

Anexo E.4 Estación Oaxaca (Mx4)

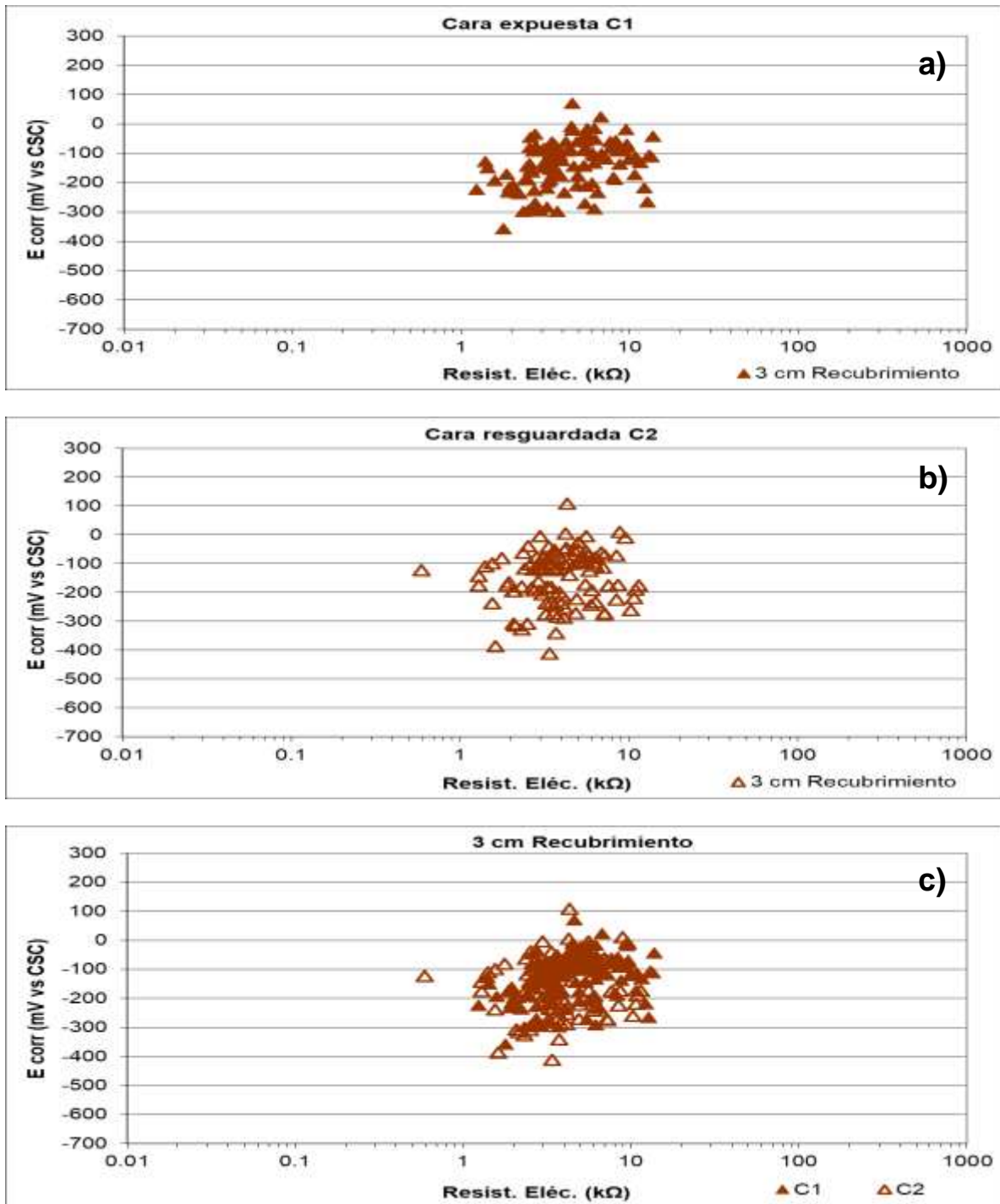


Figura E.4.1 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléc) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

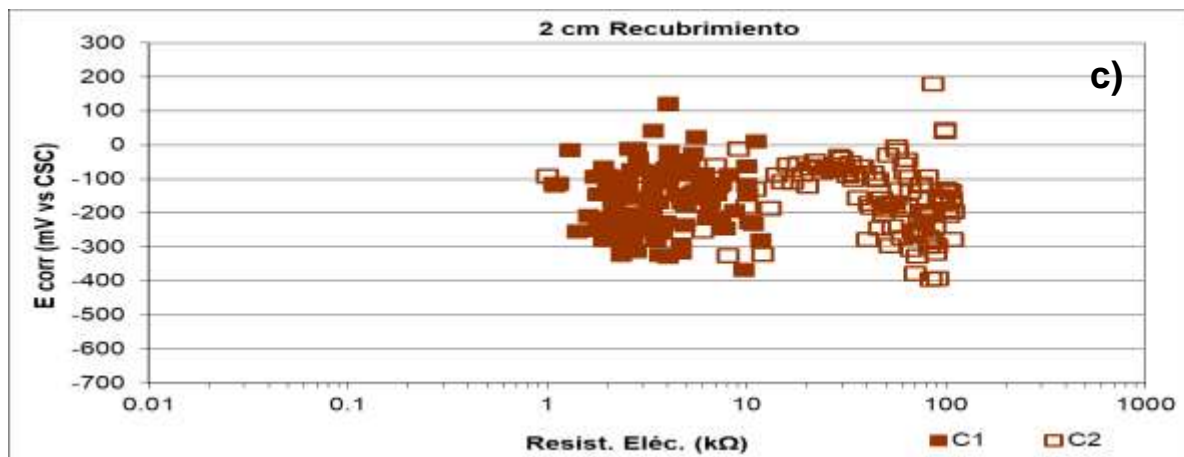
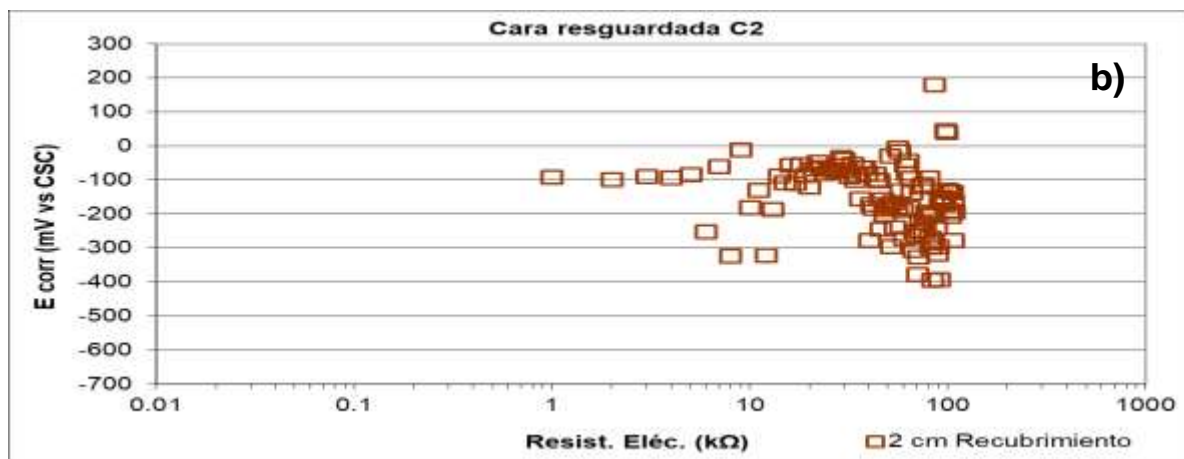
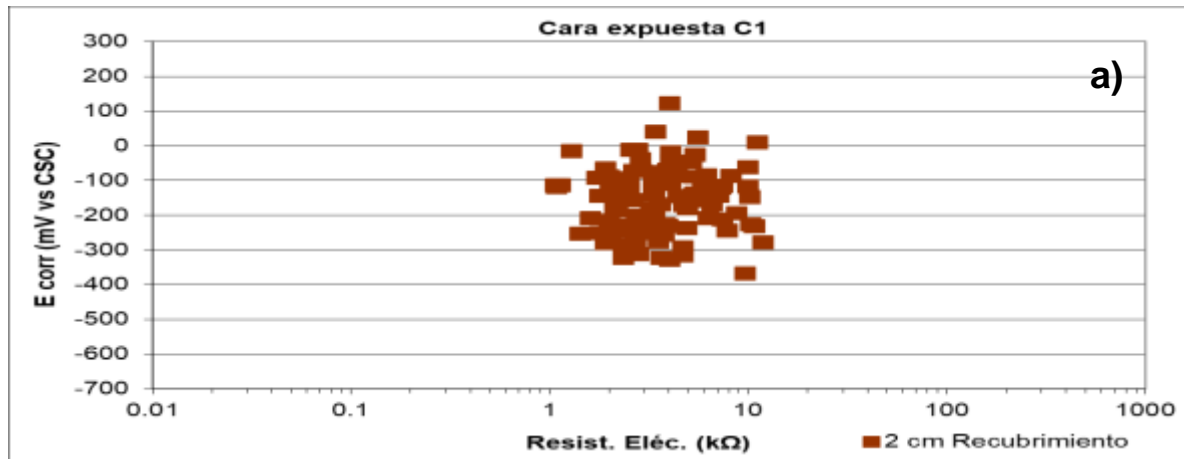


Figura E.4.2 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléc.) 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

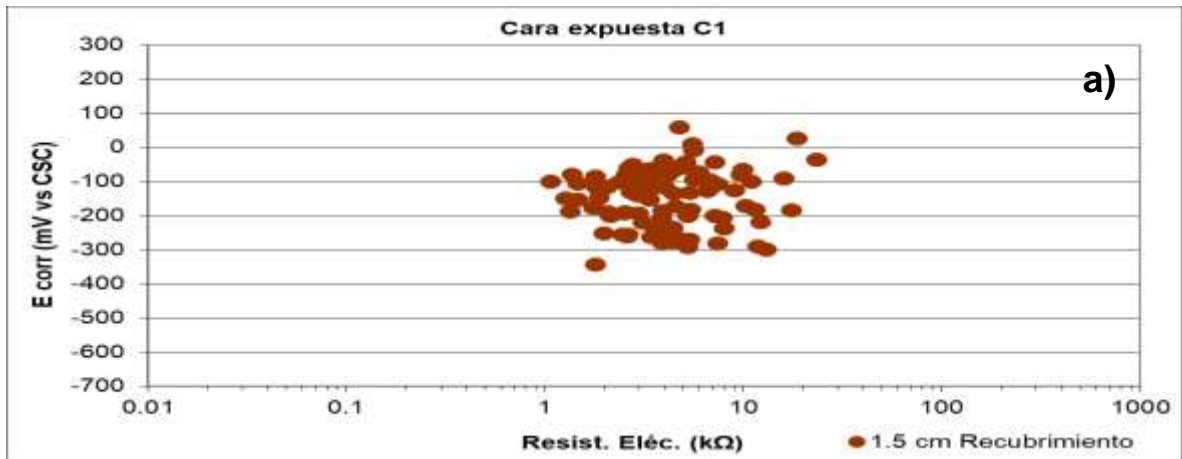


Figura E.4.3 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléc.) 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

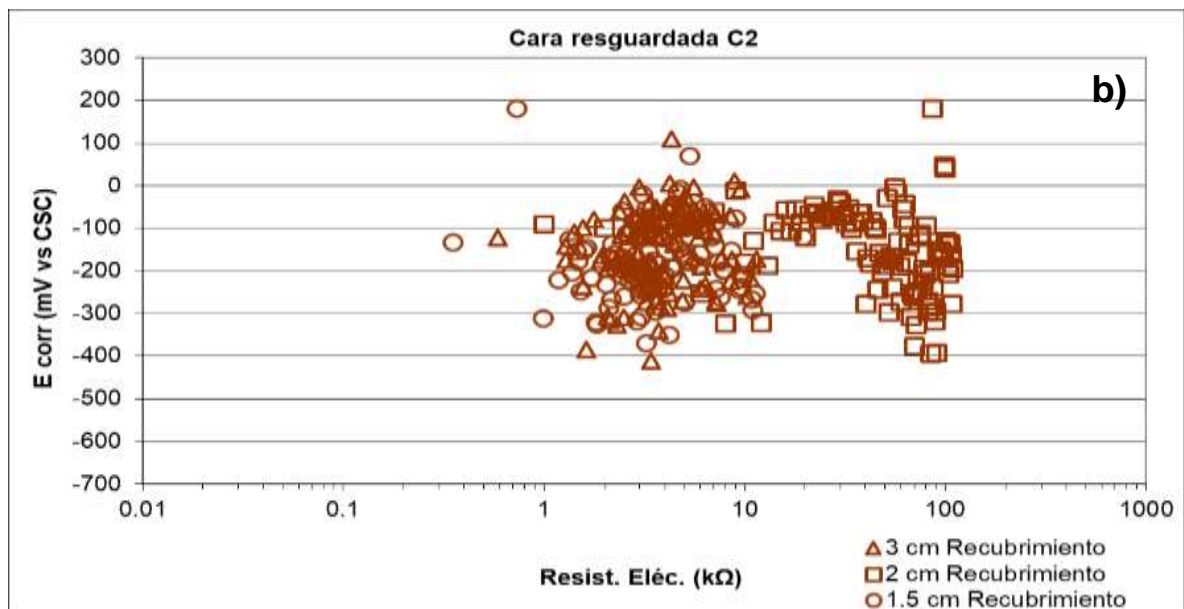
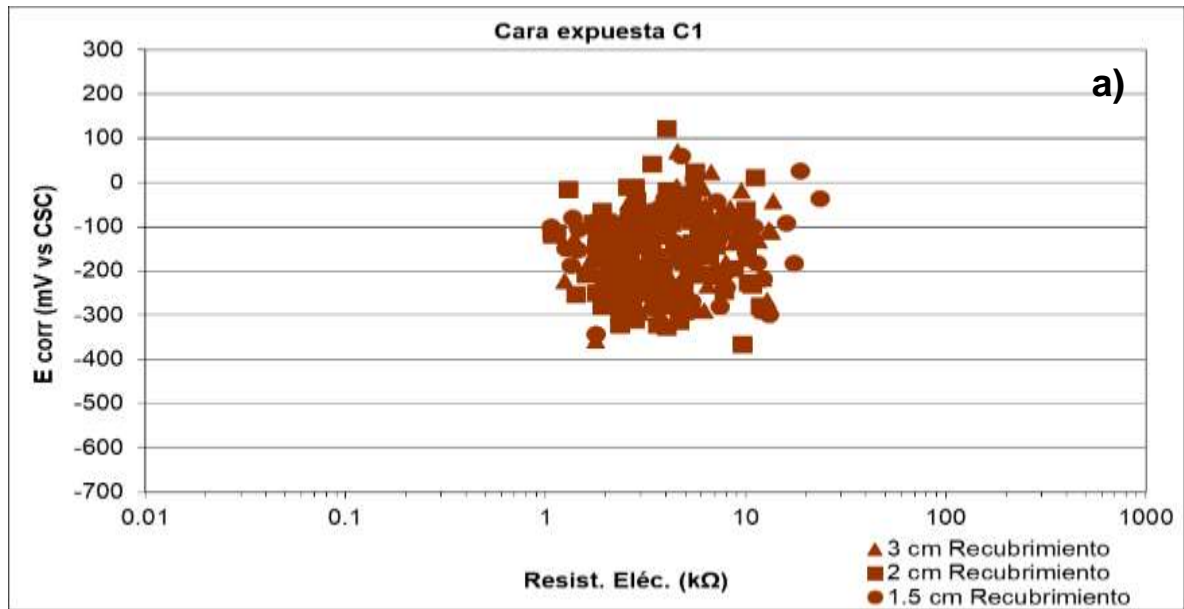


Figura E.4.4 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléc) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

Anexo E.5 Estación Progreso (Mx2)

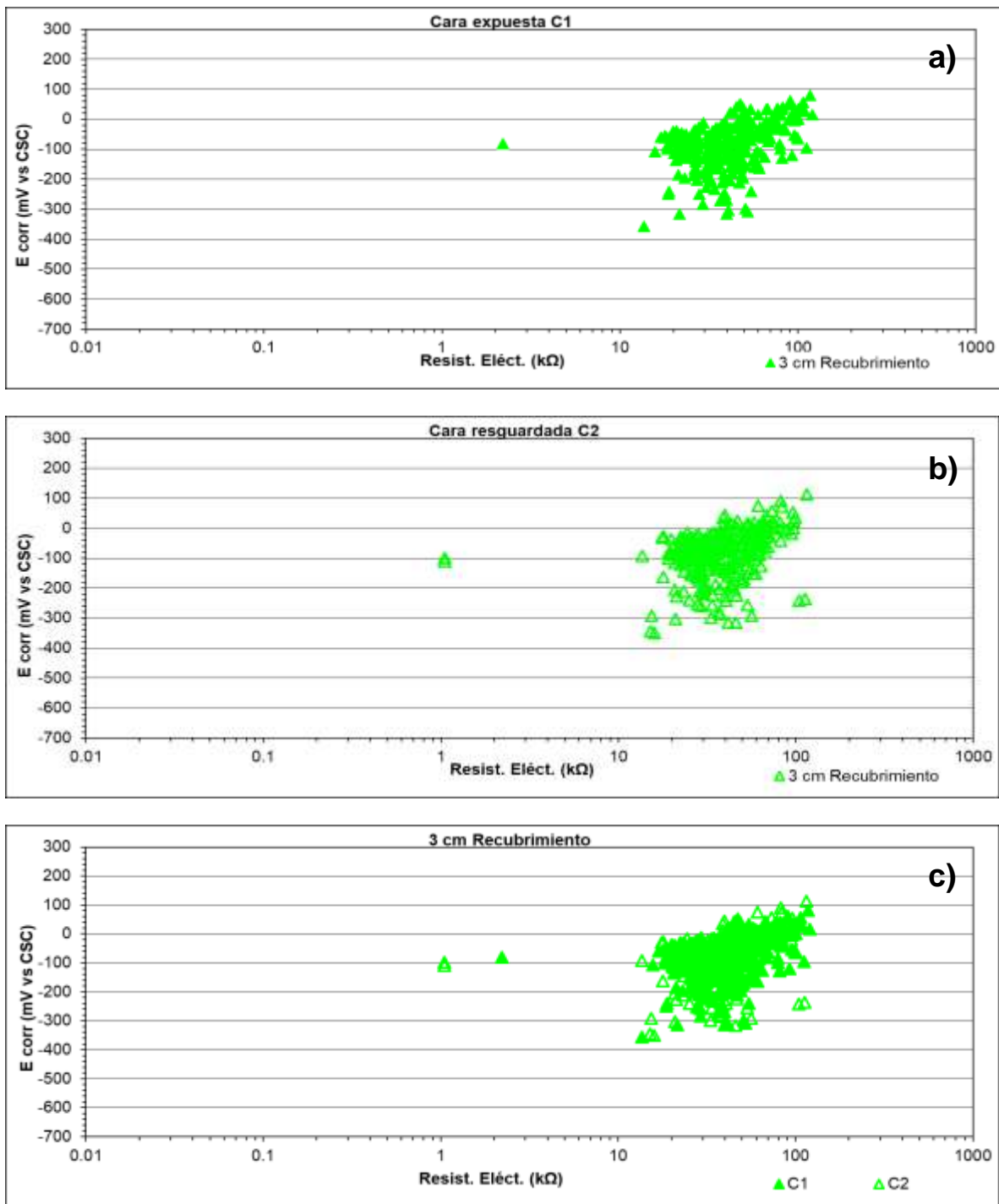


Figura E.5.1 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

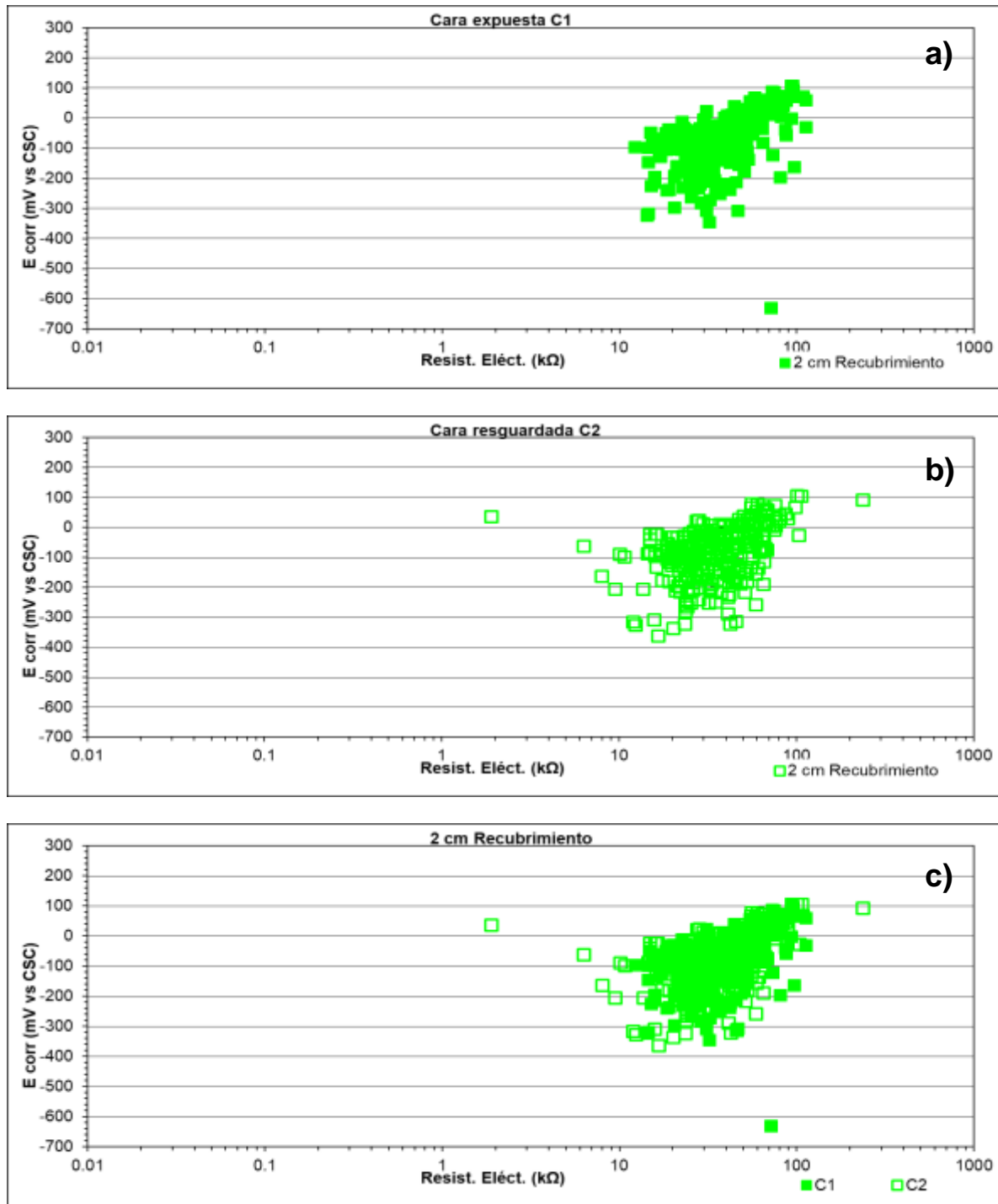


Figura E.5.2 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

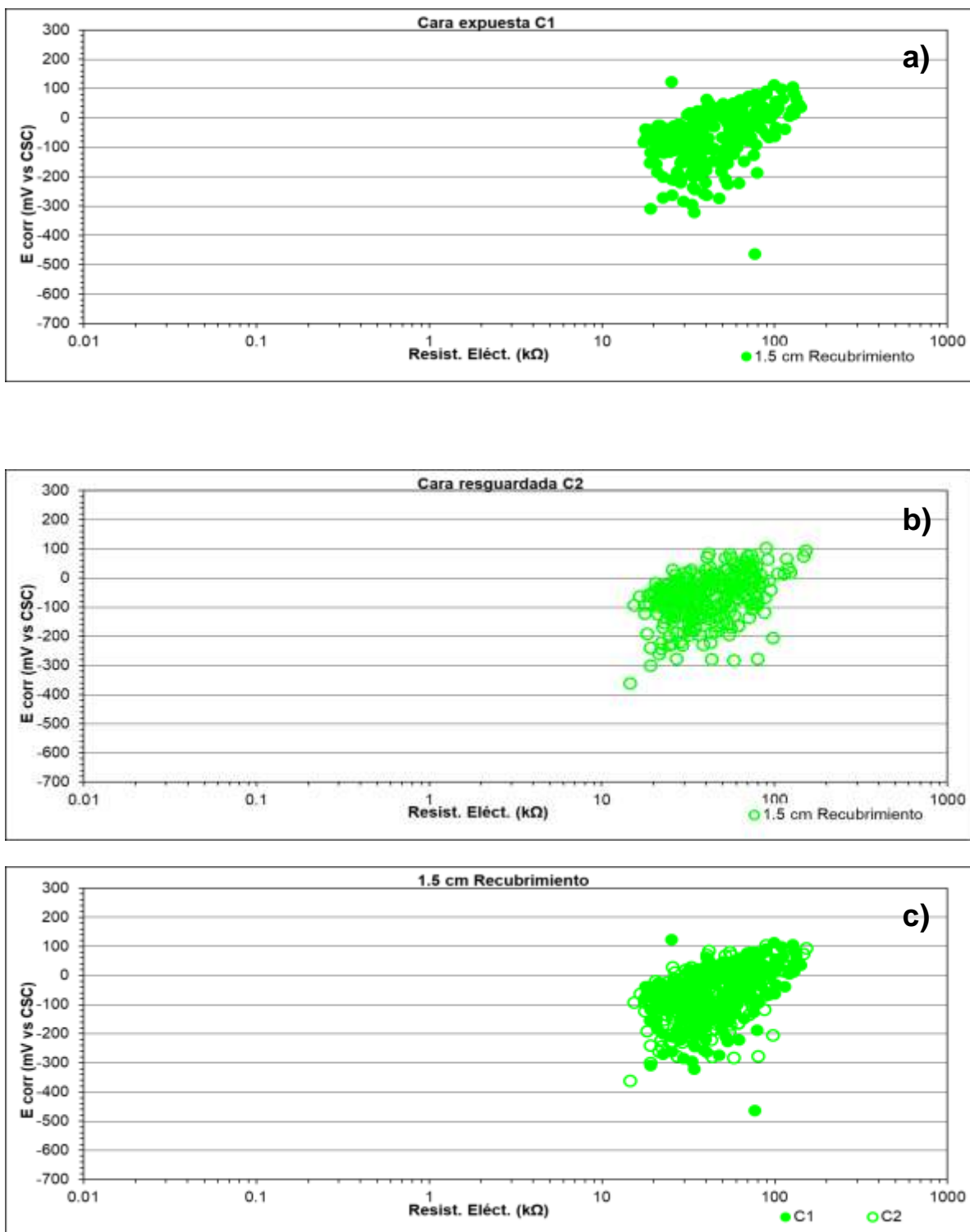


Figura E.5.3 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

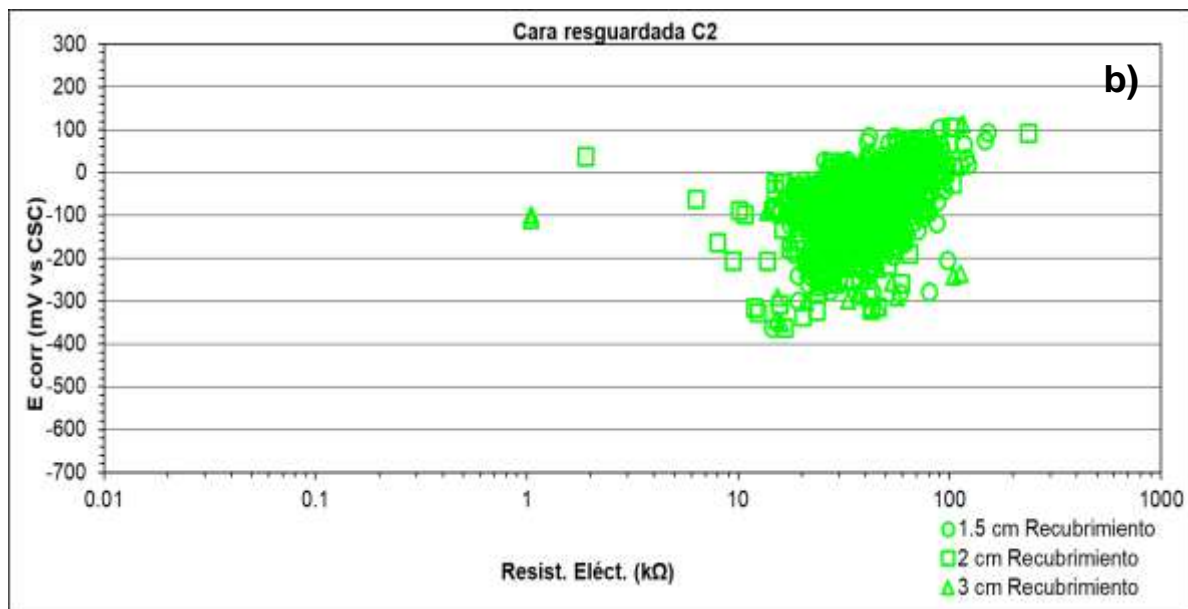
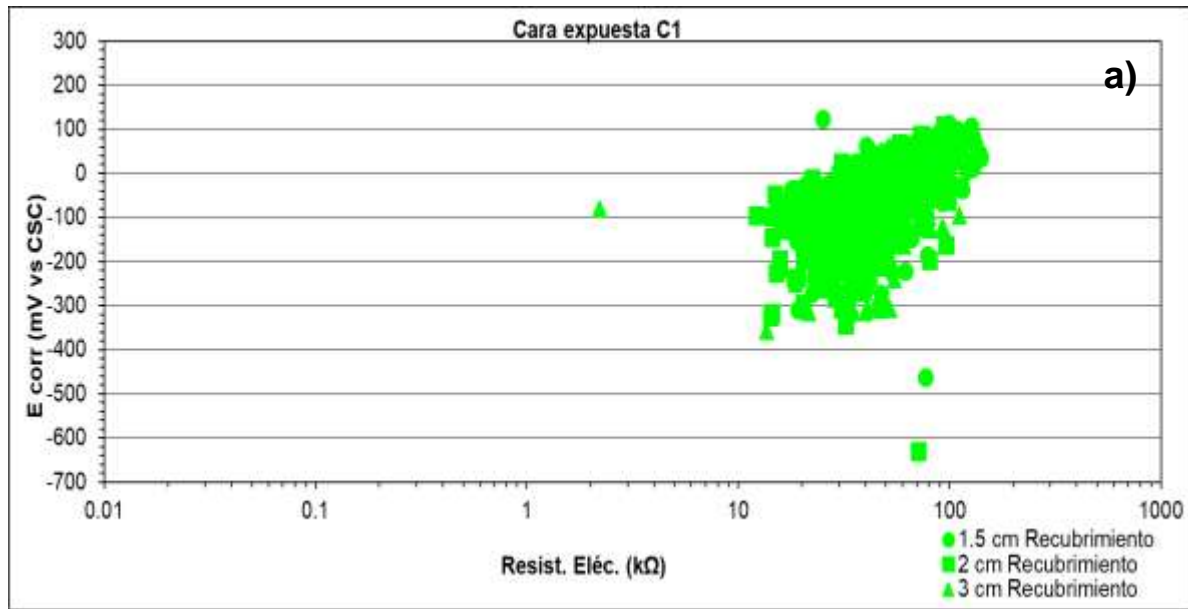


Figura E.5.4 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléc) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

Anexo E.6 Estación Tampico (Mx15)

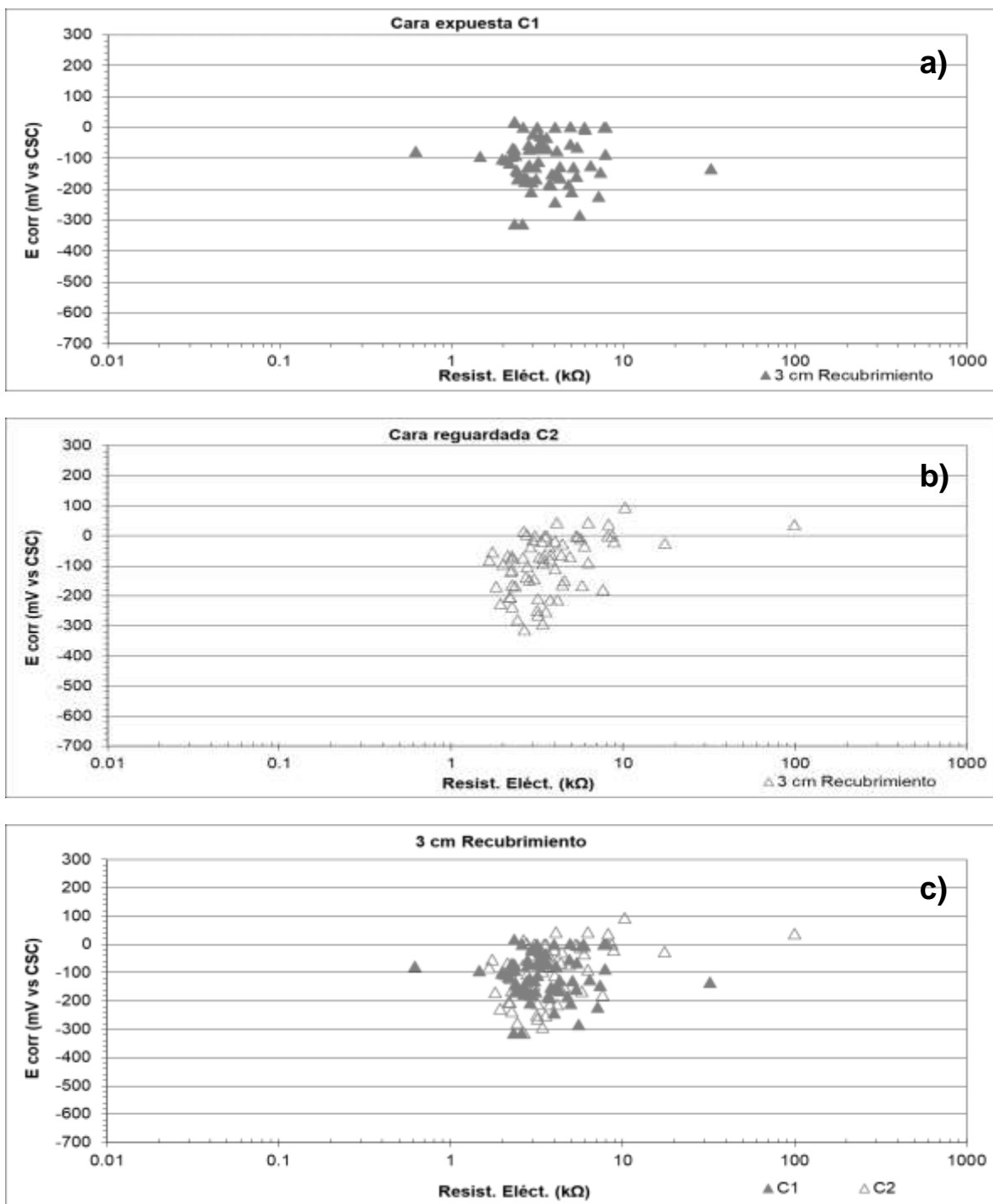


Figura E.6.1 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

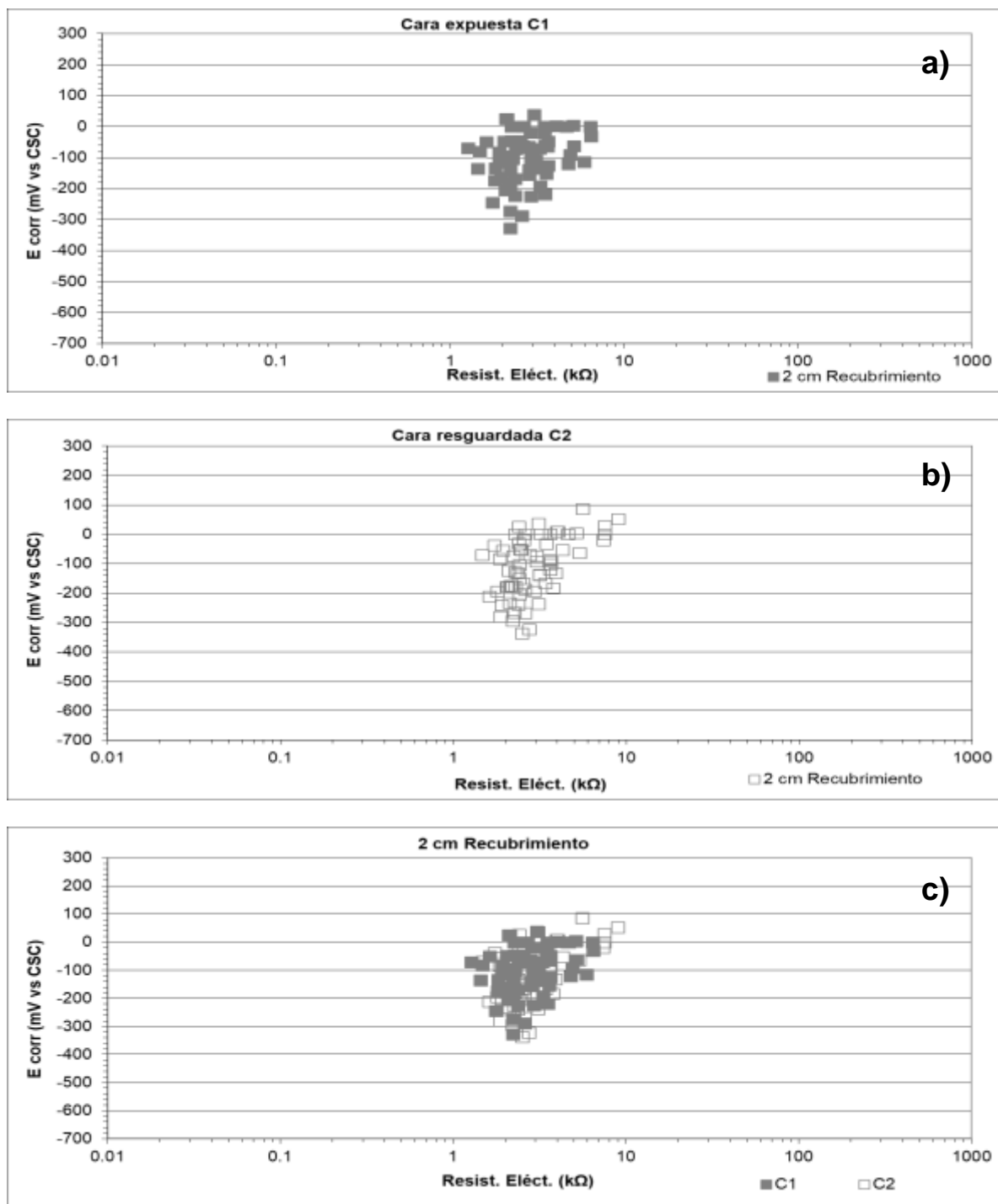


Figura E.6.2 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

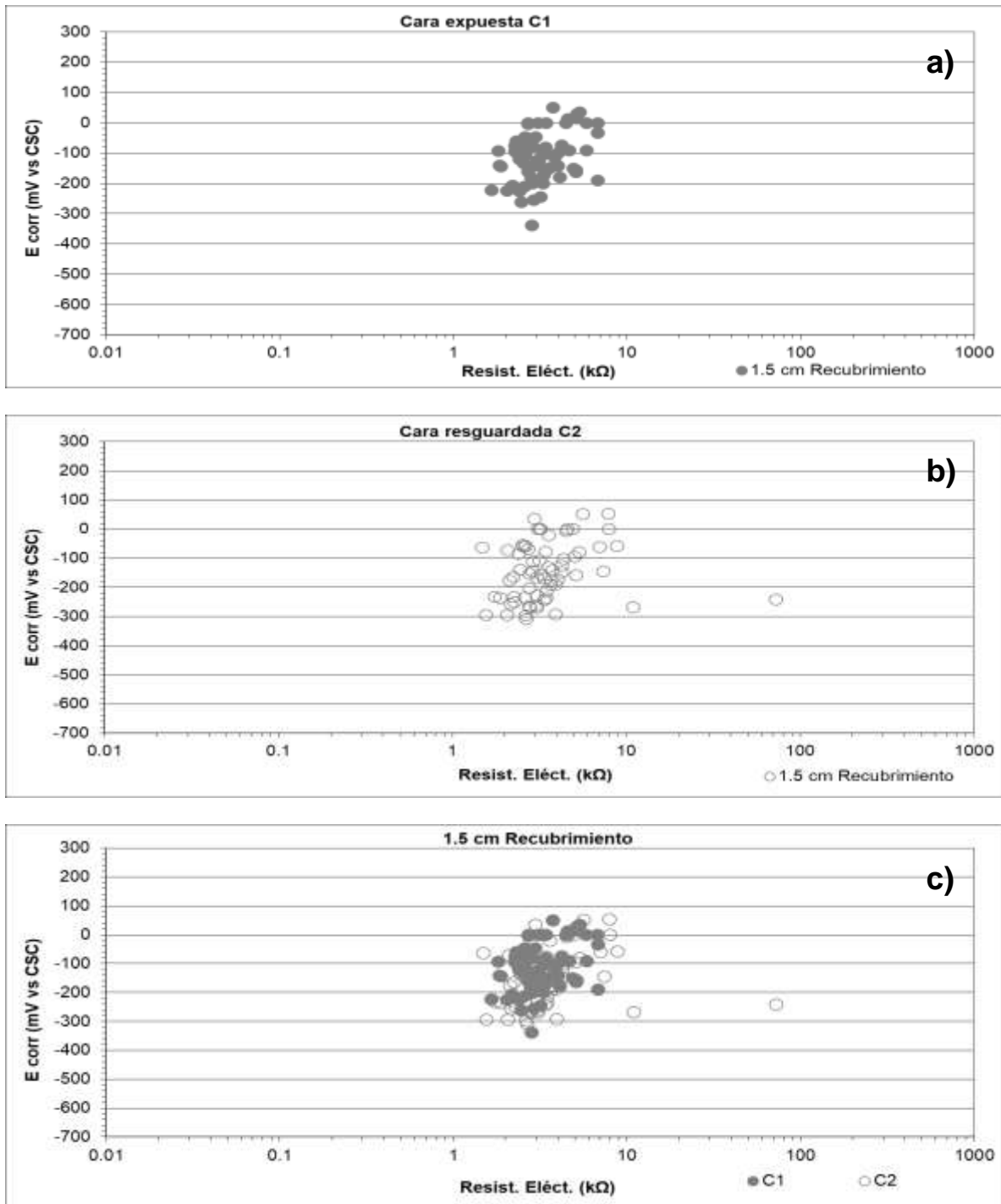


Figura E.6.3 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

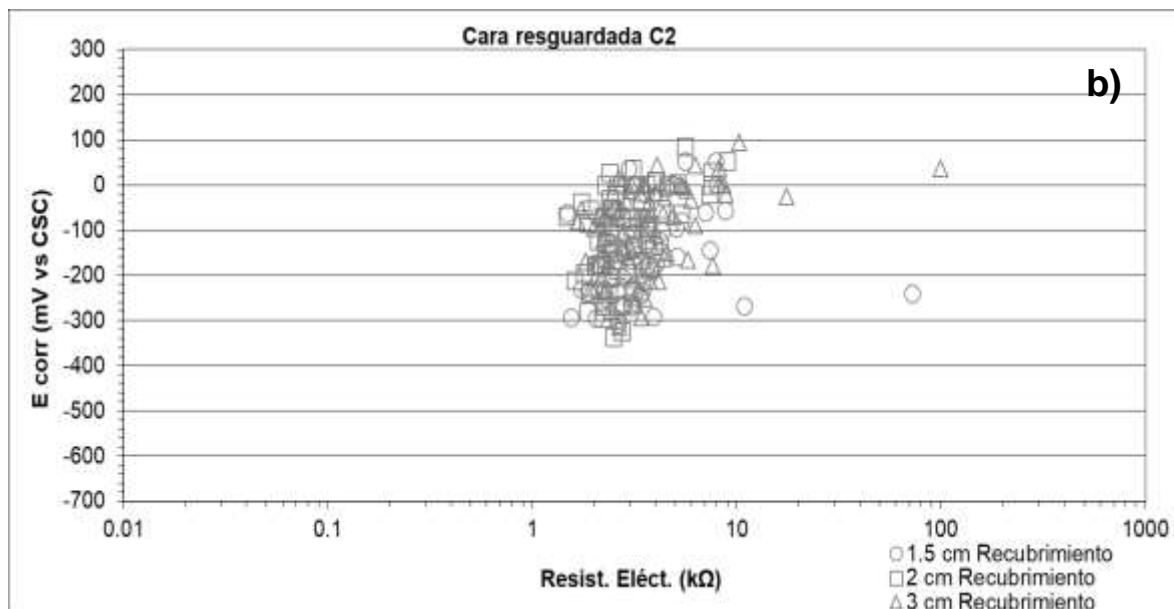
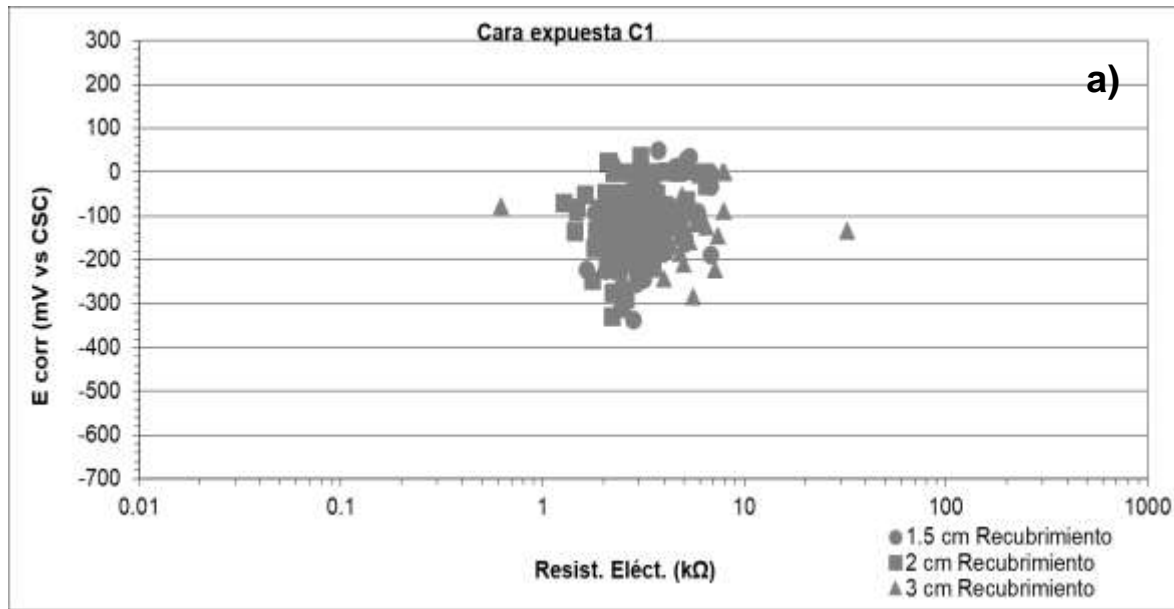


Figura E.6.4 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

Anexo E.7 Estación Toluca (Mx9)

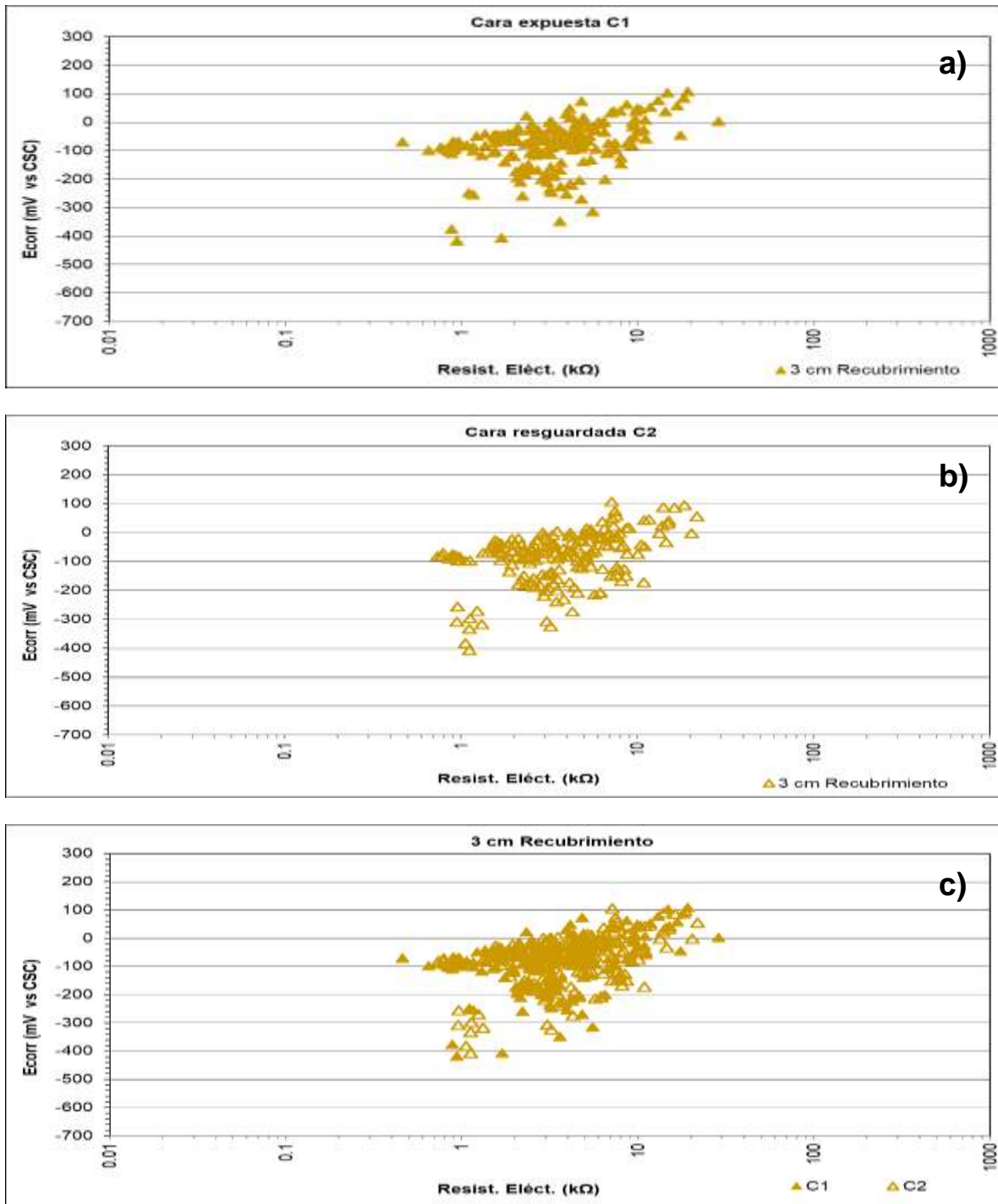


Figura E.7.1 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

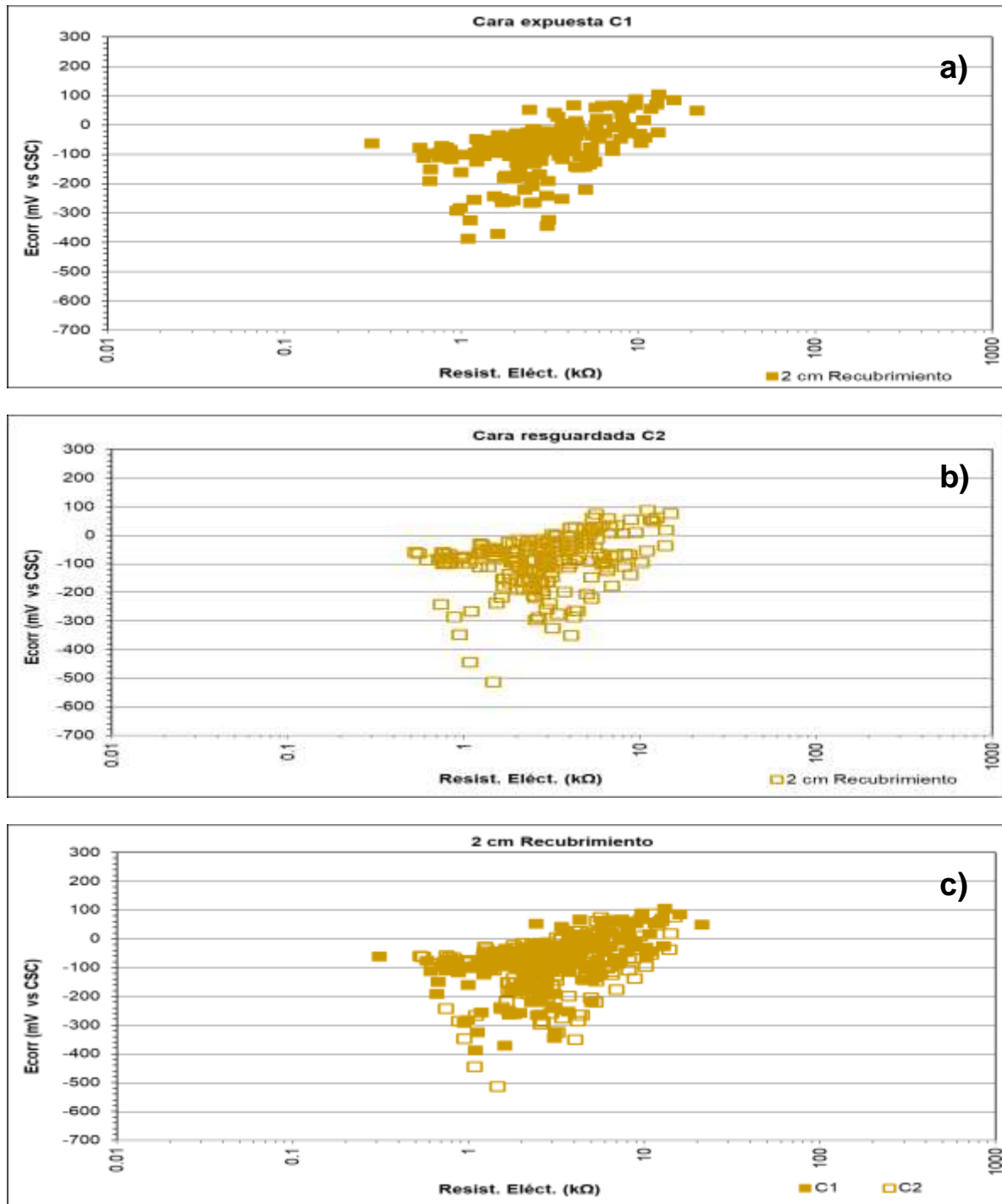


Figura E.7.2 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

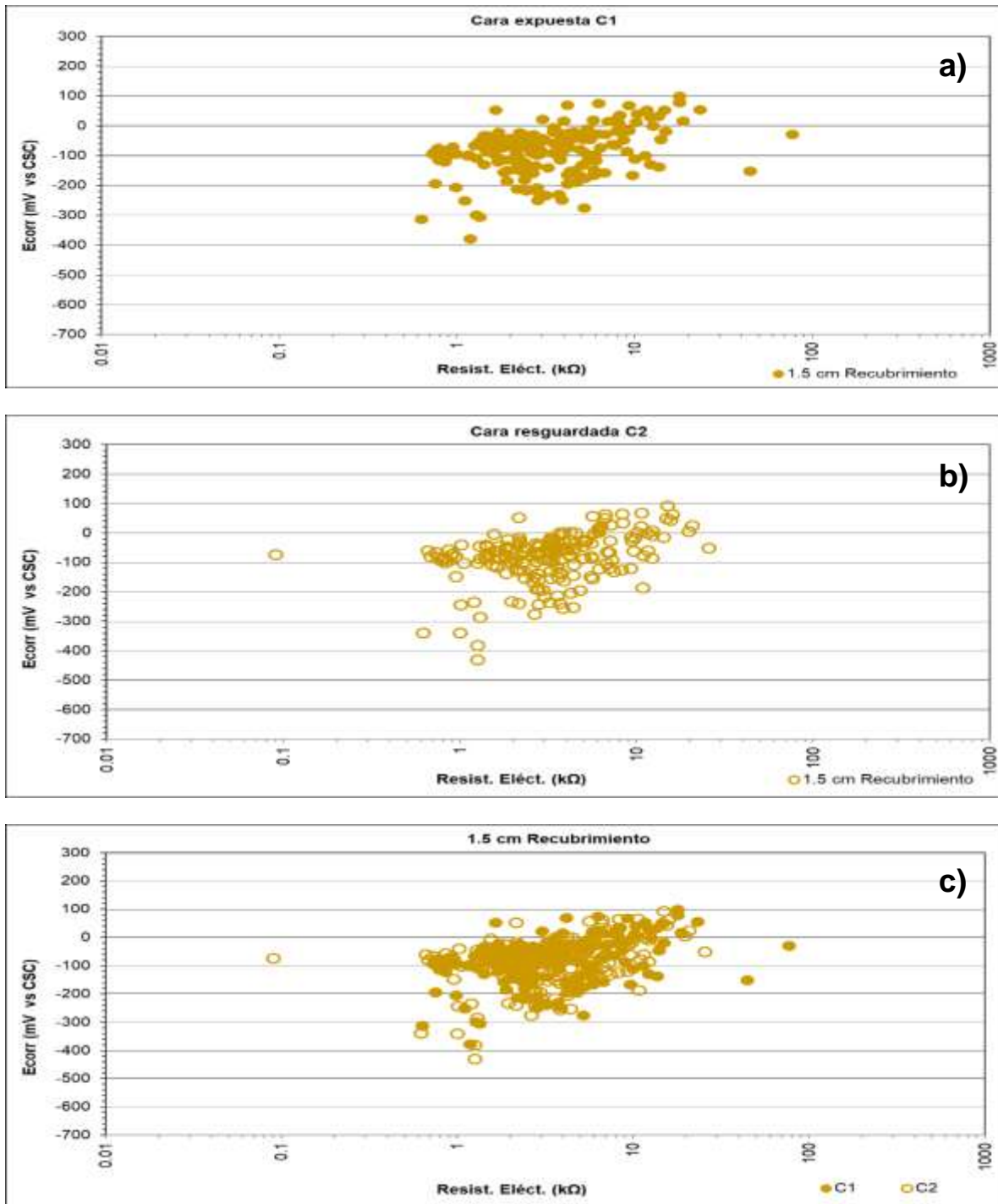


Figura E.7.3 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

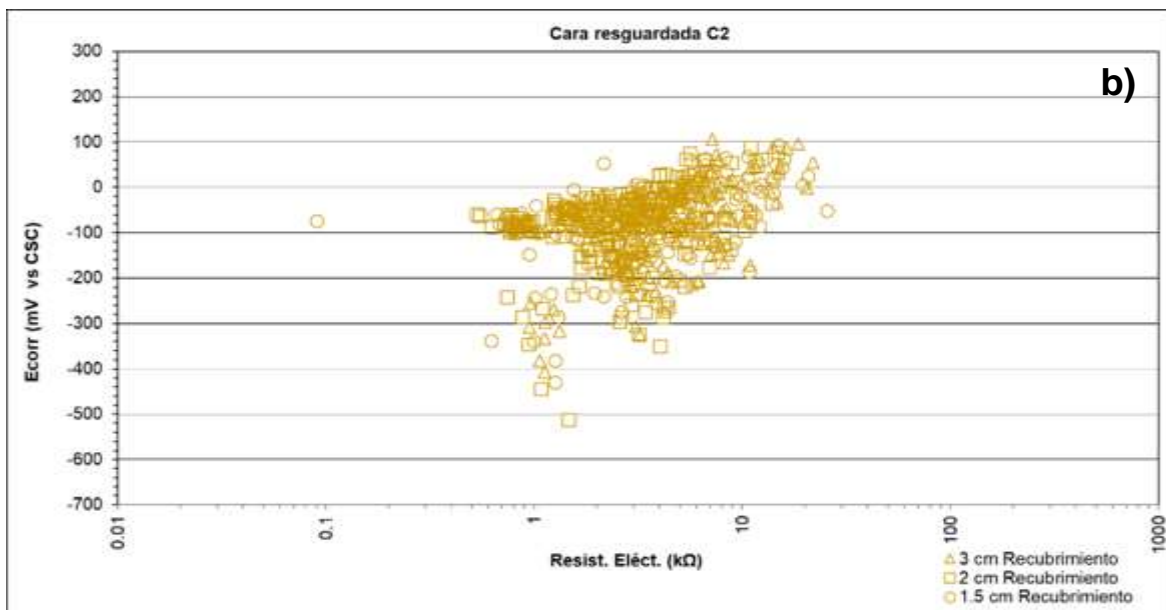
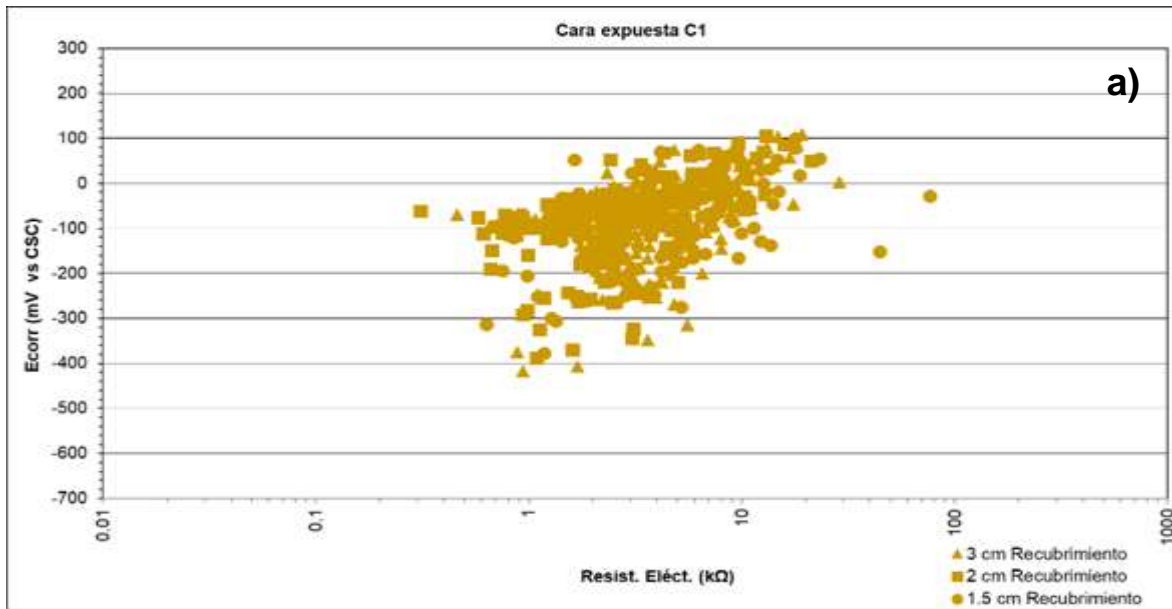


Figura E.7.4 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1 y b) cara resguardada C2.

Anexo E.8 Estación Xalapa (Mx14)

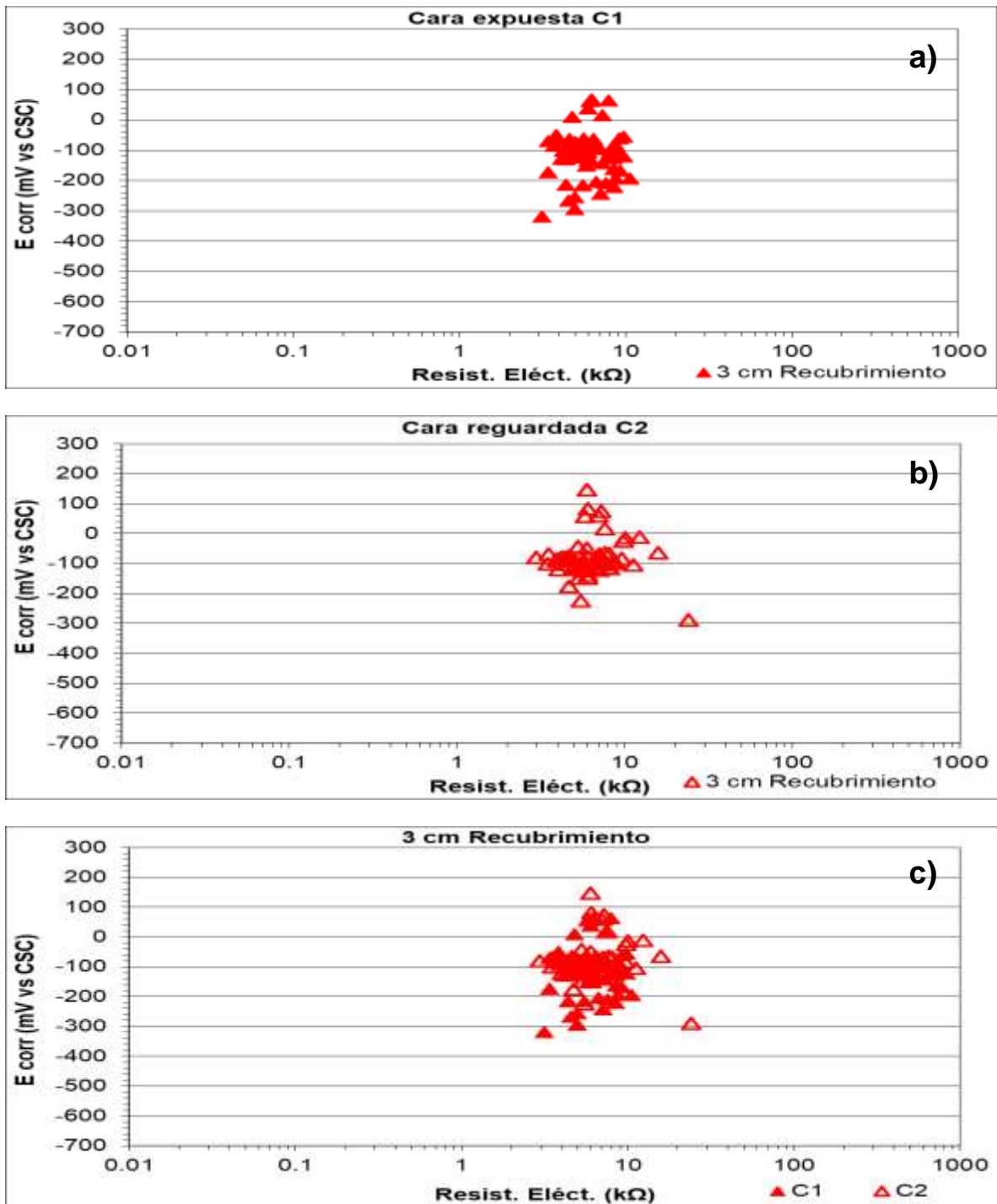


Figura E.8.1 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 3 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

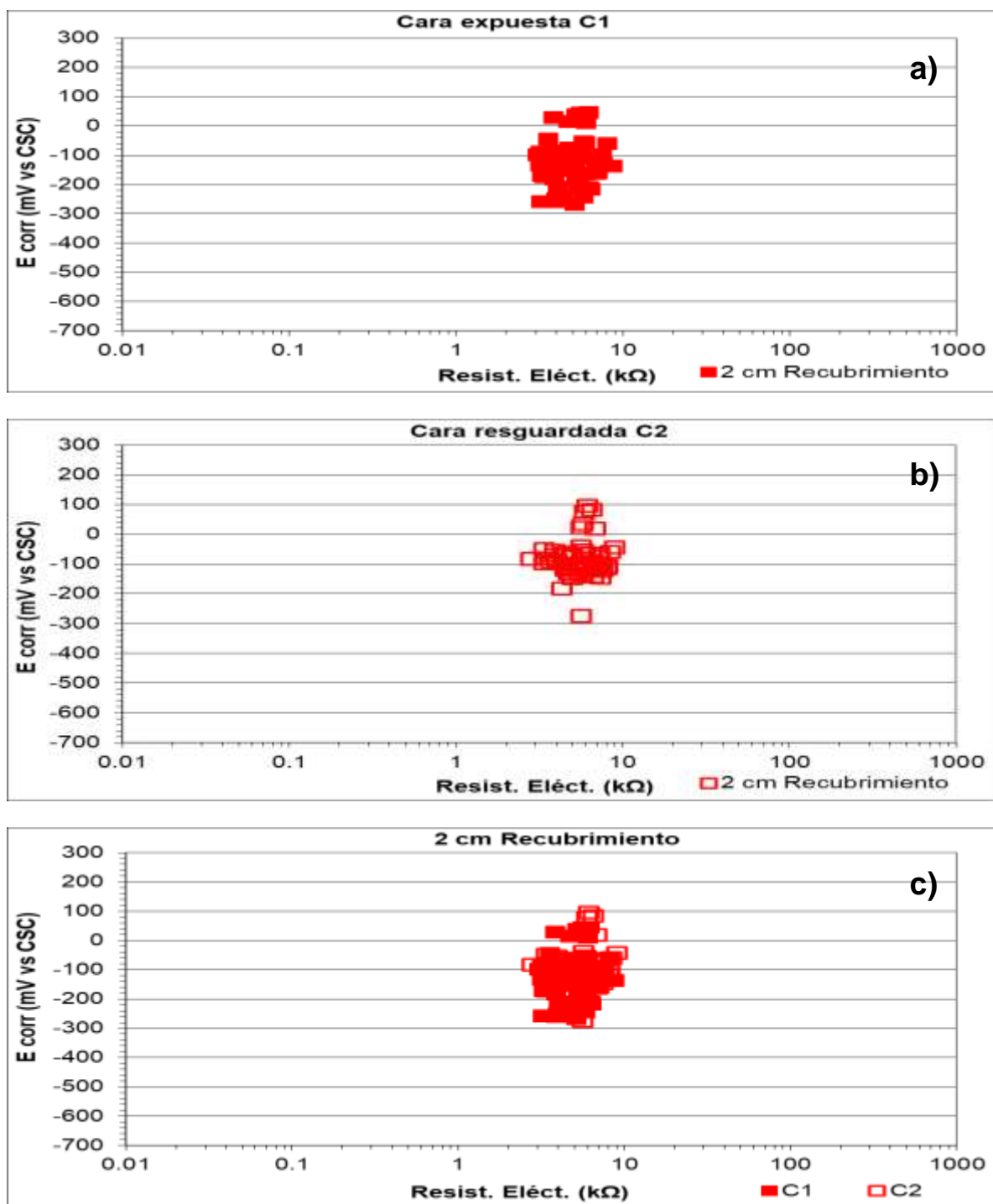


Figura E.8.2 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 2 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

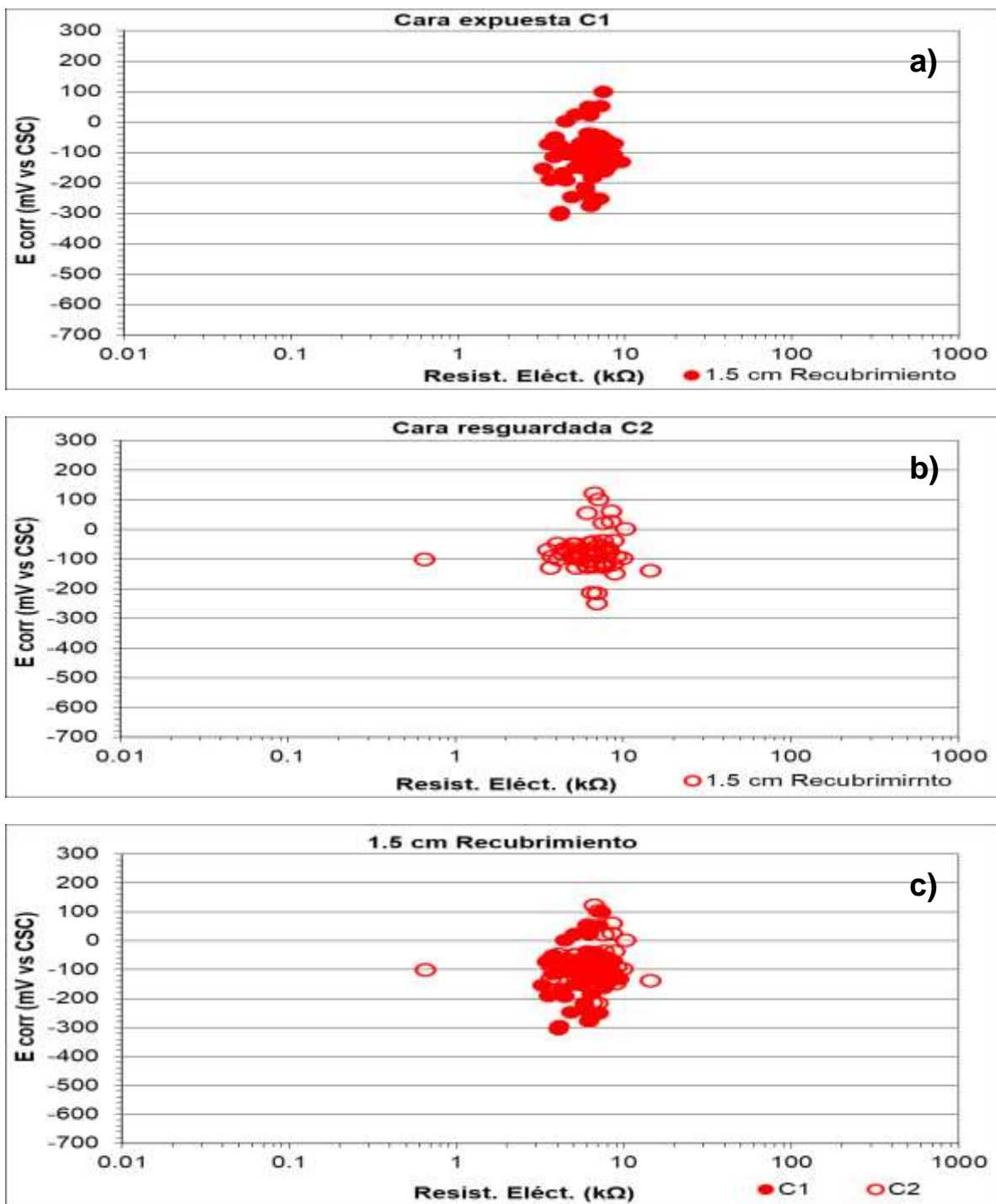


Figura E.8.3 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct) para 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2, y c) C1 vs. C2.

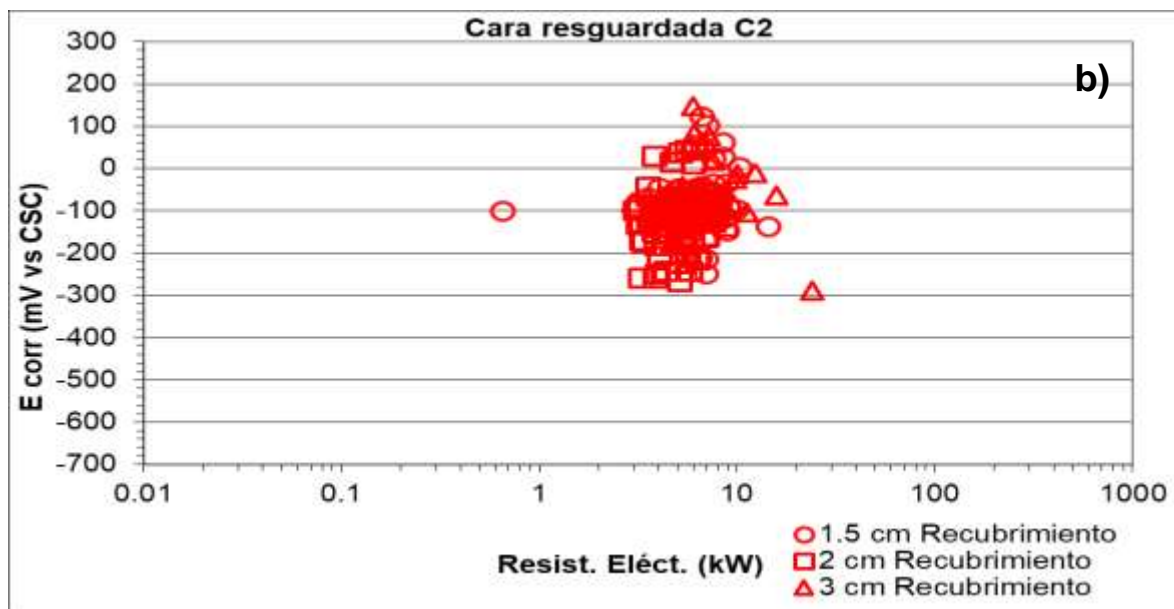
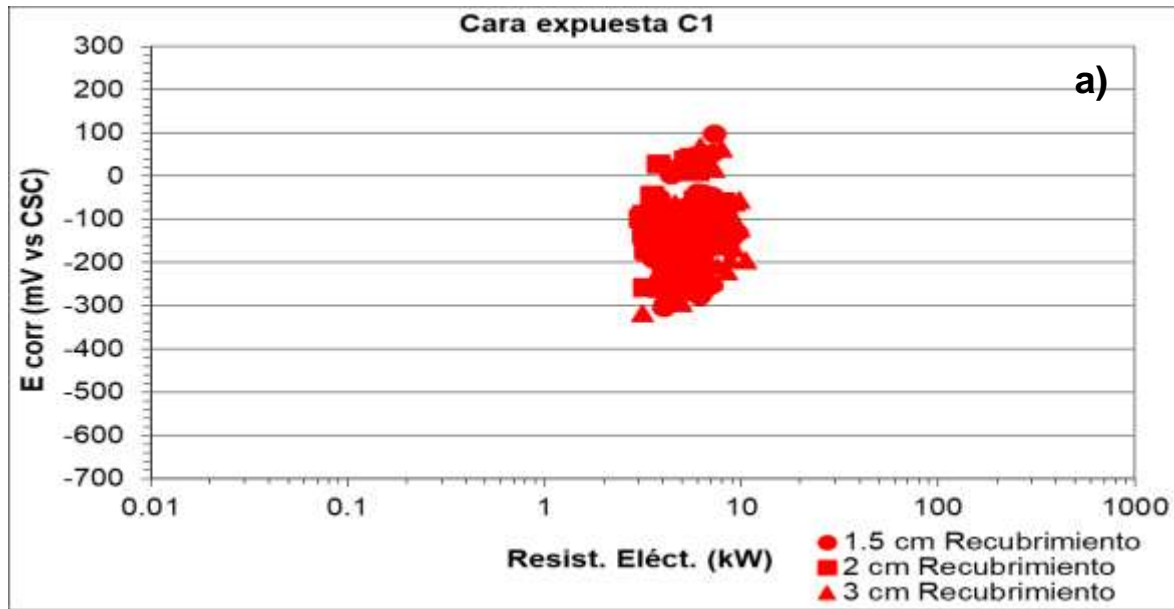


Figura E.8.4 Potencial de corrosión (E_{corr}) vs. resistencia eléctrica (Resist. Eléct.) para 3 cm, 2 cm y 1.5 cm de recubrimiento: a) cara expuesta C1; b) cara resguardada C2.

Anexo F. Velocidad de corrosión acumulada – Estaciones urbanas

Anexo F.1 Estación Mexicali (Mx10)

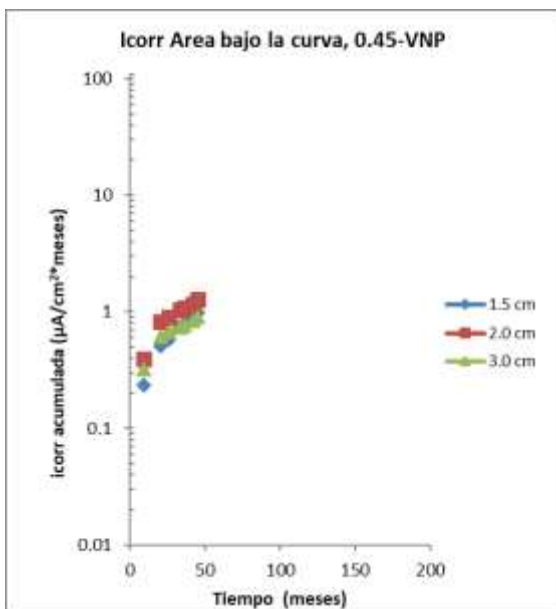


Figura F.1.1 Cara expuesta (C1).

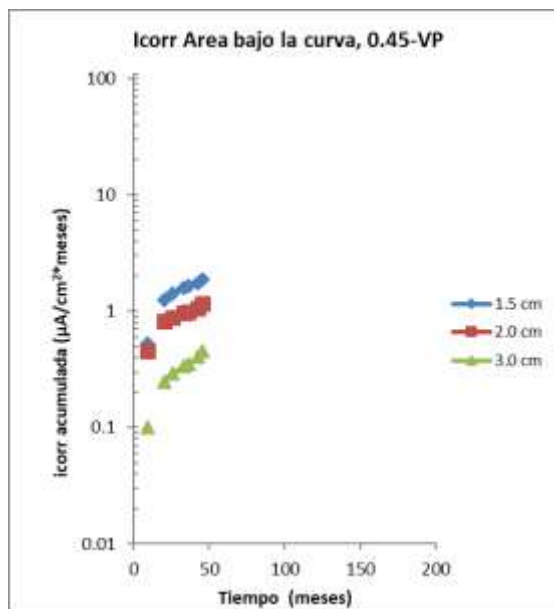


Figura F.1.2 Cara resguardada (C2).

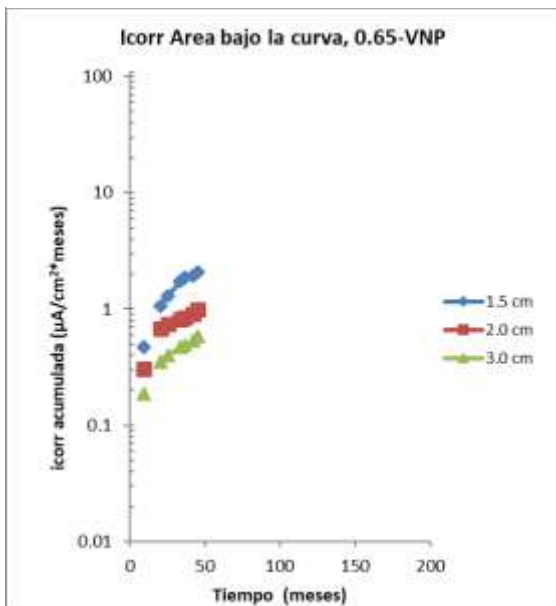


Figura F.1.3 Cara expuesta (C1).

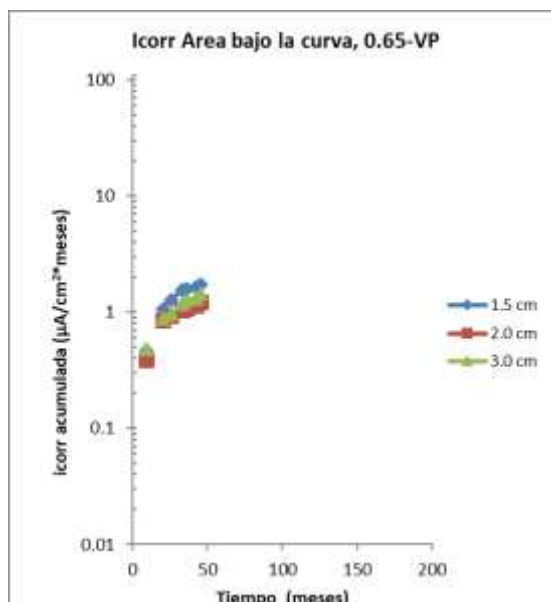


Figura F.1.4 Cara resguardada (C2).

Anexo F.2 Estación México, D.F. (Mx7)

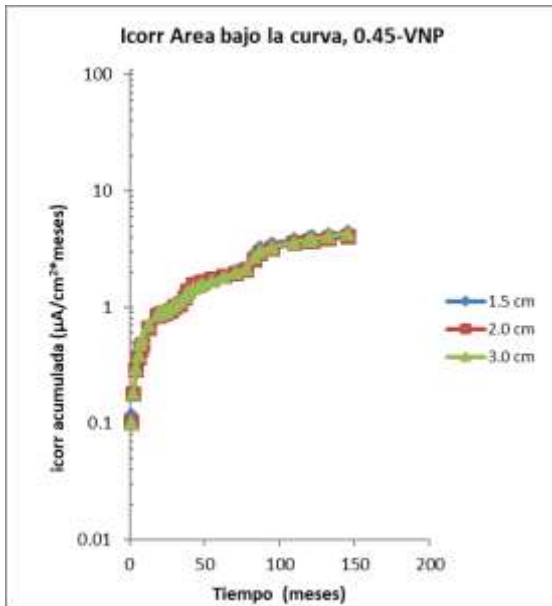


Figura F.2.1 Cara expuesta (C1).

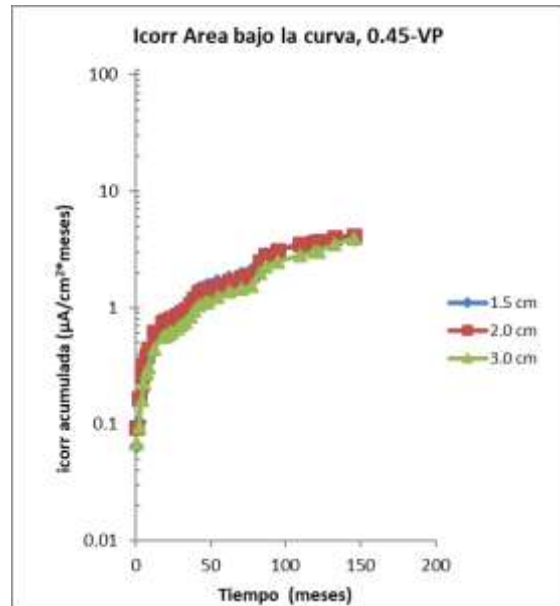


Figura F.2.2 Cara resguardada (C2).

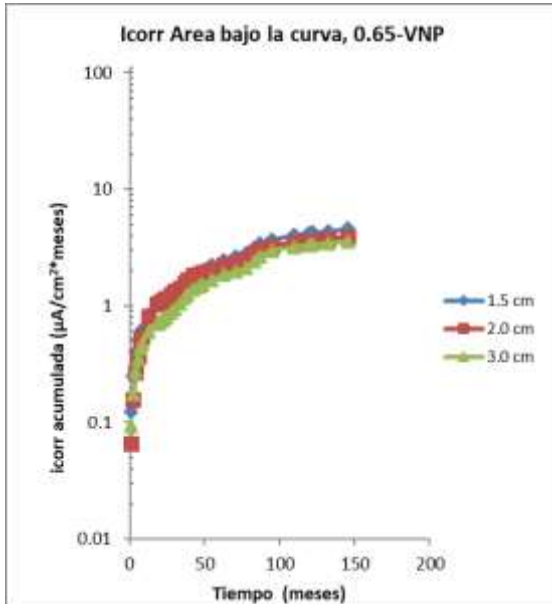


Figura F.2.3 Cara expuesta (C1).

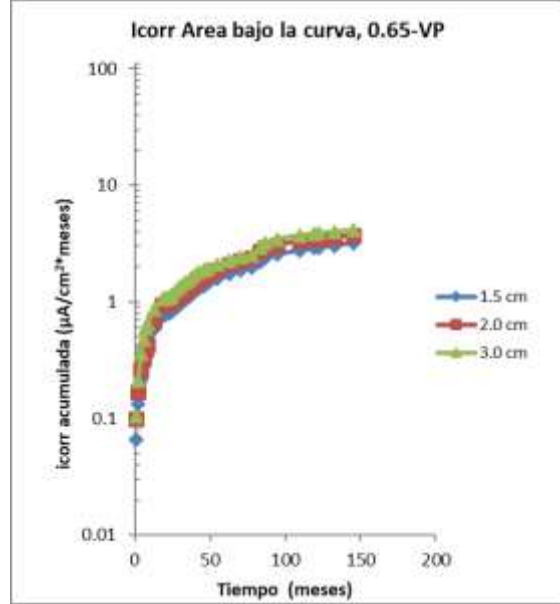


Figura F.2.4 Cara resguardada (C2).

Anexo F.3 Estación Morelia (Mx5)

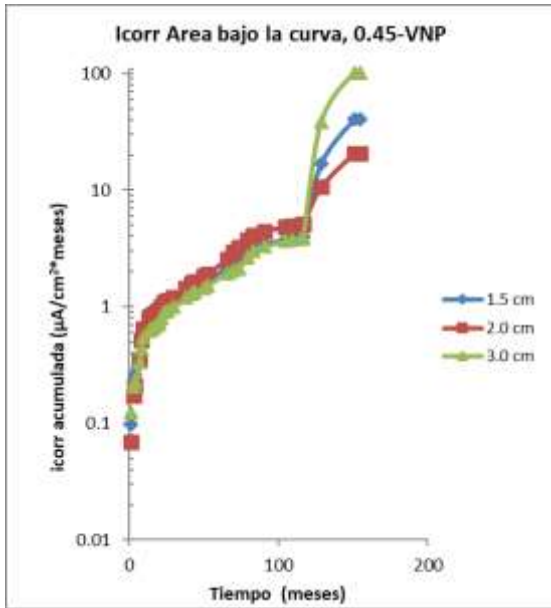


Figura F.3.1 Cara expuesta (C1).

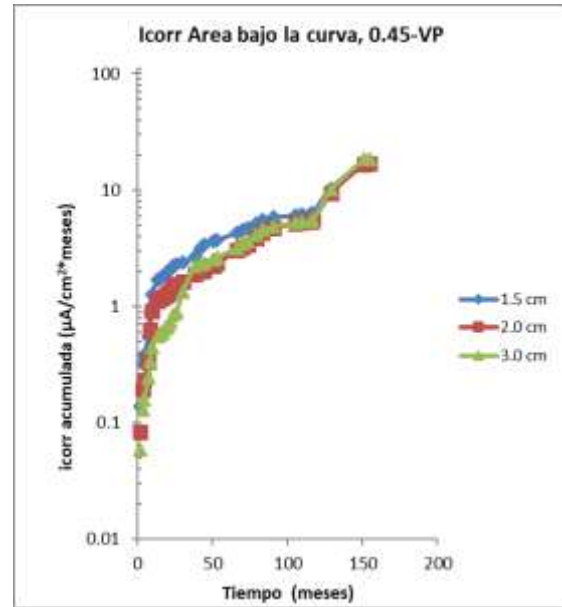


Figura F.3.2 Cara resguardada (C2).

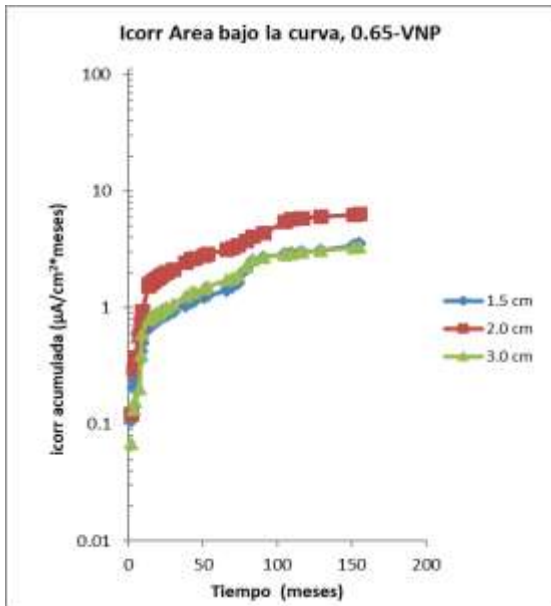


Figura F.3.3 Cara expuesta (C1).

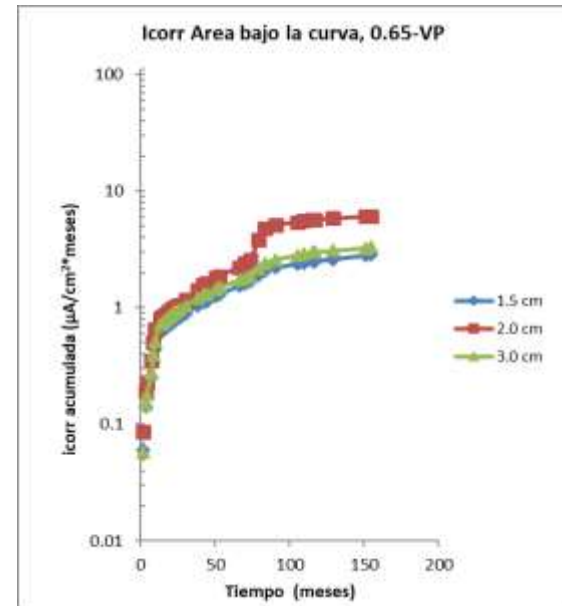


Figura F.3.4 Cara resguardada (C2).

Anexo F.4 Estación Oaxaca (Mx4)

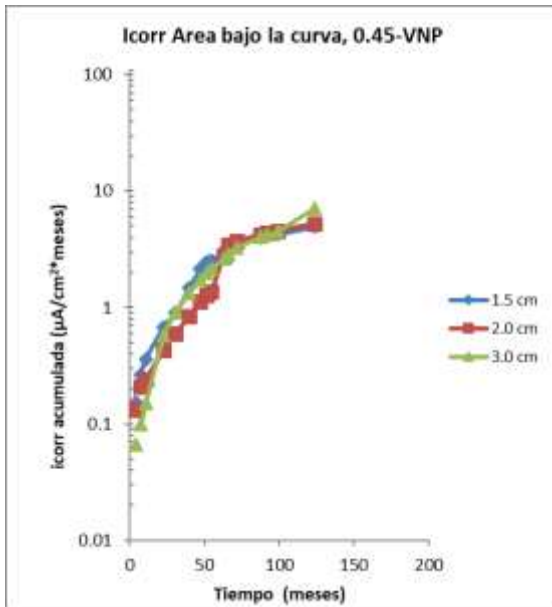


Figura F.4.1 Cara expuesta (C1).

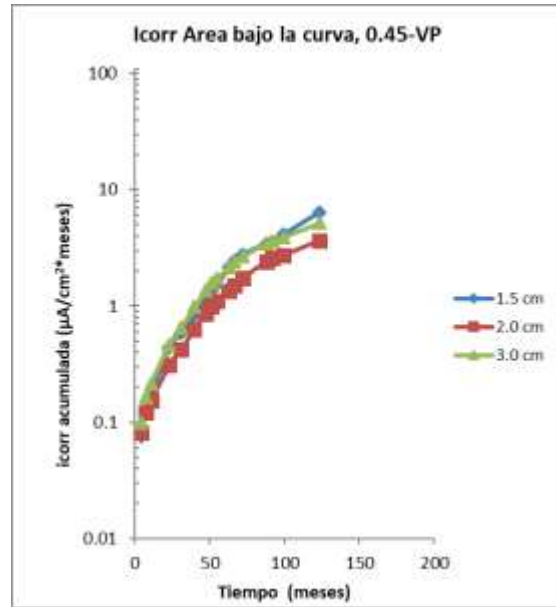


Figura F.4.2 Cara resguardada (C2).

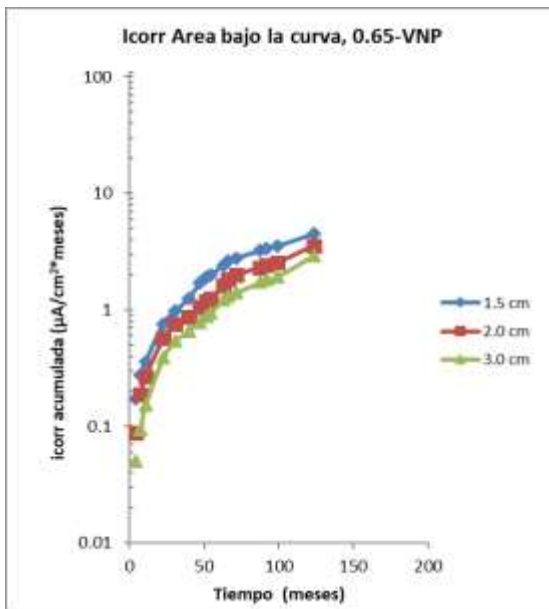


Figura F.4.3 Cara expuesta (C1).

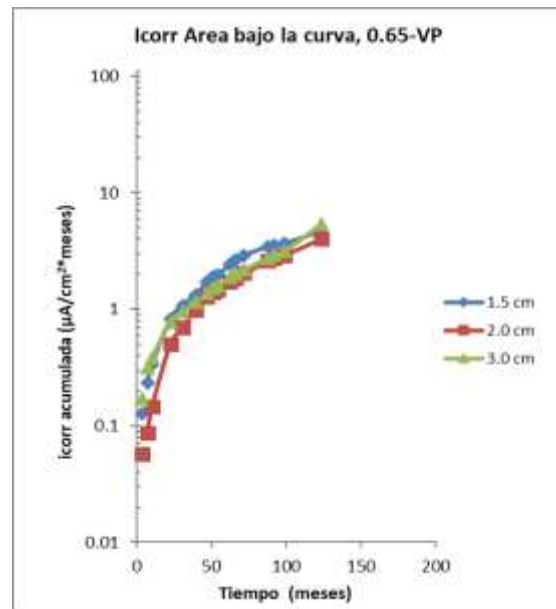


Figura F.4.4 Cara resguardada (C2).

Anexo F.5 Estación Tampico (Mx15)

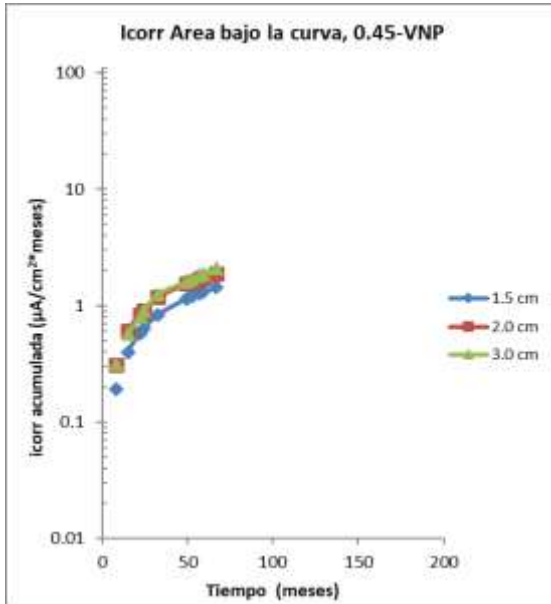


Figura F.5.1 Cara expuesta (C1).

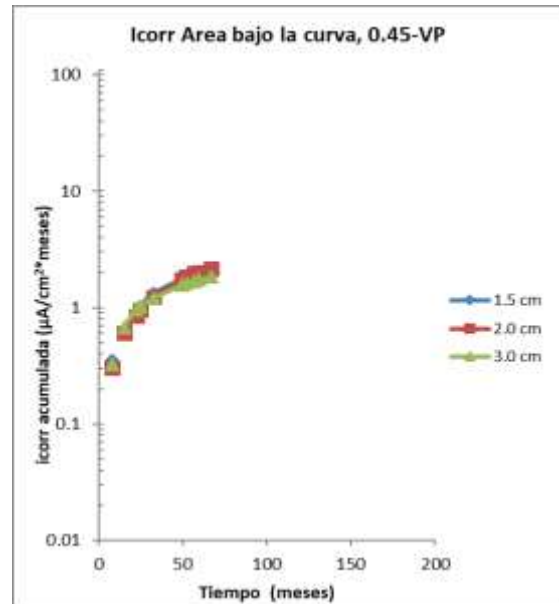


Figura F.5.2 Cara resguardada (C2).

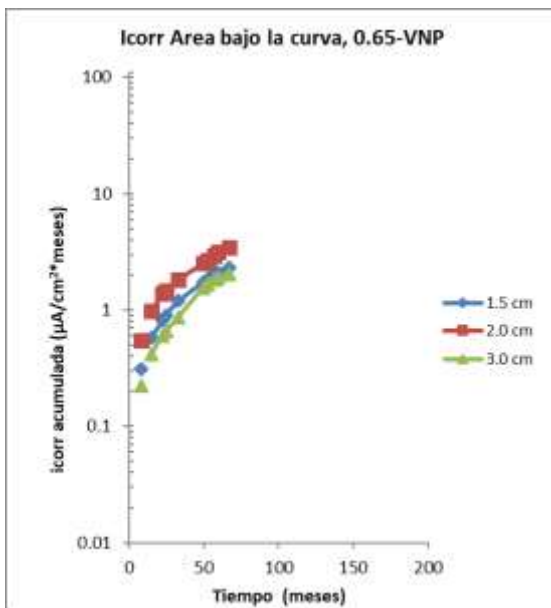


Figura F.5.3 Cara expuesta (C1).

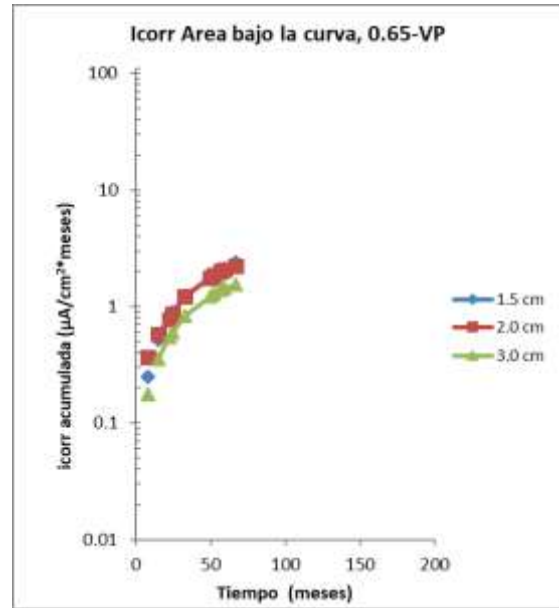


Figura F.5.4 Cara resguardada (C2).

Anexo F.6 Estación Toluca (Mx9)

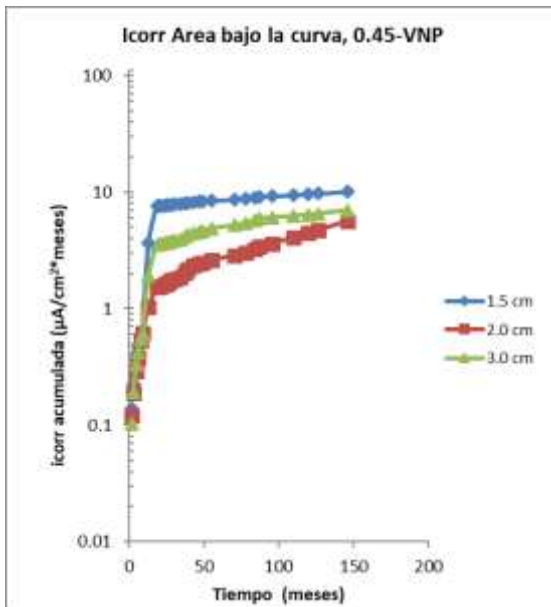


Figura F.6.1 Cara expuesta (C1).

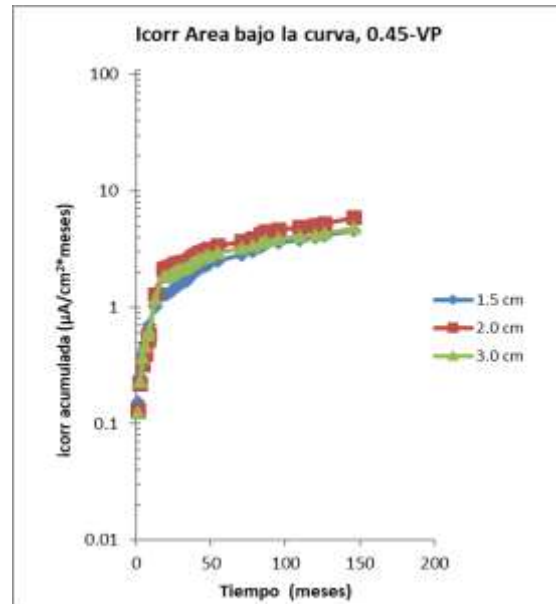


Figura F.6.2 Cara resguardada (C2).

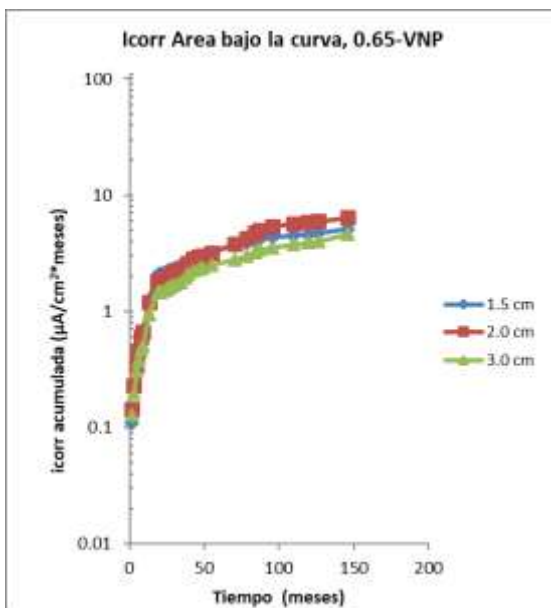


Figura F.6.3 Cara expuesta (C1).

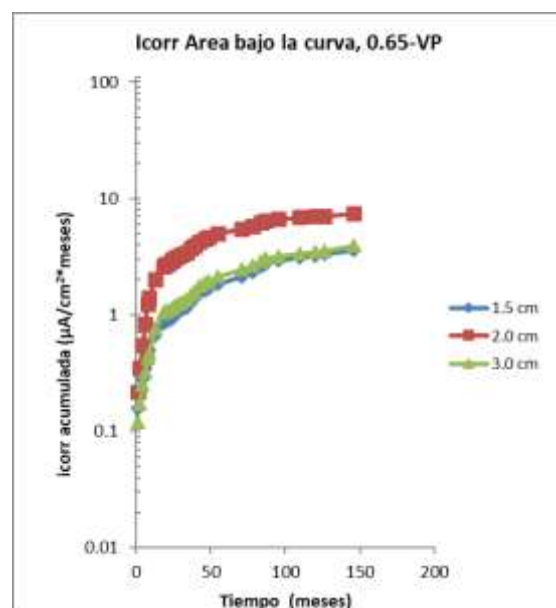


Figura F.6.4 Cara resguardada (C2).

Anexo F.7 Estación Xalapa (Mx14)

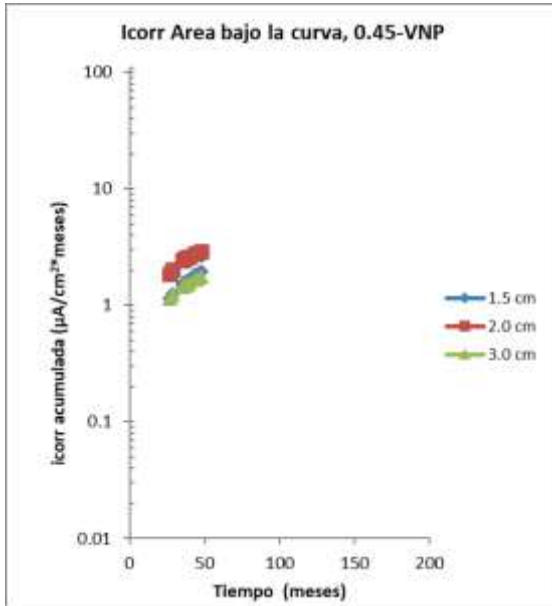


Figura F.7.1 Cara expuesta (C1).

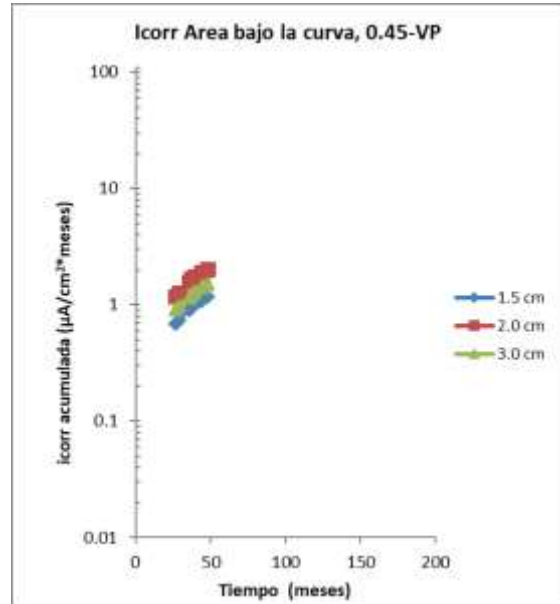


Figura F.7.2 Cara resguardada (C2).

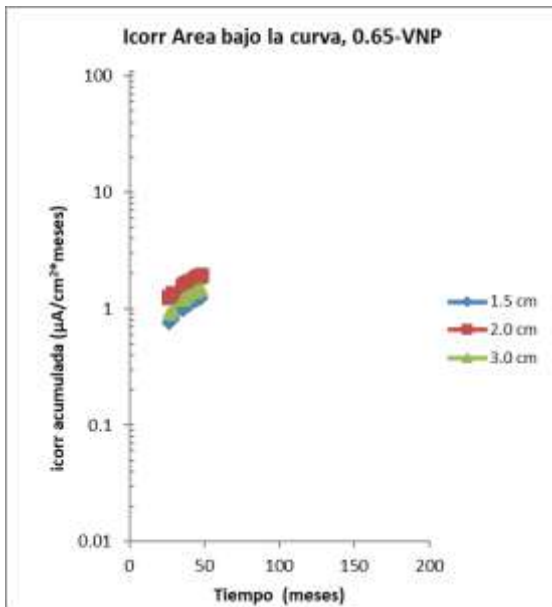


Figura F.7.3 Cara expuesta (C1).

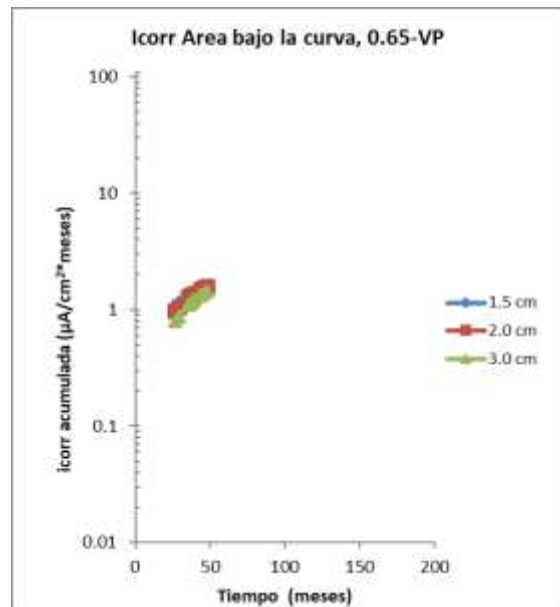


Figura F.7.4 Cara resguardada (C2).

Anexo G. Velocidad de corrosión acumulada – Estaciones marinas

Anexo G.1 Estación Progreso (Mx2)

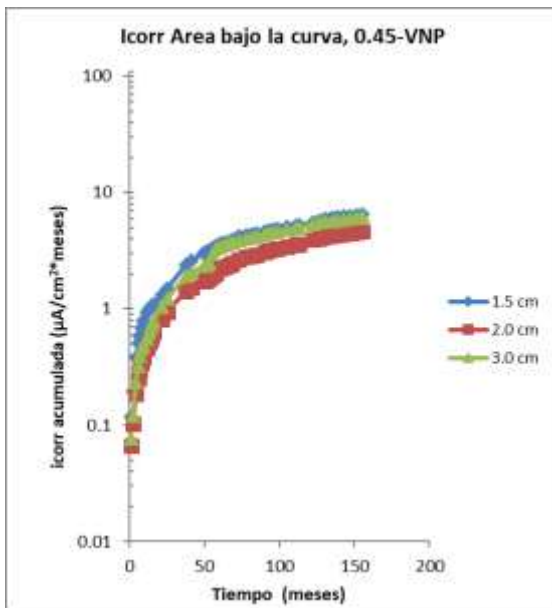


Figura G.1.1 Cara expuesta (C1).

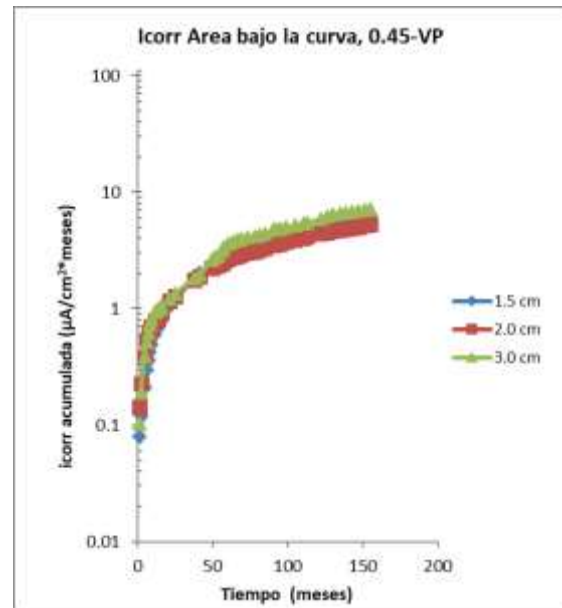


Figura G.1.2 Cara resguardada (C2).

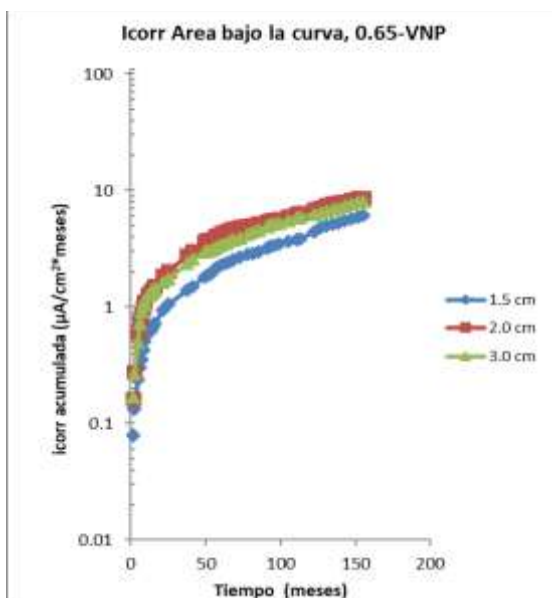


Figura G.1.3 Cara expuesta (C1).

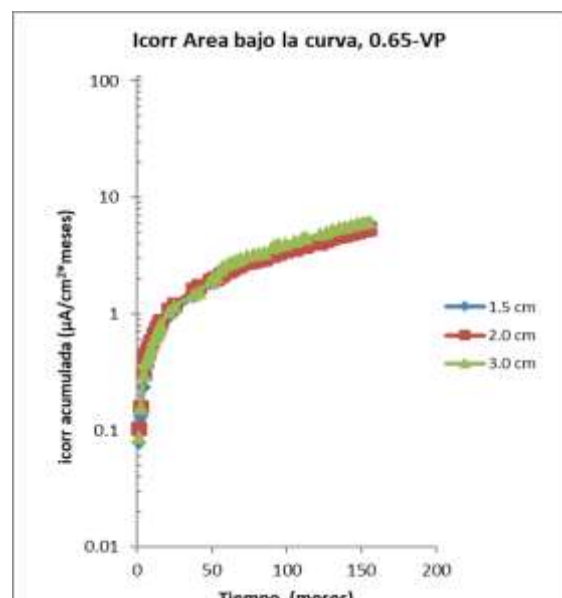


Figura G.1.4 Cara resguardada (C2).



Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado-Galindo”
Parque Tecnológico San Fandila
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México
CP 76703
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>

Esta publicación fue desarrollada en el marco de un sistema de gestión de calidad certificada bajo la norma ISO 9001:2015