



Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología

Universidad Nacional Autónoma de México



**DEGRADACIÓN Y TRANSFORMACIÓN DE
MATERIALES METÁLICOS DE INTERÉS
ARQUEOLÓGICO POR PROCESOS DE CORROSIÓN
Y COLONIZACIÓN BIOLÓGICA EN FONDOS
MARINOS DE CAMPECHE**

T E S I S

que para obtener el grado de

Maestro en Ciencias
(Biología Marina)

p r e s e n t a

BIÓL. PEDRO HORACIO LÓPEZ GARRIDO

Director de Tesis: Dra. Elva Escobar Briones

Comité Tutorial: Dr. Jorge Antonio González Sánchez
Dr. Paul Blanchon
Dr. Eric Jordan Dahlgren
M. Pilar Luna Erreguerena
M. en C. Santiago Capella Vizcaíno

México, D.F. 2011.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

COPIA ELECTRÓNICA DE TESIS PARA BIBLIOTECA

Yo, el que suscribe la presente, autor intelectual de este trabajo, declaro que la copia electrónica de esta tesis proporcionada a la Universidad Nacional Autónoma de México es una copia fiel de la tesis impresa, dentro de los límites de la tecnología disponible.

Pedro Horacio López Garrido

DECLARACIÓN DE AUTORIA

Yo declaro que esta tesis es de mi propia autoría y que no ha sido sometida en ninguna forma para la obtención de otro grado o diploma en ninguna otra universidad o institución de educación. La información derivada de trabajos publicados o no publicados de otros autores ha sido agradecida en el texto y una lista de referencias es proporcionada.

Pedro Horacio López Garrido

RESUMEN

La corrosión y colonización biológica del hierro fundido y el bronce fueron evaluadas con el objetivo de investigar la degradación de artefactos arqueológicos bajo condiciones naturales. Para ello, se colocaron a 19km de la costa de la ciudad de Campeche, a 9m de profundidad, dos dispositivos que contenían materiales experimentales de hierro y de bronce los cuales fueron expuestos durante 15 meses. El comportamiento electroquímico y la velocidad de corrosión de estos materiales fueron evaluados mediante una técnica electroquímica de polarización potenciodinámica y una técnica gravimétrica para evaluar la pérdida de peso de los materiales por efecto del proceso de corrosión. La estructura de la comunidad que se asentó en la superficie de los materiales experimentales fue evaluada mediante su riqueza de especies, composición, abundancia, diversidad, equidad, dominancia y formas de vida. Así mismo, fue investigado el efecto de la colonización biológica sobre el proceso de corrosión de estos materiales.

Las formas biológicas más abundantes y dominantes por superficie a lo largo del periodo de exposición de los materiales de hierro fueron organismos de crecimiento costroso o incrustante, así como bivalvos de posición postrada. No obstante, la cara superior de las muestras experimentales de hierro fue dominada en abundancia durante los primeros 5 meses por moluscos de posición postrada, mientras que después de 10 meses los organismos incrustantes comenzaron a ser dominantes por superficie y después de 15 meses, dominaron por completo la cara superior de las muestras experimentales. En contraste, después de 15 meses de inmersión, la cara superior de las muestras experimentales de hierro continuó siendo dominada por moluscos bivalvos. Por otra parte, en las muestras experimentales de bronce las formas más abundantes y dominantes por superficie (tanto en la cara

superior como inferior) fueron los bivalvos de posición postrada. Aunque, la cobertura de las muestras de bronce fue en promedio del 30%.

Los datos mostraron que la cobertura poco densa y/o heterogénea de organismos gregarios como bivalvos de posición postrada o cirripedios fue poco significativa sobre la velocidad de corrosión del hierro. No obstante, una cobertura densa y homogénea de organismos incrustantes presentó un efecto significativo en el proceso de corrosión del hierro, lo cual se observó en la disminución de las velocidades de corrosión de este material. Así mismo, los datos indicaron que la cobertura poco densa y heterogénea de organismos gregarios, principalmente de bivalvos de posición postrada sobre la superficie de las muestras experimentales de bronce, no tuvo un efecto significativo sobre su proceso de corrosión. En este sentido, la colonización biológica del bronce fue afectada por sus propios productos de corrosión, especialmente los derivados del cobre debido al efecto biocida de éstos. Por lo anterior, sólo la superficie de algunas de las muestras experimentales de bronce fue colonizada por formas de vida sésil. No obstante, se estableció que el depósito de una fina capa de carbonato de calcio en la superficie de las muestras experimentales de bronce que fueron colonizadas facilitó el asentamiento de las larvas y la colonización de los organismos de vida sésil.

Finalmente, los datos obtenidos durante este estudio pueden ser usados para sugerir técnicas de monitoreo de la degradación de materiales culturales y ayudar en el establecimiento de estrategias apropiadas de conservación *in situ* en el estado de Campeche, así como en otros estados o regiones en México y zonas ecológicas similares.

Palabras clave: arqueología subacuática, conservación, vestigios arqueológicos, colonización biológica, degradación.

ABSTRACT

The corrosion and biofouling¹ characteristics of cast iron and bronze were evaluated in order to investigate the degradation of archaeological artifacts under natural conditions. Field exposure studies of experimental materials were conducted over 15 months in the waters of the Campeche coast of México. Corrosion rates were measured by gravimetric and potenciodinamic polarization. The structure of communities inhabiting surfaces of these materials were evaluated by species richness, abundance, diversity, life forms and dominance of species. The effect of biofouling on the corrosion rate was also investigated.

The upper surface of the iron samples was dominated in abundance by mollusks during the first five months, while after ten months encrusting organisms began to be dominated, and completely dominated the upper surface after 15 months. By contrast, after 15 months of immersion, the down surface of iron samples continued to be dominated by bivalve mollusks. On the other hand, the biological coverage on the bronze collectors over the exposure period was 30%. However, the results show a slight increase in the lower surface of the samples. After ten months, the organisms that dominated both surfaces of the bronze samples continued to be the bivalve mollusks.

The corrosion rate of iron (obtained by potenciodinamic polarization and gravimetric tests) indicate that greater levels of corrosion occurred on the collectors without the coverage of organisms from the beginning through the first five months of exposure with the dominant life forms in both sides of the collectors being bivalves in a kneeling position. This is attributed to the heterogeneous coverage by these organisms that form clumped aggregations. Both the upper and lower surfaces of the iron showed significant coverage by a

¹ Special case of colonization of hard surfaces by living organisms in the water medium, normally this term is used when the biological colonization is over an anthropogenic objects.

biological community composed mainly of encrusting organisms after a exposure period of ten months. The uniform pattern of distribution of these organisms form a physical barrier that begins to have an important effect on the corrosion process and rate corrosion.

On the other hand, the data show that the biological coverage of the bronze was less significant than the iron. The life forms that dominate the upper and lower surfaces of the bronze were bivalves in a kneeling position. The coverage by these organisms was heterogeneous and did not have a significant effect in the corrosion rates. The lower dense settlement of sessile organisms and degree of biological coverage of the bronze are directly related to the products of corrosion mainly copper oxides. These chemical substances have a toxic effect for the organisms. Finally, the results will help to propose techniques for *in situ* preservation in wreck sites.

Key words: underwater archaeology, conservation, biofouling, biological colonization, degradation.

AGRADECIMIENTOS

Una gran cantidad de personas estuvieron involucradas de manera directa o indirecta para poder llevar a cabo este trabajo, desde su planeación hasta su ejecución y conclusión. Sin la ayuda desinteresada y noble de cada una de ellas, éste no hubiera sido posible. Así también, todas fueron importantes por igual, sin importar el orden en que a continuación se mencionan, claro que algunas de ellas debido a su relación personal y afectiva conmigo, tienen un lugar especial. Puesto en contexto lo anterior, quiero agradecer a todas estas personas y pido una disculpa si en algún momento omito mencionar a alguna de ellas.

Quiero expresar mi gratitud a la Mtra. Pilar Luna Erreguerena por su guía, confianza y apoyo que me ha brindado durante todos estos años en que he formado parte de la Subdirección de Arqueología Subacuática del INAH, y por supuesto, por el apoyo otorgado en todos sentidos para la realización de este trabajo. Estoy muy agradecido con la Dra. Elva Escobar Briones quien fue mi directora de tesis, por su orientación científica, paciencia y apoyo en todo momento. Así mismo, quiero agradecer al Dr. Jorge Antonio González Sánchez, quien fue co-director de este trabajo, por sus enseñanzas, entusiasmo, apoyo y participación desde el inicio de este estudio, pero sobre todo, por ser un amigo y por sus sabios consejos. A los demás miembros de mi comité; el Dr. Paul Blanchon, el Dr. Eric Jordan y el Dr. Santiago Capella quiero agradecer sus valiosas observaciones y comentarios realizados al trabajo, los cuales fortalecieron de gran manera la investigación. A todos ellos, les debo gran parte de mi formación como persona y profesionista.

Ofrezco un reconocimiento especial a las siguientes personas y compañeros que me dieron su valiosa ayuda en el trabajo de campo: la Arqlga. Helena Barba Meinecke, así como Luis May Cajum y Jesús Castro Dzib. Así mismo, a

mi amigo y compañero Raúl Octavio González Ramírez, por su ayuda en el trabajo de campo, así como por sus sabios consejos y buenos momentos que pasamos durante los viajes que hicimos.

Agradezco a la Mtra. Catalina Mendoza González y a la Mtra. Luz Elena Mateo Cid, así como el Dr. Antonio Celis, por su ayuda en la identificación taxonómica de parte del material biológico. Al Dr. Eneas Aguirre von Wobeser, al Dr. Pierre Legendre y al Biól. León Felipe Álvarez Sánchez por brindarme su ayuda y tiempo para la realización de los análisis estadísticos. Quiero agradecer también a Beatriz Cantera Reyes y Elda Carrasco García por su ayuda invaluable en el laboratorio y en el procesamiento de la información.

Las personas que he mencionado forman parte de diversas instituciones a las que quiero agradecer su apoyo y colaboración. A la Subdirección de Arqueología Subacuática del INAH, al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, al Centro de Investigación en Corrosión de la UAC, al Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN (por su ayuda en la fabricación de los dispositivos experimentales), así como al Laboratorio de Ficología de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del IPN. Además, quiero agradecer especialmente al Fondo-Mixto CONACYT-Gobierno del Estado de Campeche, por su apoyo financiero durante la realización de esta tesis.

Con especial cariño agradezco a Vera Moya Sordo, quien siempre apoyó mi trabajo, pero sobre todo, quien ha sabido ser una gran amiga en todo momento y en quien sé que puedo confiar plenamente. Así mismo, agradezco a mi amiga Laura Carrillo Márquez quien siempre ha apoyado mi trabajo y a quien le debo entre otras cosas, el haber llegado a esta área tan fascinante.

Finalmente y no por ello menos importante quiero dedicar esta tesis a mi mamá Teresa Garrido García, a mi padre Rubén López Corona y a mi hermano Rubén

López Garrido, pues siempre me han alentado en todo momento a seguir adelante y hacer lo que me gusta, incluyendo mi pasión por la vida marina. Así mismo, quiero expresar estas últimas líneas con todo mi amor, cariño y gratitud a Nidia Valdez Sánchez (mi “panchita”), quien me ha apoyado incondicionalmente en todo momento y quien ha tenido una paciencia y comprensión enorme. Gracias amor por darme ánimo y resistir conmigo todo este proceso que en ocasiones fue un tanto difícil, pero que estoy seguro que comprendes cuánto me apasiona el trabajo que realizo.

CONTENIDO

	Página
CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
CAPÍTULO 2	
PROCESOS NATURALES QUE INTERVIENEN EN LA TRANSFORMACIÓN Y DEGRADACIÓN DE MATERIALES ARQUEOLÓGICOS METÁLICOS	5
Colonización y sucesión biológica en restos de embarcaciones hundidas y artefactos de naturaleza metálica	7
Concreciones formadas en artefactos metálicos	10
Proceso general de corrosión de metales	11
CAPÍTULO 3	
ESTUDIOS SOBRE LA TRANSFORMACIÓN Y DEGRADACIÓN DE VESTIGIOS ARQUEOLÓGICOS	13
ANTECEDENTES	13
Colonización biológica de sustratos artificiales	13
Deterioro de vestigios arqueológicos metálicos	14
CAPÍTULO 4	
PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	17
OBJETIVOS	17
JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	18
HIPÓTESIS	20
CAPÍTULO 5	
CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES Y OCEANOGRÁFICAS DEL ÁREA MARINA ADYACENTE A LA CIUDAD DE CAMPECHE	21

CAPÍTULO 6	
PROCEDIMIENTOS Y TÉCNICAS DE ANÁLISIS EMPLEADOS EN LA EVALUACIÓN DE LA TRANSFORMCIÓN Y DEGRADACIÓN DEL HIERRO Y EL BRONCE	26
DISEÑO DE MUESTREO	28
Fundición de discos colectores de hierro y de bronce para la evaluación de su transformación y degradación por procesos de colonización biológica y de corrosión	28
Diseño, fabricación y colocación de módulos experimentales	29
Recolección de discos colectores de hierro y de bronce	32
Elaboración de probetas para la evaluación de la corrosión mediante la técnica gravimétrica de pérdida de peso	33
PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO	36
Fijación y preservación de los organismos bentónicos que colonizaron la superficie de los discos colectores de hierro y de bronce	36
Identificación taxonómica de la biota sésil colonizadora del hierro y el bronce	37
Análisis de la cobertura biológica sobre la superficie de los discos colectores de hierro y de bronce	37
Evaluación del proceso de corrosión de los discos colectores de hierro y de bronce mediante la técnica de polarización potenciodinámica	42
Evaluación del proceso de corrosión de las probetas de hierro y de bronce mediante su pérdida de peso	45
PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS DATOS	46
Procesamiento de los datos obtenidos de la comunidad biológica que colonizó los discos colectores de hierro y de bronce	46
Procesamiento de los datos obtenidos del deterioro del hierro y el bronce	49

CAPÍTULO 7	
TRANSFORMACIÓN Y DEGRADACIÓN DE LOS MATERIALES EXPERIMENTALES DE HIERRO Y DE BRONCE EN LOS FONDOS MARINOS DE CAMPECHE	51
CARACTERIZACIÓN DE LA BIOTA SÉSIL QUE COLONIZÓ LA SUPERFICIE DE LOS DISCOS COLECTORES DE HIERRO Y DE BRONCE	51
Riqueza total de especies	51
Riqueza de especies desarrollada en el hierro	53
Riqueza de especies desarrollada en el bronce	57
Formas de crecimiento de la comunidad que se asentó en los colectores de hierro y de bronce	59
Abundancia de la biota sésil colonizadora del hierro	61
Abundancia de la biota sésil colonizadora del bronce	64
Diversidad biológica, equidad y dominancia de la biota sésil colonizadora del hierro	66
Diversidad biológica, equidad y dominancia de la biota sésil colonizadora del bronce	71
DETERIORO DE LOS MATERIALES EXPERIMENTALES DE HIERRO Y DE BRONCE EXPUESTOS A LAS CONDICIONES QUE CARACTERIZAN LOS FONDOS MARINOS DE CAMPECHE	74
Comportamiento electroquímico de los discos colectores de hierro y evaluación de sus velocidades de corrosión	74
Comportamiento electroquímico de los discos colectores de bronce y evaluación de sus velocidades de corrosión	76
Determinación de las velocidades de corrosión del hierro mediante la pérdida de peso de probetas experimentales	77
Determinación de las velocidades de corrosión del bronce mediante la pérdida de peso de probetas experimentales	80

CAPÍTULO 8	
EFFECTO DE LOS PROCESOS DE COLONIZACIÓN BIOLÓGICA Y DE CORROSIÓN EN LA TRANSFORMACIÓN Y DEGRADACIÓN DEL HIERRO Y EL BRONCE	82
COMPOSICIÓN DE LAS MUESTRAS EXPERIMENTALES DE HIERRO Y DE BRONCE RESPECTO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ARTEFACTOS ARQUEOLÓGICOS	82
COLONIZACIÓN BIOLÓGICA DEL HIERRO Y SU EFECTO SOBRE EL PROCESO DE CORROSIÓN	85
Desarrollo de la biota sésil sobre la superficie de los discos colectores de hierro	85
La biota sésil y su efecto sobre el proceso de corrosión del hierro	95
Sobre las diferencias de magnitud de las velocidades de corrosión del hierro evaluadas mediante las técnicas de Polarización Potenciodinámica y Pérdida de Peso	100
EL PROCESO DE COLONIZACIÓN BIOLÓGICA EN LA FORMACIÓN DE LA CONCRECIÓN Y SU EFECTO SOBRE EL PROCESO DE CORROSIÓN DE VESTIGIOS ARQUEOLÓGICOS DE NATURALEZA FERROSA	105
COLONIZACIÓN BIOLÓGICA DEL BRONCE Y SU PROCESO DE CORROSIÓN	108
Desarrollo de la biota sésil sobre la superficie de los discos colectores de bronce	108
La biota sésil y su efecto sobre el proceso de corrosión del bronce	116
CAPÍTULO 9	
MODELO EXPERIMENTAL DE LAS PRIMERAS ETAPAS DE TRANFORMACIÓN Y DEGRADACIÓN DEL HIERRO Y EL BRONCE BAJO CONDICIONES DE TOTAL EXPOSICIÓN EN LOS FONDOS MARINOS DE CAMPECHE	118
CONCLUSIONES	125
REFERENCIAS	130

ANEXO I CATÁLOGO DE ESPECIES	137
ANEXO II CURVAS DE POLARIZACIÓN POTENCIODINÁMICA	156

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1.- Ubicación geográfica del área de estudio y localización de módulos experimentales y sistemas de aporte de agua epicontinental y ecosistemas estuarinos	22
Figura 2.- Diagrama de flujo de las fases de desarrollo de la investigación	27
Figura 3.- Probetas de hierro y de bronce empleadas en el estudio de pérdida de peso por efecto de la corrosión, así como en el análisis de composición química elemental	29
Figura 4.-Esquema del diseño desarrollado para la fabricación de los módulos experimentales.	30
Figura 5.- Discos colectores empleados en el estudio de la caracterización de la biota sésil y en las pruebas electroquímicas para la evaluación de su deterioro por corrosión. Nótese el sistema de sujeción empleado	31
Figura 6.- Bloque de cemento empleado para anclar al fondo marino los módulos experimentales	32
Figura 7.- Fabricación y colocación de probetas en los módulos experimentales para evaluación de la corrosión mediante la técnica gravimétrica	35
Figura 8.- Proceso fotográfico para el ensamble de los mosaicos	38
Figura 9.- Sistema de montaje de los discos colectores en el microscopio para la obtención de los fotomosaicos	40

Figura 10.- Potenciostato y celda electroquímica empleados en las pruebas de polarización potenciodinámica para el estudio del comportamiento electroquímico del hierro y el bronce, así como para la determinación de las velocidades de corrosión de estos materiales	43
Figura 11.- Riqueza total de especies por Phylum de la biota sésil que colonizó las muestras experimentales de hierro y de bronce durante los periodos de inmersión de 5, 10 y 15 meses	52
Figura 12.- Riqueza total de especies de la biota sésil desarrollada en los discos colectores de hierro y de bronce durante los periodos de 5, 10 y 15 meses de inmersión	52
Figura 13.- Riqueza de especies por tratamiento	54
Figura 14.- Cobertura por Phylum de la biota sésil que colonizó los discos colectores de hierro de 5, 10 y 15 meses de inmersión	64
Figura 15.- Cobertura por Phylum de la biota sésil que colonizó los discos colectores de bronce de 5 y 10 meses de inmersión	65
Figura 16.- Diversidad, Equidad y Dominancia de la biota sésil que colonizó la cara superior de los discos colectores de hierro durante los periodos de inmersión de 5, 10 y 15 meses	67
Figura 17.- Diversidad, Equidad y Dominancia de la biota sésil que colonizó la cara inferior de los discos colectores de hierro durante los periodos de inmersión de 5, 10 y 15 meses	69
Figura 18.- Comparación de la Diversidad, Equidad y Dominancia de la biota sésil que colonizó la cara superior e inferior de los discos colectores de hierro durante 5, 10 y 15 meses de inmersión	70
Figura 19.- Diversidad, Equidad y Dominancia de la biota sésil que colonizó la cara superior de los discos colectores de bronce durante los periodos de inmersión de 5, 10 y 15 meses	72
Figura 20.- Diversidad, Equidad y Dominancia de la biota sésil que colonizó la cara inferior de los discos colectores de bronce durante los periodos de inmersión de 5, 10 y 15 meses	73
Figura 21.- Velocidad de corrosión de colectores de hierro y de bronce expuestos durante los periodos de inmersión de 0, 5, 10 y 15 meses, calculada a partir de las pruebas de Polarización Potenciodinámica	75

Figura 22.- Peso medio perdido a lo largo del tiempo por efecto del proceso de corrosión de probetas experimentales de hierro y de bronce expuestas durante 5, 10 y 15 meses de inmersión	79
Figura 23.- Velocidad de corrosión de probetas experimentales de hierro y de bronce expuestas durante 5, 10 y 15 meses de inmersión, estimada a partir de su pérdida de peso	80
Figura 24.- Análisis de redundancia (RDA) aplicado a la biota sésil que colonizó los materiales experimentales de hierro y de bronce que estuvieron expuestos por 5 meses	87
Figura 25.- Análisis de redundancia (RDA) aplicado a la biota sésil que colonizó los materiales experimentales de hierro y de bronce que estuvieron expuestos por 10 meses	89
Figura 26.- Análisis de redundancia (RDA) aplicado a la biota sésil que colonizó los materiales experimentales de hierro y de bronce que estuvieron expuestos por 15 meses	90
Figura 27.-Sección transversal de la concreción de una bala de cañón procedente del sitio arqueológico “Don Pancho” en la Sonda de Campeche	106
Figura 28.- Cara de succión y de presión de una propela de bronce abundantemente colonizada, perteneciente a los restos de una embarcación hundida en el sitio arqueológico “Fipesco”, localizado en la Sonda de Campeche.	109
Figura 29.- Cara superior e inferior del colector de bronce 2D1Brass de 5 meses de inmersión colonizado por macroorganismos de vida sésil	114
Figura 30.- Individuos de <i>Ostrea permollis</i> y colonias de los briozoarios <i>Bugula neritina</i> (ramificado) y <i>Labioporella sinuosa</i> (incrustante) que colonizaron la cara superior de un colector de bronce	116
Figura 31.- Esquema general del deterioro y la transformación de los materiales experimentales de hierro a lo largo del tiempo por efecto de los procesos de corrosión y de colonización biológica de macroorganismos de vida sésil	121
Figura 32.- Esquema general del deterioro y la transformación de los materiales experimentales de bronce a lo largo del tiempo por efecto de los procesos de corrosión y de colonización biológica de macroorganismos de vida sésil	124

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1 Parámetros ambientales en el área de estudio	25
Tabla 2 Análisis químico de los materiales experimentales	28
Tabla 3 Elenco taxonómico	56
Tabla 4 Cobertura de la biota sésil que colonizó los discos colectores de hierro y de bronce de 5 meses de inmersión	61
Tabla 5 Cobertura de la biota sésil que colonizó los discos colectores de hierro y de bronce de 10 meses de inmersión	62
Tabla 6 Cobertura de la biota sésil que colonizó los discos colectores de hierro de 15 meses de inmersión	63
Tabla 7 Velocidades de corrosión estimadas a partir de la técnica de Polarización Potenciodinámica	76
Tabla 8 Datos experimentales de la pérdida de peso de probetas de hierro inmersas en el mar	78
Tabla 9 Velocidades de corrosión calculadas a partir de la pérdida de peso de probetas de hierro y de bronce	79
Tabla 10 Datos experimentales de la pérdida de peso de probetas de bronce inmersas en el mar	81
Tabla 11 Efecto de la comunidad de macroorganismos de vida sésil sobre el proceso de corrosión del hierro	99
Tabla 12 Análisis químico de materiales experimentales de bronce colonizados y no colonizados	112

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN GENERAL

“.....Dillon recogió numerosos restos del naufragio, utensilios de hierro, anclas, garruchas de poleas, pedreros, un proyectil de diez y ocho, piezas de instrumentos de astronomía, piezas de remate y una campana de bronce con la siguiente inscripción: “Construida por Bazin”, marca de la fundición del arsenal de Brest, en 1785.....”.

Julio Verne

Veinte mil leguas de viaje submarino

De acuerdo con la Convención sobre la Protección del Patrimonio Cultural Subacuático de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) celebrada en el año 2001 en París, se define como tal a todos los rastros de existencia humana que tengan un carácter cultural, histórico o arqueológico, que hayan estado bajo el agua, parcial o totalmente, de forma periódica o continua, por lo menos durante 100 años. Entre los vestigios considerados en esta definición se encuentran los sitios, estructuras, edificios, objetos, restos humanos, buques, aeronaves, otros medios de transporte o cualquier parte de ellos, así como su cargamento u otro contenido, junto con su contexto arqueológico y natural.

En los últimos años la creciente valoración a nivel mundial en diferentes sentidos del patrimonio cultural subacuático por parte de la comunidad científica y la sociedad en general, ha propiciado que éste se considere parte importante de la historia de diversas sociedades y de su identidad. Prueba de lo anterior es la presencia significativa de vestigios arqueológicos e históricos procedentes del

medio marino que se exhiben en espacios públicos en numerosas ciudades alrededor del mundo.

En México, el estado de Campeche cuenta con un considerable patrimonio cultural que evidencia un pasado con el cual su sociedad se siente identificada. Una parte de éste proviene de medios acuáticos y se localiza en tierra en diferentes espacios públicos principalmente en la capital del estado. Mientras que otra parte importante yace aún en sus fondos marinos, conformando su patrimonio cultural subacuático.

La presencia considerable de vestigios arqueológicos subacuáticos pertenecientes principalmente a embarcaciones de importancia histórica en esta área, se explica debido a la importancia que tuvo la ciudad y puerto de Campeche en la historia de la navegación en la época virreinal. La ruta de flotas y navíos que zarpaban de España con destino al puerto de Veracruz atravesaban por la Sonda de Campeche, zona que era muy conocida por el desafío que representaba a los navegantes y tecnología náutica de la época, debido a la presencia de cayos y bajos así como fenómenos naturales que dificultaban la navegación y, en ocasiones, contribuían al desenlace de un accidente marítimo.

La Subdirección de Arqueología Subacuática del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) en el marco de las actividades de investigación de diversos proyectos como son *Flota de la Nueva España de 1630-1631 e Inventario y Diagnóstico de Recursos Culturales Sumergidos en el Golfo de México*, *Programas Especiales de la Subdirección de Arqueología Subacuática*, así como el *Inventario del Patrimonio Cultural Subacuático del Estado de Campeche*, ha inventariado los sitios arqueológicos sumergidos que yacen en aguas marinas del estado de Campeche, catalogando a la fecha sólo para la costa de Campeche, 135 sitios cuyas cronologías van desde el siglo XVIII hasta el XX (Luna, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009; Barba, 2010). Estos

sitios se encuentran conformados principalmente por restos de embarcaciones hundidas entre los que destacan artefactos fabricados de hierro y de bronce como anclas, cañones, balas de cañón y propélas, aunque los artefactos fabricados de bronce se encuentran en menor proporción.

La UNESCO ha reconocido la importancia del patrimonio cultural subacuático al pronunciar una serie de recomendaciones derivadas de la Convención sobre la Protección del Patrimonio Cultural Subacuático, que se celebró en París en el año 2001; en donde se señaló como acción prioritaria su preservación *in situ* (Anexo/Principios Generales/Norma 1). Sin embargo, para poder llevar acabo lo anterior es de vital importancia la investigación de los procesos físicos, químicos y biológicos que de manera natural se llevan a cabo en el medio acuático y que afectan los materiales arqueológicos.

En este sentido, desde hace algunos años en México se han adoptado las recomendaciones establecidas por la UNESCO sobre la protección y conservación para dicho patrimonio, siendo Campeche el primer Estado del país en donde se han comenzado a realizar proyectos de investigación sobre los procesos naturales que afectan la preservación de vestigios arqueológicos de naturaleza metálica que provienen del mar y que por diversas razones han sido extraídos de su contexto original. Estas primeras investigaciones han sido realizadas por el Centro de Investigación en Corrosión de la Universidad Autónoma de Campeche (UAC) y la Subdirección de Arqueología Subacuática del INAH. No obstante, los procesos físicos, químicos y biológicos que afectan el Patrimonio Cultural Subacuático que yace en los fondos marinos de Campeche, prácticamente han permanecido sin ser evaluados ni estudiados. Así mismo, del patrimonio que yace en las aguas marinas en otros estados del país se conoce mucho menos, por lo que no se cuenta con datos sobre el deterioro de éste bajo las condiciones biológicas y ambientales que caracterizan las distintas regiones y zonas ecológicas en las que se localiza.

El desarrollo de investigaciones en otras partes del mundo sobre la degradación y transformación de estos materiales de importancia histórica y arqueológica bajo las condiciones reales que prevalecen en el medio marino en un sitio arqueológico no son muy numerosas, ya que la gran mayoría se han realizado bajo condiciones de laboratorio, razón por la cual los resultados obtenidos por este tipo de estudios tienen que ser aplicados con reserva. Es por ello que el presente estudio se enfoca en los procesos de colonización biológica y de corrosión que sufren los vestigios y materiales arqueológicos metálicos en condiciones naturales, abordando este tema desde un punto de vista experimental y bajo las características ambientales y biológicas propias de las aguas marinas de Campeche.

CAPÍTULO 2

PROCESOS NATURALES QUE INTERVIENEN EN LA TRANSFORMACIÓN Y DEGRADACIÓN DE MATERIALES ARQUEOLÓGICOS METÁLICOS

“.....Yo me precipité hacia el cristal, y entre los bancos de corales, revestidos de hongos, sifónulas, alciones y cariófilas, a través de miríadas de preciosos peces, distinguí ciertos restos que las dragas no pudieron arrancar, planchas de blindaje, anclas, cañones, balas, una armadura de cabrestante, una roda, objetos todos provenientes de navíos naufragados y a la sazón tapizados de flores vivientes”.

Julio Verne

Veinte mil leguas de viaje submarino

Cuando se observa el estado en el que son encontrados los vestigios arqueológicos pertenecientes a una embarcación hundida en el ambiente marino, es posible notar a simple vista que los vestigios han sido afectados por diversos procesos naturales debido a su interacción con el medio ambiente y los organismos marinos. De esta manera, se puede definir a los procesos naturales como todos aquellos factores bióticos y abióticos que afectan espacial, física y/o químicamente a los restos materiales en un sitio arqueológico sumergido (Elkin, 1998). Los factores bióticos son aquellos directamente relacionados con los organismos, mientras que los factores abióticos son aquellos relacionados con el medio marino y pueden ser físicos, químicos y/o fisico-químicos.

Entre los factores bióticos se pueden mencionar por ejemplo, los hábitos de alimentación de determinados tipos de organismos, sus formas de vida (ej. epifauna, infauna), sus formas biológicas, así como el desarrollo de estos organismos y sus comunidades sobre la superficie de los materiales

arqueológicos como se explica más adelante. Por otra parte, entre los factores abióticos físicos se pueden mencionar: la turbulencia del medio acuático, la dirección de la corriente, la temperatura, la incidencia de fenómenos meteorológicos, las mareas, etc. Entre los factores abióticos químicos y fisicoquímicos se encuentra la cantidad de oxígeno disuelto en el cuerpo de agua, el pH del medio acuático, la salinidad y la corrosión, entre otros.

El estudio de los procesos naturales se inicio hace relativamente poco tiempo. En este sentido, el trabajo realizado por Muckelroy, (1978) se considera uno de los primeros intentos por establecer y explicar los procesos naturales que transforman y degradan los materiales arqueológicos desde su hundimiento. La investigación de Muckelroy evaluó veinte sitios localizados sobre fondos arenosos cerca de las islas Shetland, en el Reino Unido, donde naufragaron diversas embarcaciones. Su investigación en estos contextos arqueológicos estableció que la dinámica y composición de los sedimentos, así como la pendiente y la topografía del fondo marino, fueron los factores más significantes en la transformación y degradación de los materiales y vestigios arqueológicos pertenecientes a estas embarcaciones hundidas.

A pesar de lo anterior, los factores que intervienen en la degradación de los vestigios arqueológicos en latitudes tropicales o bajas como las existentes en México, son diferentes en magnitud y tipo, debido por ejemplo a factores como la mayor temperatura, la cual es determinante en muchos de los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en los cuerpos de agua; o debido a la mayor actividad biológica de los organismos sobre los vestigios arqueológicos. En este sentido, los factores significantes determinados por Muckelroy en estos sitios localizados en aguas más frías y en fondos arenosos, tal vez no lo sean para otros sitios localizados en aguas cálidas y en diferentes tipos de ambientes. Por ejemplo, ¿Qué tan importante será la movilidad del fondo marino para la transformación y degradación de los materiales arqueológicos en un ambiente arrecifal? Probablemente la importancia de este factor dependerá de la zona en

donde se localicen los restos arqueológicos, siendo factores igualmente importantes la turbulencia en el medio acuático, así como la pendiente y la actividad biológica de los organismos sobre los materiales. Debido a lo anterior es importante evaluar la degradación de los materiales arqueológicos a través de distintas zonas geográficas y ecológicas e identificar los procesos de transformación y degradación significantes que actúan en cada una de ellas.

Por otra parte, hasta el momento se ha estudiado muy poco la relación existente entre los factores abióticos y bióticos, así como el efecto que de manera conjunta tienen sobre la degradación de los vestigios arqueológicos en un sitio sumergido, el cual presenta condiciones que no son comunes en la naturaleza. Sin embargo, el estudio de Muckelroy ha sido tomado como base para que investigadores en diferentes partes del mundo hayan comenzado a estudiar factores específicos que afectan la preservación de los vestigios arqueológicos que yacen en los fondos marinos.

Colonización y sucesión biológica en restos de embarcaciones hundidas y artefactos de naturaleza metálica

Uno de los procesos naturales más evidentes que se pueden observar en los sitios de naufragio que yacen en aguas tropicales, es el gran desarrollo de organismos sobre la superficie de los restos de embarcaciones hundidas, desde es el propio casco de la embarcación hasta aquellos artefactos fabricados de hierro, como anclas, cañones, entre otros. Destaca también que generalmente los materiales de bronce presentan una colonización biológica escasa o nula, aunque en ocasiones se pueden llegar a encontrar artefactos de bronce con una biota sésil relativamente abundante desarrollándose sobre su superficie. Por ejemplo esto ha sido observado en algunos sitios localizados en aguas someras (~10m) en la Sonda de Campeche, donde algunos artefactos como propélas de

bronce pertenecientes a estas embarcaciones hundidas, han sido hallados con un desarrollo biológico relativamente abundante.

De manera general, se les conoce a las comunidades biológicas asociadas con el fondo marino o con el sustrato como comunidades bentónicas. El desarrollo de estas comunidades sobre la superficie de un sustrato es el resultado de la acción de dos procesos, la colonización y la sucesión biológica. La colonización biológica es entendida como el proceso por el cual la superficie de algún sustrato duro natural (rocoso, carbonatado, cantos rodados, etc.,) o artificial (naufragios, estructuras industriales, muelles, cascos de embarcaciones, etc.,) es habitada por comunidades de organismos de forma de vida móvil o sésil² (entiéndase estos últimos como aquellos que se adhieren y permanecen fijos a alguna superficie dura, al menos durante una parte de su ciclo de vida). Así mismo, se considera que las comunidades de organismos de formas de vida sésil que colonizan materiales culturales como son restos de embarcaciones hundidas o artefactos de naturaleza metálica, representan un grupo ecológico distinto al de las comunidades que se desarrollan sobre sustratos naturales inmediatos.

Se ha establecido que el mecanismo general por el que los organismos sésiles llegan a colonizar un sustrato duro natural o artificial involucra las siguientes etapas: (1) el transporte; (2) el asentamiento; (3) la fijación, (4) el desarrollo y (5) el crecimiento de los organismos. Aunque, el proceso de colonización también depende del transporte activo (debido a la actividad locomotora de juveniles, propágulos o adultos) o pasivo (debido al transporte por corrientes) de las etapas larvales.

Por otra parte, la sucesión biológica representa un proceso por el cual una comunidad cambia por otra, en una escala de tiempo que ocurre en los periodos

² La gran mayoría de autores coincide en nombrar a las comunidades de organismos de forma de vida sésil que colonizan sustratos artificiales como *biofouling* o *fouling*

de vida de los organismos. De esta manera Mackenzie et al., (1998) *apud* Huerta y Guerrero (2004) señala que la sucesión se puede definir como el cambio gradual, secuencial y direccional en composición de especies de una comunidad. Cuando este cambio ocurre en un sustrato duro de reciente exposición que no soportaba una comunidad anterior, se le conoce con el nombre de sucesión primaria. Si este cambio ocurre en un sustrato que ya soportaba una comunidad se denomina sucesión secundaria. Numerosos estudios sobre la sucesión de comunidades de macroorganismos bentónicos sésiles se han llevado a cabo. En éstos, se ha establecido que las primeras fases de desarrollo de comunidades que se desarrollan en un sustrato duro de reciente exposición se encuentran dominadas por grupos de organismos de rápido crecimiento; mientras que las siguientes etapas son dominadas por organismos de lento crecimiento.

Algunos autores señalan que la sucesión puede finalizar con un periodo de clímax de corta duración, que se caracteriza por una abundancia y número de especies estable, el cual se puede alcanzar en unos cuantos años dependiendo de la profundidad y la zona climática. Aunque en muchos casos, disturbios ambientales pueden regresar a etapas tempranas el proceso de sucesión biológica y el periodo de clímax puede no presentarse.

Estos cambios en las comunidades son producidos como respuesta a disturbios y cambios ambientales, así como a las propias interacciones hacia el interior de la comunidad (competencia entre individuos o la depredación), que modifican la estructura física de las comunidades, expresada en términos de composición de especies, abundancias (o coberturas) formas de crecimiento y formas de vida. En este sentido, se puede decir que las comunidades y los ecosistemas no son estáticos y cambian a lo largo del tiempo.

Concreciones formadas en artefactos metálicos

Generalmente, cuando se observan cortes transversales de artefactos metálicos (principalmente aquellos fabricados de hierro) que han estado sumergidos por un periodo de tiempo histórico, es posible apreciar que en la superficie de éstos se ha formado una capa conocida como concreción, la cual ha cubierto la superficie original del artefacto. Con base en el análisis de estas concreciones, se ha visto que dicha capa se forma cuando los productos de corrosión se mezclan y difunden a través del material adyacente al metal, por lo que se pueden diferenciar dos tipos de concreciones. El primer tipo se forma cuando este material adyacente se encuentra conformado por los restos biológicos de organismos que producen estructuras de carbonato de calcio (CaCO_3), tales como anélidos, briozoarios, entre otros. Por ejemplo, esta concreción se encuentra en artefactos que yacen expuestos sobre el lecho marino. El segundo tipo se forma cuando el material adyacente está constituido por sedimentos, los cuales se mezclan con los productos de corrosión. Este tipo de concreción se presenta en artefactos metálicos que se encuentran parcialmente o totalmente debajo del sedimento en el lecho marino. No obstante, los sedimentos también pueden contener restos biológicos como fragmentos de conchas, de coral u otros organismos.

Algunos autores como North y MacLeod, (1987) sugieren que la formación de la concreción en la superficie de artefactos arqueológicos tiene un papel importante en su proceso de transformación y degradación, ya que favorece en algunos casos la consolidación de agrupaciones de objetos en sitios de naufragio, además de que provee una barrera física que de cierta manera aísla a los vestigios del medio marino y reduce la abrasión mecánica causada por la movilidad del fondo marino y las partículas de sedimento que se encuentran en suspensión. Por otra parte, sugieren también que esta concreción actúa como una barrera física de baja porosidad que retarda el intercambio de

especies químicas entre el metal y el ambiente marino en el proceso de corrosión.

Proceso general de corrosión de metales

La corrosión es un proceso espontáneo que involucra una serie de reacciones químicas de oxidación y reducción que ocurren en diferentes áreas de la superficie del metal. La corrosión de los metales por presencia de oxígeno ocurre cuando la superficie de éste se pone en contacto con algún agente oxidante como el oxígeno atmosférico o el disuelto por ejemplo en el agua de mar. En este caso, cuando un metal es sumergido en un medio acuoso, algunas áreas de éste sufren una oxidación al ceder electrones (en estas áreas se lleva a cabo la disolución del metal), lo que se conoce como reacción anódica,³ mientras que en otras áreas el oxígeno se reduce al aceptar los electrones provenientes del metal, a ello se le llama reacción catódica⁴. Ambas reacciones ocurren simultáneamente, por lo que el número de electrones que se producen y se consumen por unidad de tiempo debe ser igual para mantener la neutralidad de cargas en el metal. Los electrones se mueven de las áreas anódicas a las catódicas en toda la superficie del metal, por lo que debido al flujo de electrones se produce una corriente eléctrica, que sin embargo esta cortocircuitada.

A simple vista es imposible distinguir estas áreas, debido a su naturaleza microscópica. No obstante, se sabe que debido a que las áreas anódicas y catódicas cambian continuamente de posición, el metal se disuelve de forma homogénea. Dado que una transformación electroquímica produce un trabajo eléctrico, es posible medir en Volts (V) el potencial generado en la interfase electrificada entre el metal y el medio. Al potencial generado en dicha interfase se le conoce como Potencial de Corrosión o Electroquímico (E_{cell}).

³ Reacción de oxidación (anódica) $M \rightarrow M^{2+} + 2e^{-}$

⁴ Reacción de reducción (catódica) $\frac{1}{2} O_2 + 2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2O$

Por otra parte, el proceso de corrosión es dependiente del pH, por lo que en soluciones ácidas⁵ ocurre cuando los iones H⁺ actúan como agente oxidante. Así mismo, la difusión en un medio acuoso de los iones positivos y negativos que se generan en las áreas anódicas y catódicas respectivamente, depende de la conductividad eléctrica de la solución o electrolito en la que se encuentra el metal. La difusión de estos iones se facilita en soluciones con una alta conductividad iónica como el agua de mar. Por esta razón, la corrosión de los metales se favorece en el medio marino.

Otros factores como la temperatura y la composición del metal también afectan el proceso de corrosión de los metales. Sumado a lo anterior, un contexto arqueológico no es un lugar común, por lo que otros factores tienen que ser considerados para evaluar la degradación de artefactos metálicos. Por ejemplo, se ha visto en sitios arqueológicos, que artefactos metálicos que se localizan a unos cuantos centímetros o metros de distancia y que aparentemente se encuentran bajo condiciones similares, son corroídos individualmente de manera distinta, por lo que estos objetos presentan diferencias considerables en el grado de deterioro. Lo anterior permite inferir que el proceso de corrosión depende de una gran diversidad de variables, por lo que el proceso debe de estar influenciado por factores tales como si los artefactos yacen expuestos sobre el lecho marino, si se encuentran parcialmente enterrados ó si se están completamente enterrados en el sedimento. En este sentido, se desconocen muchos de los procesos que intervienen en la transformación y degradación de los vestigios arqueológicos bajo condiciones naturales desde que éstos fueron depositados en el fondo marino como resultado de un evento de naufragio.

⁵ Reacción de reducción (catódica) en medios ácidos $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$

CAPÍTULO 3

ESTUDIOS SOBRE LA TRANSFORMACIÓN Y DEGRADACIÓN DE VESTIGIOS ARQUEOLÓGICOS

ANTECEDENTES

Colonización biológica de sustratos artificiales

El proceso de colonización biológica de materiales culturales en el ambiente marino (no específicamente de vestigios arqueológicos), ha sido estudiado frecuentemente por medio de la experimentación con cerámica, PVC o acrílico. Ejemplo de estos trabajos incluyen los de Sutherland (1974, 1978), Carlson (1977), Wahl, (1989, 1997) *apud* Railkin, *op. cit.*, así como los de Herrera (2000), por mencionar algunos. Lo relevante de este aspecto, es que a partir de trabajos como los mencionados, se han podido establecer esquemas generales de colonización y sucesión biológica sobre materiales artificiales.

Respecto de la colonización biológica de materiales arqueológicos en contextos marinos, existen muy pocos estudios realizados. En este sentido, destaca el trabajo de Bastida et al., (2004, 2008) y Elkin *op. cit.*, en Puerto Deseado, Argentina, en el sitio conocido como Swift. Este estudio se enfocó en el proceso de colonización biológica de los vestigios de un naufragio inglés del siglo XVIII, con el objetivo de evaluar el grado de afectación de dichos vestigios por parte de la comunidad biológica. Para llevar a cabo este estudio se utilizaron placas de acrílico como sustrato artificial, lo que permitió evaluar el proceso de colonización biológica de los materiales arqueológicos en este sitio de una manera experimental.

Deterioro de vestigios arqueológicos metálicos

En cuanto a las investigaciones realizadas sobre el deterioro de vestigios arqueológicos metálicos, se encuentran algunos estudios relevantes en donde se ha tratado de determinar el efecto de las comunidades biológicas sobre el proceso de corrosión de cascos metálicos de embarcaciones hundidas de importancia histórica. En este sentido, destacan los trabajos de Murphy (1990, 1993), Lenihan (1990) y Russell, et al., (2006) en Pearl Harbor, Hawai sobre embarcaciones de la Segunda Guerra Mundial. Uno de los estudios más relevantes es el realizado por Lenihan, *op. cit.*, sobre el casco de acero al bajo carbono del *USS Arizona*, donde después de varios años de investigación los resultados indicaron una probable asociación entre los cambios en la estructura de la biota sésil y el proceso de corrosión del casco de esta embarcación. La evaluación del deterioro por corrosión que ha sufrido el casco del *USS Arizona* se ha realizado mediante el estudio de las propiedades físicas y químicas de la concreción biológica formada en la superficie del casco, con lo cual se ha podido estimar la tasa promedio de corrosión (mm año^{-1}) del casco de esta embarcación desde su hundimiento.

Así mismo, los trabajos realizados por MacLeod (2002, 2006) y McLeod and Schindelholz, (2004) en sitios de naufragio localizados tanto en latitudes medias como tropicales de Australia, han evaluado de la misma manera la tasa promedio de corrosión (mm año^{-1}) de artefactos metálicos de hierro. De hecho, MacLeod fue el primer investigador en implementar esta técnica para estimar las tasas de corrosión de artefactos arqueológicos a partir del estudio de su concreción y que después fue empleada en el *USS Arizona*. De acuerdo con el mismo MacLeod, el proceso de corrosión a largo plazo de artefactos arqueológicos depende del desarrollo de la concreción marina, la cual señala, funciona como una barrera física que reduce el intercambio de especies químicas entre el medio marino y la superficie metálica del artefacto.

Por otra parte, la investigación de la degradación de vestigios arqueológicos bajo condiciones reales en el medio marino, también se ha comenzado a realizar mediante la experimentación con materiales de la misma naturaleza o semejantes a los que eran usados en la construcción de embarcaciones antiguas o para la fabricación de objetos arqueológicos. Entre estas investigaciones destaca el trabajo realizado por Palma, (2005) en tres sitios de naufragio localizados en Alemania, Holanda y Finlandia respectivamente. Aunque los materiales analizados en este caso no fueron metálicos, el estudio resulta interesante ya que analizó los factores físicos, químicos y biológicos que intervienen en la degradación de madera enterrada en el sedimento y expuesta a las condiciones del medio marino.

Históricamente el efecto de los organismos sobre objetos y estructuras hechas por el hombre que yacen sumergidas en el medio marino como los propios cascos de las embarcaciones, muelles, entre otros, ha tenido un interés particular debido a las implicaciones de mantenimiento, técnicas y económicas que conlleva. Por este motivo, recientemente se han realizado una gran cantidad de estudios al respecto. Sin embargo, estos estudios se enfocan en materiales modernos, cuya composición es muy diferente a la de los materiales arqueológicos de hierro y de bronce que eran empleados en la fabricación de artefactos para la navegación o de artillería como anclas y cañones. No obstante, vale la pena destacar algunos de ellos debido a que aportan conocimientos que pueden ser extrapolados sobre el proceso de corrosión. Entre los más relevantes se puede citar el realizado por Neville y Hodkiess, (2000), en la costa oeste de Escocia. Durante un periodo de 18 meses, se sumergieron muestras de dos clases de aceros comerciales y se evaluó la corrosión y el asentamiento de los organismos colonizadores. Otras investigaciones destacadas son las realizadas en el mar Caspio sobre ductos industriales que yacen en el lecho marino, donde se han identificado diferentes zonas de corrosión relacionadas con los patrones de distribución de determinados organismos (Railkin, *op. cit.*).

En México, el deterioro de vestigios arqueológicos en sitios sumergidos ha involucrado en una primera etapa la identificación de diversas especies que debido a sus formas de vida o hábitos alimenticios afectan principalmente vestigios de madera de embarcaciones hundidas (XVIII-XX) que yacen en las aguas marinas del estado de Campeche. En este sentido, el trabajo realizado por López, (2008), plantea el papel de los organismos marinos en la degradación y transformación de vestigios arqueológicos, así como la importancia de su estudio para el establecimiento de directrices de conservación *in situ*.

La importancia del patrimonio cultural subacuático reconocida a nivel mundial, ha propiciado condiciones favorables en Campeche para la realización de proyectos de investigación encaminados al estudio del deterioro de vestigios arqueológicos sumergidos o para la preservación de vestigios procedentes del medio marino. De esta manera, durante el año 2005 se estableció un convenio entre la Subdirección de Arqueología Subacuática del INAH y el Centro de Investigación en Corrosión de la UAC, creando un vínculo mediante el cual se inició uno de los primeros proyectos titulado, “Determinación del grado de deterioro y aplicación de métodos de preservación de piezas metálicas consideradas como patrimonio cultural de la ciudad de Campeche”, el cual se enfocó principalmente en el deterioro por corrosión que sufren piezas arqueológicas metálicas (algunas de ellas procedentes del medio marino) que se exhiben en espacios públicos de la ciudad de Campeche. En este sentido, recientemente la Subdirección de Arqueología Subacuática comenzó a desarrollar otro proyecto que lleva por nombre “Determinación de procesos químicos y biológicos marinos que intervienen en la degradación de materiales arqueológicos metálicos del patrimonio cultural sumergido en Campeche”, el cual está orientado al estudio del deterioro de artefactos de hierro y de bronce por efecto de la corrosión y de diversos procesos biológicos. Finalmente, cabe destacar que dentro del marco de este proyecto se desarrolló la presente investigación.

CAPÍTULO 4

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

OBJETIVOS

General

Evaluar la transformación y degradación de materiales metálicos de importancia arqueológica, expuestos a las condiciones ambientales y biológicas marinas que afectan el Patrimonio Cultural Sumergido en Campeche.

Específicos

- Evaluar durante un ciclo anual el grado de deterioro por corrosión, así como la transformación *in situ* de materiales experimentales de hierro y de bronce expuestos a condiciones biológicas y ambientales marinas.

- Describir la estructura de la comunidad macrobentónica sésil que se desarrolle sobre la superficie de materiales experimentales de hierro y de bronce durante un ciclo anual.

- Evaluar el proceso de colonización y sucesión de la comunidad bentónica que se desarrolle en la superficie de los materiales durante el ciclo anual, así como su efecto sobre el proceso de corrosión de los mismos.

- Determinar y evaluar las velocidades de corrosión del hierro y del bronce durante un ciclo anual.
- Determinar y evaluar la pérdida de masa de estos materiales por efecto del proceso de corrosión.
- Generar un modelo de las primeras etapas de degradación y transformación de materiales metálicos de interés arqueológico por factores químicos y biológicos en el medio marino.

JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Debido a que el patrimonio cultural con que cuenta el estado de Campeche ha sido considerado de gran valor arqueológico, histórico e identitario, en los años recientes se han identificado diversas demandas y necesidades específicas en relación con su rescate y preservación. No obstante, el patrimonio cultural de Campeche no sólo se conforma por edificaciones o estructuras, sino también por artefactos de naturaleza metálica como cañones, anclas, balas de cañón, entre otros, los cuales provienen de medios acuáticos y se encuentran en exhibición en diferentes espacios públicos en la ciudad. Así mismo, otra parte importante de este patrimonio conformado por los mismos tipos de artefactos metálicos y demás restos de embarcaciones hundidas, yace aún sumergido en los fondos marinos del estado, por lo que debido a las condiciones naturales bajo las que se encuentra, así como a las limitaciones técnicas y legales que se tienen en la actualidad para su protección y preservación *in situ*, hacen que el patrimonio cultural sumergido de Campeche se encuentre en riesgo de destrucción.

La preservación *in situ* del patrimonio cultural sumergido se ha comenzado a perfilar como una de las grandes alternativas para su protección y preservación debido a que presenta diversas ventajas, entre ellas, el ahorro en los costos excesivos de conservación que generalmente tienen que ser invertidos en piezas y artefactos recuperados de medios acuáticos. Por ello, si no se puede garantizar la conservación de los vestigios arqueológicos fuera del medio acuático, la opción primaria es que permanezcan en su contexto original y en su caso, aplicar las estrategias de preservación que se determinen. Sin embargo, para poder proponer técnicas y/o estrategias de preservación *in situ*, se requiere conocer en detalle la forma en que los diversos procesos biológicos y químicos afectan en su conjunto la degradación y transformación de los materiales arqueológicos en un sitio sumergido, ya que hasta hace poco se habían estudiado en su gran mayoría bajo condiciones de laboratorio o no han sido estudiados aún, como por ejemplo, en el caso de México en donde hasta fechas recientes se han comenzado a desarrollar investigaciones al respecto.

Es por ello, que resulta pertinente evaluar el deterioro que sufren el hierro y el bronce de manera natural bajo las condiciones que caracterizan los fondos marinos en esta área, ya que de estos materiales se encuentran hechos una gran cantidad de los artefactos arqueológicos que conforman el patrimonio cultural sumergido con que cuenta el estado de Campeche.

De esta manera se puede contribuir con datos obtenidos bajo condiciones reales que ayuden en el establecimiento de procedimientos técnicos de preservación *in situ*, o bien, durante intervenciones arqueológicas, y que disminuyan el impacto en el deterioro de este patrimonio cultural. Por último, el desarrollo metodológico que se implemente en este proyecto permitirá también a la Subdirección de Arqueología Subacuática, aplicar las mismas técnicas para evaluar y comparar la degradación y transformación de artefactos metálicos en otras regiones o Estados del país.

HIPÓTESIS

Al exponer los materiales experimentales de hierro y de bronce a las mismas condiciones que caracterizan los fondos marinos en Campeche, en donde yacen una gran cantidad de materiales y artefactos arqueológicos de la misma naturaleza metálica; serán afectados por procesos de colonización biológica y corrosión semejantes a los que impactan el Patrimonio Cultural Sumergido en esta área.

En este sentido, la estructura de las comunidades macrobentónicas de organismos de formas de vida sésil que se desarrollan en la superficie del hierro y del bronce, será diferente entre materiales, así como través del tiempo.

El deterioro de los materiales se incrementará durante el ciclo anual:

- a) debido al proceso de corrosión
- b) debido al desarrollo biológico sobre la superficie de estos materiales
- c) al efecto combinado por corrosión y desarrollo biológico del hierro y el bronce.

CAPÍTULO 5

CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES Y OCEANOGRÁFICAS DEL ÁREA MARINA ADYACENTE A LA CIUDAD DE CAMPECHE

El área de estudio se caracteriza por la presencia de tres estaciones climáticas. La primera de ellas que es la época de secas, que ocurre aproximadamente de febrero a mayo, mientras que de junio a octubre se presenta la época de lluvias, durante la cual la región es afectada por ciclones y tormentas tropicales. A partir de octubre y hasta casi finales de febrero se presenta la época de “nortes” o tormentas de invierno (Carabias et al., 1997). En aguas someras, la época de secas se presenta como una fase de estratificación térmica, mientras que la época de lluvias y “nortes” reflejan mezcla de la columna de agua.

El patrón de vientos que inciden en el área durante la época de “nortes” provienen del Noroeste y su velocidad promedio es mayor a 8ms^{-1} , lo cual se debe al movimiento de masas de aire frío y seco, provenientes de la porción continental de Estados Unidos y Canadá. El resto del año predomina la brisa marina con vientos del Nornoreste y Estesureste con mínima existencia de vientos del Suroeste. La velocidad promedio de estos vientos varía entre 4 y 6ms^{-1} (Carabias et al., *op. cit.*).

El área marina adyacente a la ciudad de Campeche se caracteriza por presentar un fondo compuesto de arenas de grano medio a fino (Gutiérrez-Estrada et al., 2003), con una topografía plana de pendiente suave. Aunque en algunas áreas cercanas a la costa predominan fondos arenosos dominados por pastos marinos. De acuerdo con Salas-de-León, (1986) *apud* Salas-de-León, (2007), la marea es del tipo mixto con dominancia diurna y una amplitud de

0.18m. Destaca que en esta área la plataforma continental tiene una extensión de más de 150km y se encuentra conformada de carbonato de calcio (CaCO_3).

Como se muestra en la Figura 1, los materiales experimentales de hierro y de bronce fueron sumergidos a 19km de la costa en el sitio denominado ARQBIO-1 a una profundidad de 9m.

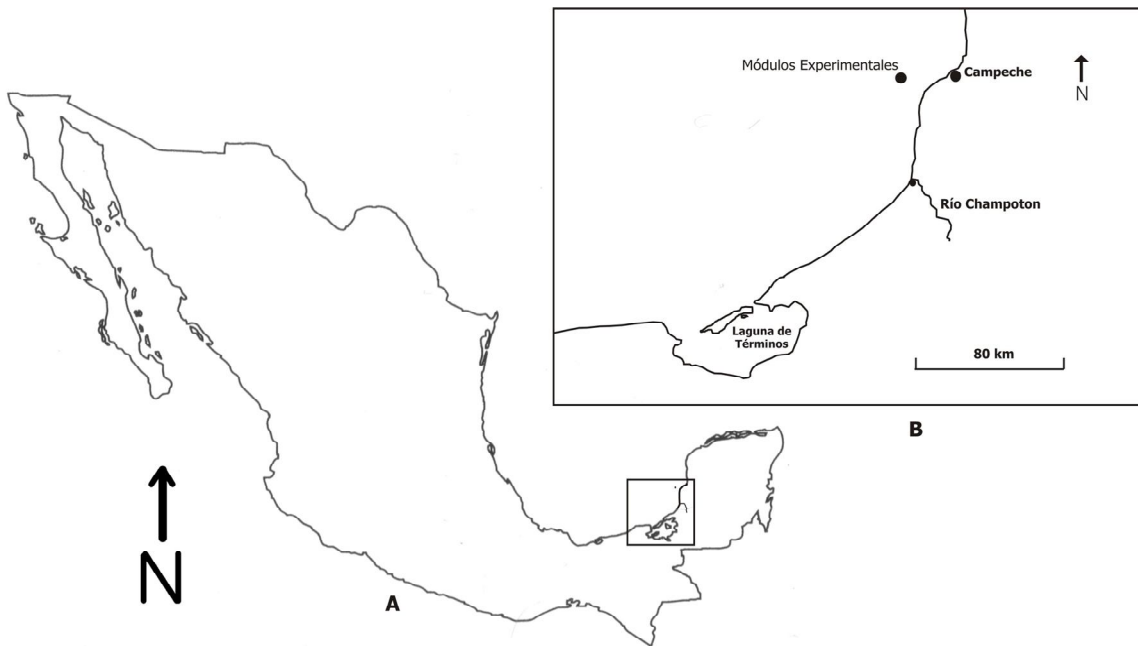


Figura 1.- (A) Ubicación geográfica del área de estudio (B) Localización de módulos experimentales y sistemas de aporte de agua epicontinental y ecosistemas estuarinos

La elección del sitio se realizó con base en la representatividad de las condiciones ambientales (como profundidad⁶, turbidez, temperatura, etc.) bajo las cuales yacen la mayoría de vestigios arqueológicos que han sido catalogados por la Subdirección de Arqueología Subacuática en esta área. Así mismo, con el fin de evitar saqueo o robo de colectores, se seleccionó un área sin la presencia

⁶ Para este estudio y con base en las consideraciones técnicas del buceo con equipo SCUBA que limitan el tiempo de registro arqueológico subacuático en función de la profundidad, se considera que aquellos contextos arqueológicos que se encuentran en el intervalo de cero a 30m yacen en aguas someras. Por lo que aquellos contextos que yacen por debajo de este límite se considera yacen en aguas profundas.

de contextos arqueológicos demasiado cercanos, los cuales representan sitios de pesca de la comunidad local. Por último, también se consideró la topografía y pendiente del fondo para garantizar la estabilidad e integridad de los módulos experimentales.

Los cuerpos de agua epicontinental más importantes en la región y en el estado de Campeche son la Laguna de Términos y el Río Champotón (Fig. 1). Datos mostrados por Salas de León et al., (1996), sobre la influencia fluvio-lagunar en el Banco de Campeche durante el verano, indican que ésta se puede extender en dirección este-oeste, debido al periodo de lluvias en la región y el giro ciclónico que se presenta en el Golfo de México. Sin embargo, este patrón de circulación tiene muy poco efecto en el área de estudio. Por otra parte, la salinidad evaluada por Monreal et al., (1992) para el otoño de 1987 en un área que comprende la localización donde yacen los módulos experimentales, fue de 37, incluso en áreas relativamente cercanas a la desembocadura del río Champotón, que es el cuerpo de agua epicontinental que podría tener un mayor efecto sobre la salinidad en el sitio de localización de los dispositivos experimentales. Sin embargo, el sitio de experimentación se localiza muy al norte de estos sistemas, por lo que no existen cuerpos de agua importantes que influyan de manera significativa en la salinidad en el área de estudio. En este sentido, evaluaciones actuales de la salinidad en el área reportan valores de 37 y 38 (De la Lanza, *et. al.*, 2007), por lo que se puede considerar que es una de las regiones de más alta salinidad en todo el Golfo de México.

Los registros de temperatura realizados durante el otoño de 1992 por Monreal et al., *op. cit.* en la Bahía de Campeche, mostraron que en aguas superficiales (hasta una profundidad de 10m) la temperatura en la columna de agua se mantuvo relativamente constante entre 25.5°C y 25.2°C. Por otro lado, los registros realizados por la Subdirección de Arqueología Subacuática (SAS) del INAH en el área de estudio durante los años 2008 y 2009 mostraron que en la época de “nortes” las temperaturas en superficie y en el fondo a 10m de

profundidad fueron de 26°C o menores. Mientras que en la época de secas los valores de temperatura que se han registrado alcanzaron los 31°C en la superficie y en el fondo (10m) de 28°C. Esto refleja en cierta medida la mezcla que se presenta en la columna de agua durante el periodo de lluvias y el periodo de nortes, así como la estratificación térmica en esta zona poco profunda durante la época de secas.

Los registros de oxígeno disuelto realizados por la SAS durante los citados años en esta área en la época de nortes fueron de 5.86mg L⁻¹ en superficie y 6.07mg L⁻¹ en el fondo (10m). Mientras que a principio y final de la época de lluvias los valores promedio oscilan entre 5.80mg L⁻¹ en la superficie y 6.0mg L⁻¹ en el fondo. La columna de agua en el sitio durante la época de nortes se encontró subsaturada con valores entre 87.6% en superficie y 87.7% en el fondo. Los registros de pH en el sitio al final de época de lluvias fueron de 7.65 en superficie y 7.91 en el fondo. En la época de “nortes” los valores de pH registrados para el sitio fueron de 8.16 en superficie y de 8.14 en el fondo.

Diversos investigadores han considerado que la Bahía de Campeche es una región de productividad biológica relativamente alta en comparación con el resto del Golfo de México y el Mar Caribe adyacente. De acuerdo con Licea y Santoyo, *op. cit.*, los valores más bajos de nutrientes (NO₃¹⁻, PO₄³⁻, SiO₄⁴⁻), se localizan cerca de la costa, mientras que en su distribución vertical las concentraciones más altas se presentan a mayor profundidad.

Por último, como resumen de lo descrito anteriormente se presenta la Tabla 1 con las principales características ambientales y marinas del sitio ARQBIO-1.

Tabla 1 Parámetros ambientales en el área de estudio

Parametros del medio acuático	Valores
Temperatura	31°C (superficie) 28°C (fondo) (secas)
	27.5°C (superficie) 26.4°C (fondo) (lluvias)
	<26°C (superficie y fondo) (nortes)
Salinidad	38
Oxigeno disuelto	5.80mg L ⁻¹ (superficie) 6.0mg L ⁻¹ (fondo) (lluvias)
	5.86mg L ⁻¹ (superficie) 6.07mg L ⁻¹ (fondo) (nortes)
pH	7.65 (superficie) 7.91 (fondo) (lluvias)
	8.16 (superficie) 8.14 (fondo) (nortes)
Profundidad	9m
Tipo de marea y amplitud	Mixto con dominancia diurna - 0.18m
Sedimentos	Arenas de grano fino
Pendiente	Suave

Secas= febrero a mayo Lluvias= junio a octubre nortes= octubre a febrero

CAPÍTULO 6

PROCEDIMIENTOS Y TÉCNICAS DE ANÁLISIS EMPLEADOS EN LA EVALUACIÓN DE LA TRANSFORMACIÓN Y DEGRADACIÓN DEL HIERRO Y EL BRONCE

El trabajo realizado se integró de cuatro etapas principales. La primera correspondió a la fase experimental que se realizó en campo, tanto de diseño, como de fabricación y colocación de los módulos en el sitio de experimentación ARQBIO-1, así como de muestreo para la recolección de los materiales de hierro y de bronce. La segunda etapa comprendió todos los procesos y técnicas seguidos en el laboratorio para la obtención de los datos biológicos y de corrosión. La tercera etapa correspondió al procesamiento de la información obtenida en campo y en laboratorio. Por último, la cuarta etapa fue aquella en donde se integró toda la información obtenida para la elaboración del modelo experimental de las primeras etapas de degradación y transformación de materiales arqueológicos de hierro y de bronce en fondos marinos de Campeche (Fig. 2).

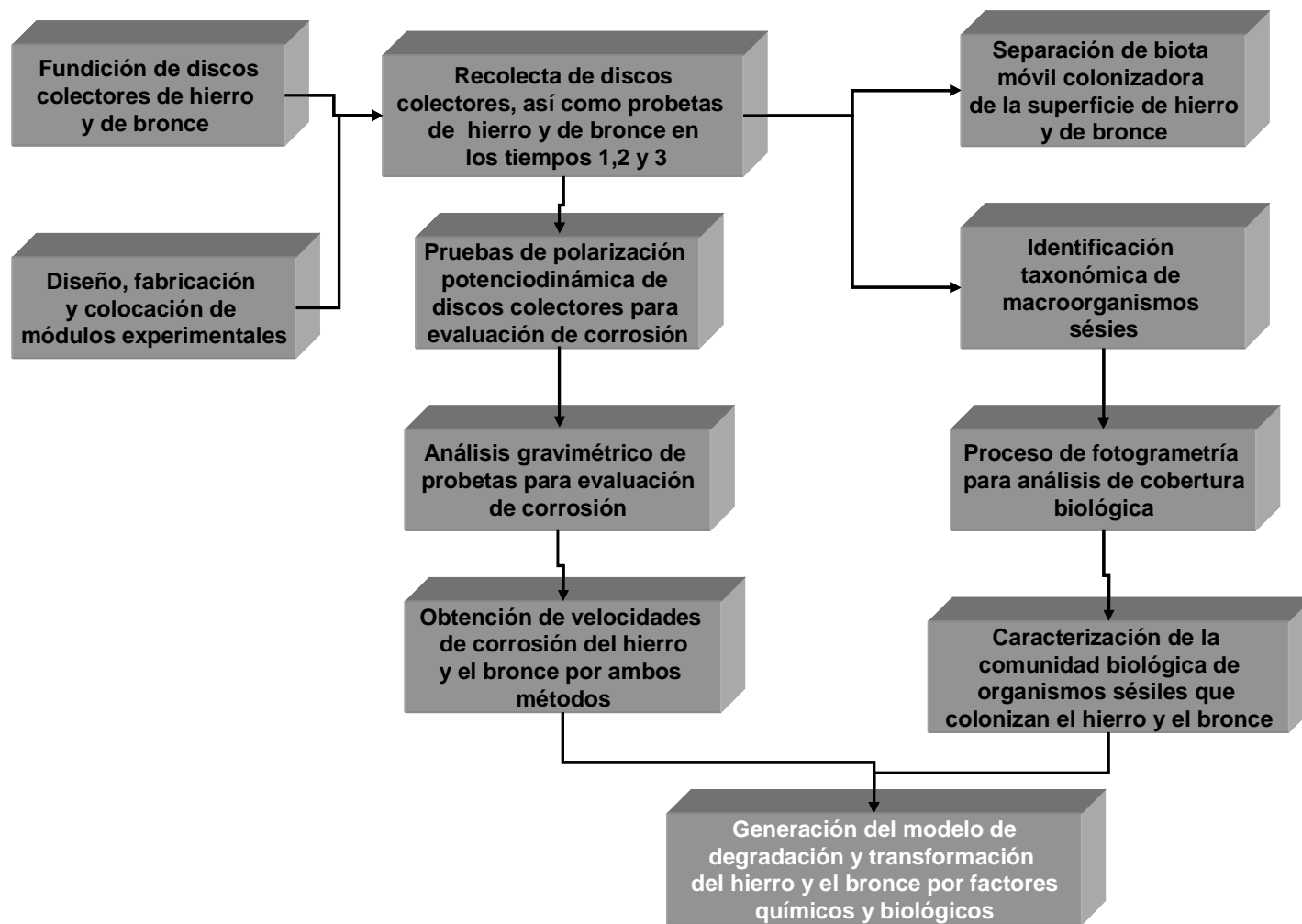


Figura 2.- Diagrama de flujo de las fases de desarrollo de la investigación

DISEÑO DE MUESTREO

Fundición de discos colectores de hierro y de bronce para la evaluación de su transformación y degradación por procesos de colonización biológica y de corrosión

Para llevar a cabo el estudio se fundieron discos colectores de hierro y de bronce. Cada uno de ellos presentó las siguientes dimensiones: 0.17m de diámetro, un área de 0.022m² por cara y 6 x 10⁻³m de espesor (Fig. 5).

Tabla 2 Análisis químico de los materiales experimentales (Peso-%)

MATERIAL	Fe	C	P	S	Si	Cr							
Hierro	92.94	3.22	1.38	ND	1.80	0.65							
σ	± 1.66	± 1.62	± 0.37		± 0.38	± 0.30							

MATERIAL	Cu	Sn	Zn	Pb	Fe	Ag	Sb	As	Ni	Si	Mn	C	O
Bronce	67.80	0.65	22.76	0.77	1.69	ND	ND	0.60	0.60	1.57	ND	2.71	0.85
σ	± 1.21	± 0.34	± 0.85	± 0.57	± 0.24			± 0.45	± 0.26	± 0.22		± 1.08	± 0.46

ND= No determinado

La composición elemental de los materiales experimentales con que fueron fundidos los discos colectores se muestra en la Tabla 2. Cabe señalar, que la composición elemental fue corroborada mediante análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía por dispersión de energía de rayos X característicos (EDS) en modo de alto vacío⁷. Para ello se analizaron diversos fragmentos de hierro y de bronce de 0.025m de largo, 0.015m de ancho y 6 x 10⁻³m de espesor cada uno de ellos, los cuales se obtuvieron a partir de los discos colectores. Dichos fragmentos se les denominó como probetas (Fig. 3). Estas probetas fueron pulidas en algunas de las caras laterales con lijas de 100,

⁷ Durante esta prueba se emplearon señales de electrones secundarios y retrodispersados en las pruebas de SEM y EDS respectivamente.

280, 500 y 1000 grit⁸ hasta darles un acabado a espejo. Posteriormente fueron lavadas con agua destilada y secadas. De esta manera la superficie pulida fue atacada con reactivo de Marble⁹ por unos pocos segundos. Estas superficies fueron sometidas entonces al análisis EDS en un microscopio electrónico de barrido marca JEOL JSM-6460LV con una microsonda marca OXFORD y un procesador INCA-X SIGHT. Lo anterior permitió identificar y cuantificar (peso-%) los elementos presentes en la muestra de cada material.



Figura 3- Probetas de hierro (izquierda) y de bronce (derecha) empleadas en el estudio de pérdida de peso por efecto de la corrosión, así como en el análisis de composición química elemental.

Diseño, fabricación y colocación de módulos experimentales

Esta fase de la investigación tuvo una duración de 15 meses. El diseño experimental desarrollado tuvo que permitir que los materiales experimentales estuvieran expuestos totalmente a las condiciones naturales en el área de estudio. De la misma manera, tenía que permitir la evaluación del proceso de

⁸ Grit= número de agujeros en una malla, medida definida por tablas que da el promedio de tamaño de partículas en μm para cada tamaño grit donde 120 grit= 102 μm en promedio y 50 a 165 μm mínimo y máximo respectivamente en unidades SI.

⁹ Reactivo de Marble.- Agente químico elaborado con base en agua destilada, HCl y CuSO_4 .

colonización y sucesión biológica, al mismo tiempo que la degradación por corrosión de los materiales.

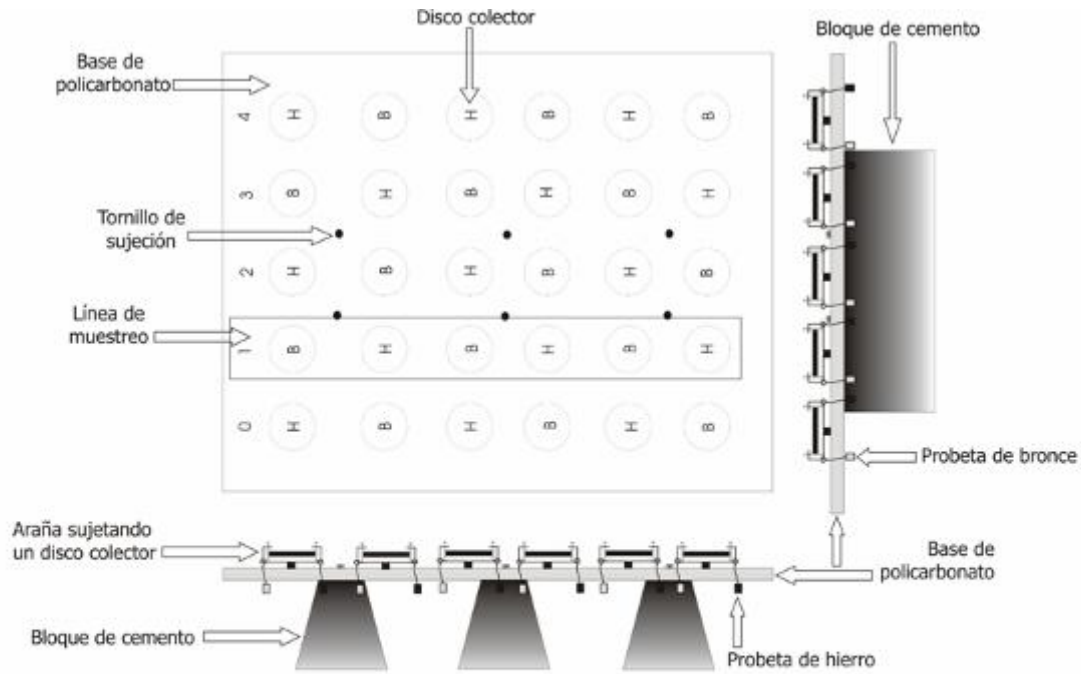


Figura 4.-Esquema del diseño desarrollado para la fabricación de los módulos experimentales. H= Discos colectores de hierro B= Discos colectores de bronce

Para ello, se diseñaron dos módulos que contenían en el momento de su colocación 30 discos colectores cada uno de ellos, 15 de hierro y 15 de bronce (repeticiones). Los discos colectores fueron distribuidos en cada uno de los módulos de manera uniforme e intercalada sin que existiera contacto entre ellos (Fig. 4)

Los discos colectores se sujetaron de manera individual a una base de policarbonato (Lexan) de las siguientes medidas 1.83m de largo, 1.22m de ancho y 4×10^{-3} m de espesor. Por medio de un dispositivo fabricado con varilla de latón, el cual presentaba tres guías corredizas, se sostuvieron de manera horizontal los colectores mediante tres puntos de contacto (Fig. 5).



Figura 5.- Discos colectores empleados en el estudio de la caracterización de la biota sésil y en las pruebas electroquímicas para la evaluación de su deterioro por corrosión. Nótese el sistema de sujeción empleado.

Para reducir el error experimental y evitar el contacto entre el latón del dispositivo y los materiales experimentales, en cada punto de sujeción se interpuso un pedazo de caucho. Por otro lado, cabe señalar que el policarbonato no fue atrayente para los organismos bentónicos sésiles pues se colocó con una envoltura de plástico que se encontraba adherida perfectamente a la superficie del policarbonato. Una vez ensamblados los módulos se anclaron a un metro del fondo marino por medio de tres bloques de cemento de forma trapezoidal (Figs. 4 y 6). Los módulos fueron colocados con una separación de 10m entre ellos.

De esta manera el diseño permitió evaluar la corrosión de los discos colectores, dándose un máximo de tres puntos de contacto en su sujeción y facilitó el análisis de la comunidad biológica sobre la superficie de los colectores.

Cada disco colector de hierro recibió un tratamiento metalúrgico previo que consistió en primer lugar en retirar de su superficie los residuos de la fundición por medio de esmeril. Posteriormente se lijaron hasta darles un acabado de 120 grit. Después, tanto los discos colectores de hierro como los de bronce se lavaron al chorro de agua destilada y se eliminó la grasa con un baño de acetona por un par de minutos. Con ello, la superficie de las placas de hierro y las de bronce se homogenizaron en cuanto a la textura de su superficie.



Figura 6.- Bloque de cemento empleado para anclar al fondo marino los módulos experimentales.

Recolección de discos colectores de hierro y de bronce

Para poder describir y comparar los cambios estacionales y en su caso sucesionales en la estructura de la comunidad macrobentónica que colonizó los discos colectores de hierro y de bronce durante el ciclo anual, se realizó un muestreo cada cinco meses, completando tres muestreos en un periodo de 15 meses. El ciclo comenzó en invierno cuando fueron colocados los módulos el día 18 de diciembre de 2007 y terminó el día 25 de febrero de 2009 cuando se

realizó la tercer recolecta de muestras. En el diseño de muestreo se consideró la recolección de seis discos colectores en cada evento de muestreo, tres de hierro y tres de bronce (repeticiones) por módulo. No obstante, durante el segundo muestreo, debido a las actividades pesqueras en la zona se perdieron tres placas de hierro, dos del módulo I y una del módulo II. En el tercer muestreo, sólo se perdió una placa de bronce del módulo II. Para la recolección de los discos en cada muestreo se establecieron cinco líneas conformadas por seis discos colectores cada una de ellas (tres de cada material). Éstas fueron numeradas del cero al cuatro (Fig. 4). La línea de muestreo en cada ocasión se eligió por medio de la generación de números aleatorios.

Como herramienta para la recolección de las muestras en cada evento se utilizó equipo de buceo SCUBA. En el sitio, los discos colectores fueron retirados de los módulos experimentales y colocados por separado en recipientes herméticos con agua de mar del mismo sitio. Adicionalmente, se recolectaron 0.01m³ de agua de mar del mismo sitio para la realización de las pruebas de corrosión (que se describen en la siguiente sección).

Elaboración de probetas para la evaluación de la corrosión mediante la técnica gravimétrica de pérdida de peso

Esta técnica se basa en la evaluación de la pérdida de peso de los materiales experimentales por efecto del proceso de corrosión durante su periodo de inmersión en el mar. Para ello, se fabricaron probetas del mismo tipo empleado en los análisis de SEM y EDS, solo que en este caso las probetas fueron suspendidas de manera alternada en cada uno de los módulos experimentales mediante un monofilamento. De modo que se colocaron 10 probetas de hierro y 10 de bronce (Fig. 7).

Al igual que los discos colectores, a las probetas se les dio un acabado de 120 grit. Posteriormente se lavaron al chorro de agua destilada y se eliminó la grasa con un baño en acetona por un par de minutos. Para determinar el peso seco inicial de las probetas, se utilizó una balanza analítica marca OHAUS con precisión de 0.1 mg. Posteriormente éstas se guardaron en bolsas dentro de un desecador hasta su inmersión en el lugar de experimentación. Para su identificación las probetas fueron marcadas por medio de percusiones asociadas con un número ordinario. La numeración comenzó con el 1 y se continuó hasta el 20, donde las primeras 10 probetas de cada material marcadas del 1 al 10 se colocaron en el módulo I y las marcadas del 11 al 20 en el módulo II. Estas marcas sirvieron para poder identificarlas después durante cada muestreo que correspondió en tiempo con el de los discos colectores a lo largo del ciclo anual. Cabe señalar, que esta serie de probetas fue colocada el 4 de mayo de 2008 durante el primer muestreo de los discos colectores, poco más de cuatro meses después de la colocación de los módulos experimentales.



Figura 7.- Fabricación y colocación de probetas en los módulos experimentales para evaluación de la corrosión mediante la técnica gravimétrica.

El diseño de muestreo consideró la recolecta de seis probetas de cada uno de los dispositivos (tres de hierro y tres de bronce), sin embargo, la pérdida de probetas, obligo a que en el último muestreo sólo se recolectaran dos probetas de bronce del módulo I y una de hierro del mismo módulo. Una vez recolectadas las probetas, éstas fueron transportadas en agua de mar del mismo sitio hacia el laboratorio.

PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO

Fijación y preservación de los organismos bentónicos que colonizaron la superficie de los discos colectores de hierro y de bronce

Los discos colectores de hierro y de bronce retirados de los módulos experimentales durante los muestreos, fueron colocados en recipientes herméticos que contenían una solución de formol diluido al 5% en agua de mar (la de su colecta en el sitio). Lo anterior, se realizó para preservar los organismos de la biota móvil y sésil que se encontraban habitando o adheridos a la superficie de estos materiales en el momento de su colecta¹⁰. Para la identificación posterior de las muestras, les fue colocada una etiqueta con los datos correspondientes. Los recipientes herméticos fueron mantenidos en bolsas oscuras para evitar la pérdida de coloración de los organismos.

Debido a que la solución de formol fue preparada con agua de mar, los materiales siguieron siendo afectados por el proceso de corrosión. Por ello, después de dos semanas como máximo en el fijador original (solución de formol 5%), los discos colectores fueron lavados con agua destilada y colocados en alcohol etílico desnaturalizado para su preservación final. De manera paralela, la solución de formol diluida al 5% con el remanente del lavado de las muestras, fue tamizada a través de redes empleadas para plancton con luz de malla de 470µm, 200µm y 45µm, con el objetivo de obtener los organismos de la biota móvil que forma la comunidad bentónica y que llegan a establecer madrigueras o tubos sobre las placas. Asimismo, el material tamizado fue lavado y separado en frascos para su posterior análisis, pues en el presente trabajo no se incluye el estudio de estos organismos.

¹⁰ Previo a este proceso, los discos colectores fueron sometidos a las pruebas de corrosión correspondientes que se explican en la siguiente sección.

Identificación taxonómica de la biota sésil colonizadora del hierro y el bronce

La identificación taxonómica de los organismos macrobentónicos de forma de vida sésil que colonizaron la superficie de los materiales experimentales de hierro y de bronce se realizó con base en los siguientes autores: Humann y Deloach (2002); Morris (1975); Mille y Pérez (1993); León et al., (2007); Gómez (2002); Celis, et al., (2007); Ortega et al.,(1993); Rupert y Barnes, (2007); Nielsen, (2009) y Brusca y Brusca, (2005). Ésta se trató de realizar hasta el menor nivel taxonómico posible, dependiendo de las dificultades en la identificación de cada grupo u organismo. Por lo anterior, en ocasiones se estableció a un nivel taxonómico mayor como Clase o Phylum y una clave para denominar a la especie. También se contó con el apoyo de especialistas en determinados grupos como las macroalgas bentónicas que fueron identificadas por las biólogas Catalina Mendoza González y Luz Elena Mateo Cid en el laboratorio de Ficología de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del IPN. De la misma manera los cirripedios fueron identificados por el Dr. Antonio Celis, especialista en este grupo. Adicionalmente, para las identificaciones se realizó una revisión de las fotografías obtenidas durante el proceso de elaboración de los mosaicos fotográficos que se explica a continuación.

Análisis de la cobertura biológica sobre la superficie de los discos colectores de hierro y de bronce

Para poder evaluar la colonización biológica y su cobertura en las caras superior e inferior de los discos colectores a través de imágenes fotográficas, se realizó el siguiente proceso. En el laboratorio cada disco colector fue fotografiado por ambas caras, por medio de un microscopio estereoscópico marca ZEISS que se encuentra conectado a una cámara digital CANNON de 7.2 mega pixeles. La imagen digital capturada en el campo del microscopio fue transferida por medio

del software LIVE VISION a una computadora de escritorio marca DELL. Para la obtención de las fotografías de microscopio se utilizó un objetivo PLANAPO 0.63x, un ocular 10x a una magnificación de 5x. Previamente el microscopio fue calibrado.

El campo del microscopio con los aumentos especificados representó un área de $15.9 \times 10^{-4} \text{m}^2$, sin embargo, debido al campo ocular de la cámara fotográfica, las fotografías digitales obtenidas representaron un área real de $6.1 \times 10^{-4} \text{m}^2$.

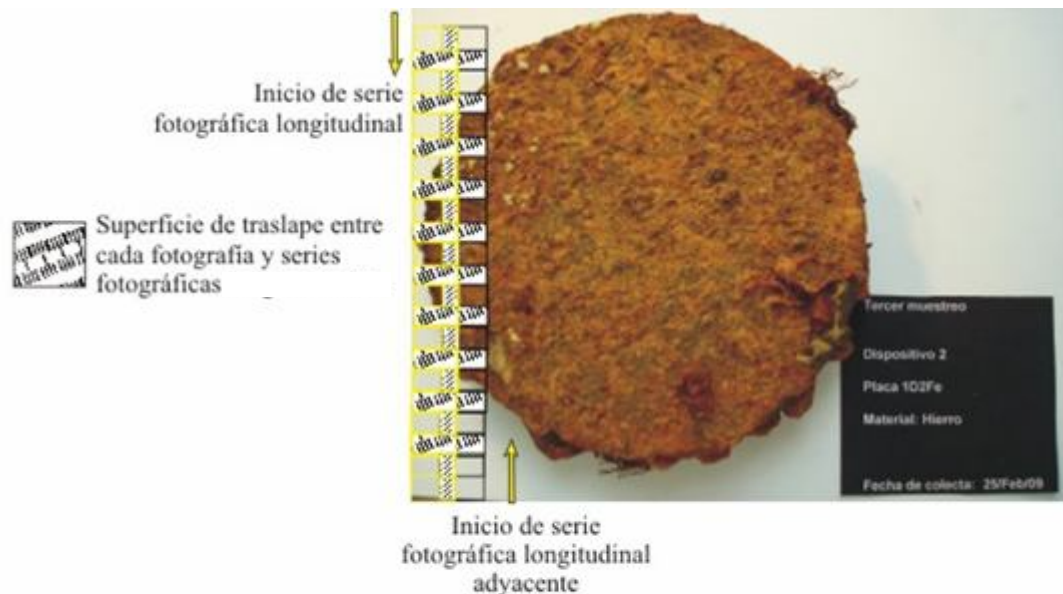


Figura 8.- Proceso fotográfico para el ensamblaje de los mosaicos

La calibración de la escala de las imágenes fotográficas se realizó por medio de un portaobjetos micrométrico al aumento señalado. El registro fotográfico se realizó de manera sistemática en toda la superficie de los discos colectores. Para ello, se tomaron series fotográficas longitudinales a partir de un punto arbitrario en la región superior izquierda del disco colector analizado, hacia la parte inferior izquierda, hasta completar la serie. Inmediatamente se

continuaba con la siguiente serie longitudinal fotográfica adyacente del lado derecho, comenzando ahora de la parte inferior hacia la parte superior del disco colector (Fig. 8). Para disminuir el error en este proceso, el disco colector fue colocado sobre una lámina plastificada de color negro de forma rectangular de 0.29m x 0.20m (que también sirve de fondo a la fotografía) que realizó una función semejante a la de una platina de microscopio, ya que ésta se movía en conjunto con el disco colector¹¹ (Fig. 9). Este sistema (disco colector-lamina plastificada) se hizo coincidir con una retícula de 0.43m x 0.28m, graduada a cada 0.01m y dividida en cuadrantes de $1 \times 10^{-4}m^2$ en la superficie de una plancha Salva-Cortes elaborada también de un material plastificado. De esta manera, se pudieron tomar las fotografías en las series longitudinales con una sobreposición a cada 0.01m, lo que representó un 66% de sobreposición entre fotografías. Por otra parte, la sobreposición de las fotografías de manera transversal (entre series longitudinales) se realizó a cada 0.02m, lo que equivale al 33% de sobreposición¹². La sobreposición determinada en este caso, así como el sentido de dirección en la toma de fotografías de las series longitudinales, redujo el error inherente generado por la distorsión que se produce hacia los bordes u orillas de las fotografías y que altera la información que se puede obtener.

¹¹ Una vez colocado el disco colector sobre el plástico, éste no se movía por ningún motivo hasta haber terminado todas las series fotográficas longitudinales.

¹² Las "Normas Técnicas" para levantamientos aerofotográficos propuestas por INEGI, señalan que la sobreposición longitudinal promedio entre fotografías sucesivas deberá realizarse con una sobreposición $\geq 55\%$ en caso de fotografías para modelos estereoscópicos, mientras que la sobreposición lateral entre fotografías adyacentes deberá estar comprendida dentro de $30\% \pm 10$ (20-40%).



Figura 9.- Sistema de montaje de los discos colectores en el microscopio para la obtención de los fotomosaicos.

Una vez que se obtenían todas las series fotográficas de la superficie del disco colector, cada fotografía se iba uniendo hasta ensamblar el mosaico fotográfico de dicha superficie. Este trabajo se realizó mediante el mismo software Live Vision, que reconoce los bordes de los objetos (en este caso organismos sésiles) que aparecen en las fotografías que se desean unir. Mediante este proceso se obtuvieron los mosaicos fotográficos de las caras superior e inferior de cada disco colector al aumento mencionado. Para cubrir ambas superficies de un disco colector se tomaron en promedio 240 fotografías (~120 por cada superficie en 8 series longitudinales). Cabe señalar, que los mosaicos fotográficos ensamblados mediante esta técnica presentan una distorsión del 5%, la cual fue evaluada respecto del área real de los discos colectores.

Para facilitar el análisis de la cobertura biológica de los organismos de forma de vida sésil, se realizaron pruebas fotográficas de iluminación con filtros polarizantes amarillos, rojos, verdes y azules, con la finalidad de maximizar ciertas estructuras biológicas como son esqueletos calcáreos. El filtro polarizante azul dio los mejores resultados.

El proceso de análisis de la cobertura biológica de cada disco colector, se realizó mediante el software IMAGE J, que permite procesar imágenes e identificar patrones por medio del reconocimiento de niveles de intensidad de pixeles y la detección automática o manual de los bordes de los objetos que aparecen en la imagen (Bakus, 2007). El procedimiento de fotogrametría para evaluar la cobertura biológica (cm^2) en los mosaicos fotográficos fue el siguiente:

a) Los mosaicos fotográficos de las caras superior e inferior de cada disco colector fueron escalados mediante una equivalencia entre una medida conocida en la imagen fotográfica (escala de microscopio) y el número de pixeles a los que corresponde esta medida.

b) Posteriormente se estableció en cada mosaico fotográfico una retícula digital escalada con cuadros de $1 \times 10^{-4} \text{m}^2$, que permitió el control sistemático del área a analizar¹³.

c) El área analizada de cada disco colector, fue aquella que se ubicó dentro de los cuadros que conformaron la retícula. De éste análisis, se excluyeron aquellos cuadros que quedaron comprendidos entre el borde del disco colector (representado en el mosaico fotográfico) y hasta un centímetro a partir de éste hacia el interior.

¹³ Entre las herramientas analíticas que posee este software se encuentra el poder elaborar retículas interactivas con las fotografías.

d) Se detectaron manualmente los bordes de los organismos que quedaron dentro de los cuadros a analizar. La detección se realizó por medio de una poli-línea que siguió el borde de los organismos, proceso mediante el cual se establecieron poligonales.

e) Una vez delimitada la poligonal se procedió al cálculo del área por medio de este programa que permite calcular áreas de forma irregular.

f) Las áreas calculadas fueron el equivalente de la cobertura (cm^2) de los organismos sobre la superficie de los discos colectores.

De esta manera se realizó el análisis total de la superficie de los discos colectores y se determinó la cobertura en cada uno de los cuadros que conforman la retícula y que en la imagen fotográfica quedaron encima de la superficie del disco colector. La nomenclatura para la designación de cada cuadro fue representada por los números ordinarios y la numeración se comenzaba en la esquina superior izquierda de la retícula.

Evaluación del proceso de corrosión de los discos colectores de hierro y de bronce mediante la técnica de polarización potenciodinámica

Los discos colectores elegidos y recolectados mediante el procedimiento ya explicado en cada muestreo, fueron trasladados al laboratorio inmediatamente después de su recolecta en el sitio ARQBIO-1. En el laboratorio se seleccionaron de manera arbitraria dos colectores de cada material (2 de hierro y 2 de bronce) y se sometieron a una prueba electroquímica de corriente directa llamada de polarización potenciodinámica. En esta técnica se analizaron las reacciones de oxidación y reducción que se llevan a cabo en la superficie de un metal determinado ante la presencia de un electrolito específico (Arano, 2008).



Figura 10.- Potenciostato (Izquierda) y celda electroquímica (derecha) empleados en las pruebas de polarización potenciodinámica para el estudio del comportamiento electroquímico del hierro y el bronce, así como para la determinación de las velocidades de corrosión de estos materiales.

Las pruebas de polarización potenciodinámica se realizaron mediante un potenciostato marca ACM INSTRUMENTS¹⁴ integrado a un sistema de cómputo. Este equipo trabaja con base en una celda electroquímica convencional para la medición del potencial de corrosión (mV). Para realizar las mediciones se utilizó un electrodo de trabajo representado por la superficie del metal a estudiar, un electrodo de referencia (de calomel saturado), que permite medir de manera comparativa el potencial de corrosión del sistema metal-electrolito, así como de un electrodo auxiliar. Para realizar las pruebas electroquímicas se empleó agua de mar (electrolito específico) procedente del sitio ARQBIO-1 que se colectó durante cada evento de muestreo (Fig. 10).

El procedimiento para realizar esta prueba en cada uno de los colectores seleccionados fue el siguiente:

¹⁴ Equipo empleado para la realización de ensayos electroquímicos. Trabaja con base en una celda electroquímica convencional y en este caso fue usado para la medición del potencial de corrosión (mV).

a) En los discos colectores seleccionados se limpió un área de 1cm^2 en el borde de ambas caras. En esta área se retiraron de forma mecánica las incrustaciones biológicas y los productos de corrosión mediante el lijado de la superficie con lija de 120 grit. Esto permitió el contacto eléctrico entre el metal y los conectores eléctricos del potencióstato.

b) Las celdas electroquímicas fueron preparadas en un recipiente de plástico. Los discos colectores fueron sumergidos en agua de mar hasta su región media. Posteriormente, los electrodos de calomel saturado y de trabajo (placa de acero inoxidable) que se encontraban conectados al potencióstato eran introducidos. De esta manera la celda electroquímica estaba lista para comenzar la prueba.

c) Una vez iniciada la polarización potenciodinámica, el potencióstato aplicaba un estímulo de potencial al sistema, con lo cual se obtenía una respuesta en corriente. De esta manera el equipo transfería los datos de potencial de corrosión (mV) e intensidad de corriente a un equipo de cómputo mediante un software.

d) Para esta prueba se contó con un “testigo” o “blanco” mediante el cual se evaluó el comportamiento electroquímico del hierro y el bronce en agua de mar procedente del sitio ARQBIO-1, previo a la inmersión de los materiales y a su colonización biológica.

Evaluación del proceso de corrosión de las probetas de hierro y de bronce mediante su pérdida de peso

Para evaluar la pérdida de peso de las probetas colectadas durante los muestreos, éstas fueron limpiadas mecánicamente sin dañar el metal, retirando los restos de organismos incrustantes. Posteriormente, las probetas de hierro fueron sumergidas entre 5 y 10 minutos en una solución de ácido hidroclicórico para ser decapadas (remoción de los productos de corrosión), e inmediatamente se lavaron con agua destilada y fueron secadas y pesadas en una balanza analítica METTLER-TOLEDO con precisión de 0.1mg y un peso máximo de 210gr y mínimo de 10mg. Con ello, se obtuvieron las diferencias de peso durante el periodo de exposición. En el caso de las probetas de bronce, su tratamiento fue el mismo, solamente que éstas se decaparon con una solución al 5% en peso de ácido amidosulfónico por 2 minutos.

A partir de la diferencia de peso obtenida de las probetas de hierro y de bronce a lo largo del tiempo, se obtuvieron las velocidades de corrosión (mm año^{-1}) de estos materiales. Este método gravimétrico se realizó de manera alterna a las pruebas electroquímicas de polarización potenciodinámica.

PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS DATOS

Procesamiento de los datos obtenidos de la comunidad biológica que colonizó los discos colectores de hierro y de bronce

Para la evaluación del proceso de colonización y sucesión biológica se establecieron tres factores en el diseño experimental los cuales produjeron diferencias en las variables aleatorias. Estos son:

Tipo de sustrato (hierro vs bronce)

Superficie (inferior vs superior)

Evaluación del fenómeno en el tiempo (muestreo 1, 2 y 3)

Los factores involucrados en el estudio se agruparon en lo que se designó como tratamientos, conformados por la combinación de estos factores. En este caso los tratamientos se designaron por medio de la siguiente formula:

Tiempo + Tipo de sustrato + Superficie

Las variables aleatorias evaluadas con las que se caracterizó la comunidad biológica que colonizó los materiales experimentales de hierro y de bronce fueron las siguientes:

- Riqueza de especies (discreta)
- Diversidad de especies (continua)
- Equidad (continua)
- Dominancia (continua)
- Dominancia por superficie (continua)

La riqueza de especies se obtuvo por el simple conteo de especies presentes en cada uno de los discos colectores (repeticiones) de ambos materiales recolectados durante los muestreos. El número total de especies distintas en cada repetición de los materiales fue tomado como la riqueza de especies por material. Así mismo, el número total de especies distintas en cada una de las caras de los discos colectores se consideró como la riqueza de especies por superficie de cada material.

La dominancia por superficie de la biota sésil sobre los discos colectores en cada uno de los materiales, fue expresada como el porcentaje (%) de cobertura de los organismos, considerando los Phyla más abundantes en la comunidad. La cobertura de cada forma de crecimiento se analizó a lo largo del ciclo anual y por tipo de material.

Para evitar el efecto de borde de los discos colectores, en la determinación de la cobertura biológica sobre la superficie de los materiales de hierro y de bronce se eliminó 1 cm a partir del borde de éstos¹⁵.

Asimismo, se describió la forma de crecimiento de los organismos como parte de los caracteres o atributos de la comunidad macrobentónica sésil que colonizó la superficie de los materiales experimentales.

La diversidad fue evaluada con el programa BioDiversity Professional Versión 2 por medio del índice de Shannon-Wiener (H) para cada repetición de cada material, así como por superficie (inferior vs superior) a lo largo del tiempo. Para el cálculo del índice de diversidad este programa emplea la siguiente ecuación.

¹⁵ En ecología un borde es donde se encuentran dos comunidades (Huerta y Guerrero, *op. cit.*) y puede señalar un cambio abrupto en las condiciones ambientales como el tipo de sustrato o su topografía.

$$H = - \sum_{i=1}^S (P_i) (\text{Log}_{(10)} P_i)$$

La Equidad (J) y la Dominancia (D) se obtuvieron mediante las siguientes ecuaciones.

$$J = H/H_{\max} \qquad D = 1 - J$$

Posteriormente la diversidad, la equidad y la dominancia fueron comparadas a lo largo del tiempo en cada uno de los muestreos por medio de pruebas de análisis de varianza de una vía. Así mismo, para comparar sus efectos en el tiempo, así como por superficie (superior vs inferior), se realizó un análisis de varianza de dos vías. Estos análisis fueron realizados mediante el programa Statistica Versión 7. Finalmente, la composición y abundancia (dominancia por superficie) de especies de vida sésil fue comparada con respecto del tipo de material (hierro vs bronce) a lo largo del tiempo, así como por superficie, por medio de una prueba multivariada de análisis de redundancia (RDA). Esta prueba se realizó mediante el programa R versión 2.13.0 (2011-04-13) y la librería rdaTest versión 1.7 (2010-10-04) de Pierre Legendre and Sebastien Durand.

Procesamiento de los datos obtenidos del deterioro del hierro y el bronce

Para la evaluación del deterioro de los materiales experimentales por efecto de la corrosión se identificaron cuatro factores en el diseño experimental que produjeron diferencias en la velocidad de corrosión (mm año^{-1}). Esta última representó la variable aleatoria continua a evaluar en esta fase. Los factores son:

- Tipo de sustrato (hierro vs bronce)
- Dominancia por superficie de las formas biológicas de crecimiento
- Forma de crecimiento
- Evaluación del fenómeno en el tiempo (muestreo 1, 2 y 3)

Al igual que en el procesamiento de datos biológicos, para el procesamiento de los datos de corrosión, los factores involucrados en el estudio se agruparon en tratamientos, integrados por la combinación de estos factores. Los tratamientos fueron designados de acuerdo con la siguiente fórmula:

Tiempo + Tipo de sustrato + Cobertura biológica + Forma de crecimiento

A partir de la técnica de extrapolación de Taffel se evaluó el comportamiento electroquímico de los colectores de hierro y de bronce seleccionados y se calcularon las velocidades de corrosión (mm año^{-1}). Para ello se empleó la representación gráfica de los datos de potencial (mV) y de la densidad de corriente (mA cm^2^{-1}), obtenida en las pruebas de polarización potenciodinámica. La curva resultante de la representación gráfica de los datos de potencial (mV) y de densidad de corriente (mA cm^2^{-1}) se conoce como curva de polarización potenciodinámica y presenta dos ramas, una anódica y otra catódica. Se ha establecido que en ambas ramas de la curva, después de los

120mV ésta adopta una tendencia lineal, identificándose a esta región lineal como “Región de Taffel”.

Para determinar la velocidad de corrosión de los discos colectores se estableció la región de Taffel en las curvas de polarización potenciodinámica obtenidas y se extrapolo al potencial de corrosión. Así mismo, el potencial de corrosión fue extrapolado para obtener el valor de densidad de corriente. El valor de densidad de corriente obtenido fue equivalente a la velocidad de corrosión del sistema, en donde la velocidad de la reacción de reducción fue igual a la velocidad de disolución del metal.

Debido a que las pruebas de polarización potenciodinámica de ambos materiales fueron realizadas por duplicado¹⁶ se consideró la media del valor de la velocidad de corrosión (mm año^{-1}), con la salvedad de que el potencial de corrosión en ambas pruebas no presentará discrepancias en un orden de magnitud. De lo contrario, el valor de velocidad de corrosión que se consideró fue aquél de mayor magnitud. Por otra parte, para el cálculo de las velocidades de corrosión de los discos colectores de bronce en estas pruebas, se tomó como referencia el peso atómico y densidad del Zn, debido a éste se corroe preferencialmente respecto del Cu. Para el cálculo de las velocidades de corrosión de los discos colectores de hierro, se tomó como referencia el peso atómico y densidad del Fe.

Las velocidades de corrosión (mm año^{-1}) de las probetas de hierro a partir de los datos de pérdida de peso (gr) se calcularon con respecto a la densidad del Fe, mientras que en el caso del bronce, se calcularon con respecto a la densidad del Zn.

¹⁶ Excepto en los discos colectores de hierro y de bronce que sirvieron como testigos y que fueron evaluados previo a su inmersión en el sitio ARQBIO-1, de los cuales solo fue realizada una sola prueba.

CAPÍTULO 7

TRANSFORMACIÓN Y DEGRADACIÓN DE LOS MATERIALES EXPERIMENTALES DE HIERRO Y DE BRONCE EN LOS FONDOS MARINOS DE CAMPECHE

CARACTERIZACIÓN DE LA BIOTA SÉSIL QUE COLONIZÓ LA SUPERFICIE DE LOS DISCOS COLECTORES DE HIERRO Y DE BRONCE

Riqueza total de especies

La biota sésil que colonizó los discos colectores de hierro y de bronce que estuvieron inmersos en el mar durante los periodos de 5, 10 y 15 meses, se agrupó en 6 Phyla que incluyen plantas y animales¹⁷. El Phylum Plantae se encontró representado por 10 especies de algas, el Bryozoa por 10 especies, Porifera por 3 especies, Cnidaria por una sola especie, Annelida por 15 especies, Mollusca por 12 especies y Arthropoda por 2 especies (Fig. 11). En total la biota sésil que colonizó los materiales experimentales se integró por 53 especies (Tabla 3 y Anexo I).

Los resultados mostraron que la riqueza de especies total que colonizó los discos colectores de hierro y de bronce disminuyó a lo largo de los periodos de inmersión. De las 53 especies identificadas, 29 ocurrieron en los discos colectores de 5 meses de inmersión. A los 10 meses de inmersión, la riqueza de especies que colonizó los colectores disminuyó a 27 especies y a los 15 meses fue de 22 especies en total (Fig. 12).

¹⁷ Se determinó la presencia de algunas especies de foraminíferos colonizadoras de la cara superior de los discos colectores de hierro, no obstante, debido a que estos organismos presentaron una cobertura poco significativa se excluyeron del análisis.

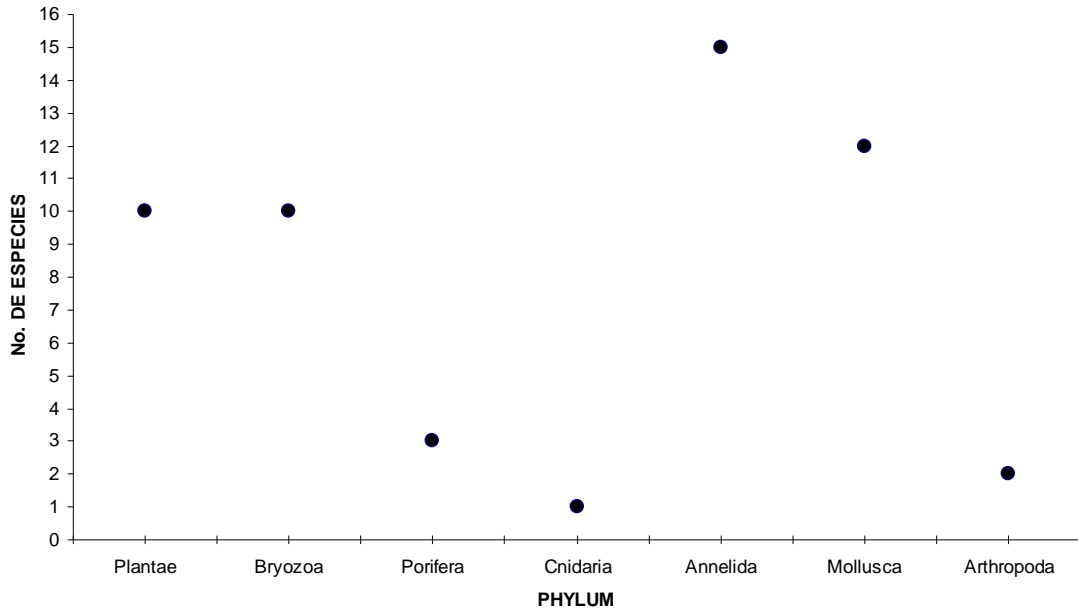


Figura 11.- Riqueza total de especies por Phylum de la biota sésil que colonizó las muestras experimentales de hierro y de bronce durante los periodos de inmersión de 5, 10 y 15 meses.

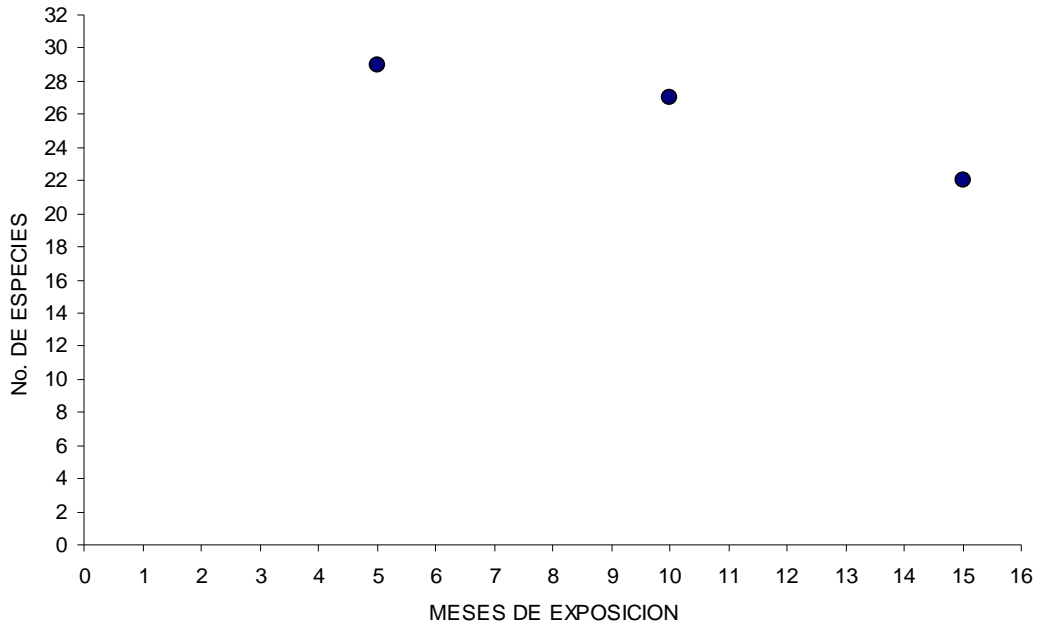


Figura 12.- Riqueza total de especies de la biota sésil desarrollada en los discos colectores de hierro y de bronce durante los periodos de 5, 10 y 15 meses de inmersión.

Riqueza de especies desarrollada en el hierro

La riqueza de especies total determinada en los colectores de hierro a lo largo de todos los periodos de inmersión fue de 46 especies. De las cuales, 21 colonizaron los colectores a los 5 meses de inmersión. De estas 21 especies, 14 de ellas estuvieron ausentes en los colectores a los 10 meses de inmersión. No obstante, se incorporaron 18 especies, con lo cual la riqueza de especies en los colectores inmersos por 10 meses fue de 25 especies en total. Finalmente, 11 especies de las 25 identificadas en los colectores de 10 meses de inmersión, ya no colonizaron los colectores inmersos por 15 meses, pero se incorporaron 7 especies nuevas y una más que volvió a ser registrada, con lo cual la riqueza total para este periodo fue de 22 especies. Lo anterior denota que hubo diferencias entre los taxa que ocurrieron a lo largo de los periodos de inmersión. Por ejemplo, las algas identificadas como sp1, sp2, sp3 y sp4, no colonizaron los colectores de hierro después de 5 meses. De igual manera ocurrió con 2 especies de anélidos, uno perteneciente a la familia Sabellidae (sp2) y el otro a la familia Serpulidae (sp2), así como con 5 especies de moluscos pertenecientes a las familias Ostreidae, Chamidae y Veneridae.

De manera específica, la riqueza de especies que colonizó la cara superior e inferior de los colectores de hierro a los 5 meses de inmersión fue de 19 especies contra 13 especies respectivamente. En este caso, la cara inferior de los colectores fue colonizada por un menor número de especies (Fig. 13). Destaca que entre las caras de los colectores de este periodo se apreciaron diferencias en la composición de especies. Por ejemplo, de las 21 especies identificadas en este periodo para el hierro, 2 estuvieron ausentes en la cara superior y 8 en la cara inferior. Las especies ausentes en la cara superior fueron distintas de las especies ausentes en la cara inferior.

Por otra parte, la riqueza de especies determinada en la cara superior e inferior de los colectores que estuvieron sumergidos por 10 meses, fue de 18

especies en cada una de ellas. Es decir, no existió diferencia en cuanto al número de especies que colonizó la cara superior e inferior de los colectores de hierro en este periodo (Fig. 13). No obstante, aunque la riqueza de especies fue la misma, existieron diferencias en la composición de especies que colonizaron ambas caras de los colectores. De las 25 especies determinadas en total para el hierro a los 10 meses, 7 de ellas no ocurrieron en la cara superior. De la misma manera 7 especies de las 25 totales estuvieron ausentes en la cara inferior. Las especies ausentes en la cara superior en este periodo también fueron distintas de las especies ausentes en la cara inferior.

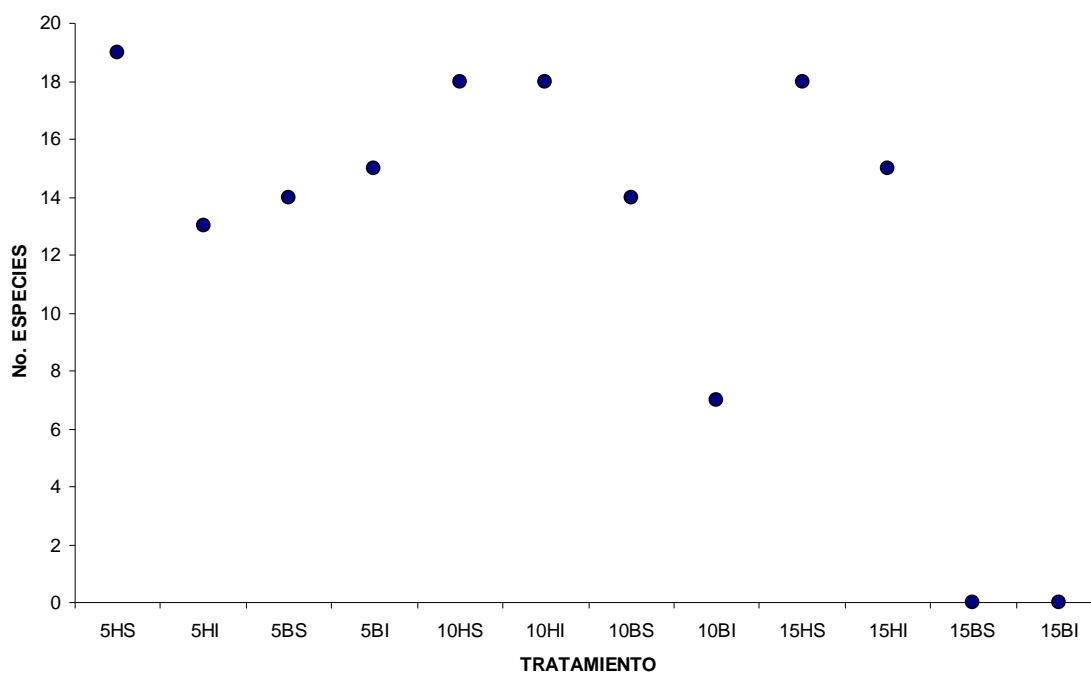


Figura 13.- Riqueza de especies por tratamiento (5, 10 y 15 = meses de inmersión; H= hierro; B= bronce; S= cara superior; I= cara inferior).

En cuanto a la riqueza de especies determinada en las caras superior e inferior de los colectores que estuvieron sumergidos por 15 meses, se observó que ésta fue de 18 y 15 especies respectivamente. Nuevamente, la riqueza fue menor en la cara inferior de los colectores (Fig. 13). En este periodo también hubo diferencias en la composición de especies entre las caras de los

colectores. Por ejemplo, de las 22 especies identificadas en total para este periodo, 4 estuvieron ausentes en la cara superior y 7 en la cara inferior de los colectores. De la misma manera que en los colectores que estuvieron sumergidos en los otros periodos, las especies ausentes en la cara superior de los colectores de 15 meses de inmersión fueron distintas de las especies ausentes en la cara inferior de los mismos.

Todo lo anterior sugiere que existió una colonización específica y preferencia de ciertos taxa hacia el hierro y hacia cada una de las caras.

Tabla 3. Elenco taxonómico

Número	Grupo	División/Clase	Orden	Familia	Género y/o especie	Nombre común				
1	Plantae				sp1	Alga				
2					sp2	Alga				
3					sp3	Alga				
4					sp4	Alga				
5					sp5	Alga				
6					sp6	Alga				
7	Chlorophyta		Bryopsidales	Udoteaceae	<i>Rhypocephalus</i> sp	Alga verde				
8			Cladophorales	Cladophoraceae	<i>Cladophora liniformis</i>	Alga verde				
9					<i>C. laetevirens</i>	Alga verde				
10				<i>C. albida</i>	Alga verde					
11	Porifera	Demospongiae	Halichondrida	Dictyonellidae	sp1	Esponja				
12			Hadromerida	Clionidae	<i>Anthosigmella varians</i>	Esponja				
13				sp2	Esponja					
14	Bryozoa	Gymnolaemata	Cheilostomata	Schizoporellidae	<i>Schizoporella</i> sp	Briozoario				
15						<i>S. floridana</i>	Briozoario			
16						<i>S. pungens</i>	Briozoario			
17							Smittinidae	<i>Parasmittina betamorphaes</i>	Briozoario	
18							Steginoporellidae	<i>Labioporella sinuosa</i>	Briozoario	
19							Buquidae	<i>Buqula neritina</i>	Briozoario	
20							Savignyellidae	<i>Savignyella lafontii</i>	Briozoario	
21								Aeteidae	<i>Aetea sica</i>	Briozoario
22							Ctenostomata		sp1	Briozoario
23									sp2	Briozoario
24	Cnidaria	Hydrozoa	Calyptoblastida	Campanulariidae	<i>Campanularia anquilata</i>	Hidrozoario				
25	Annelida	Polychaeta	Terebellida	Ampharetidae	<i>Melinna maculata</i>	Poliqueto				
26				Sabellida	Sabellidae	<i>Eudistylia</i> sp	Poliqueto			
27						sp1	Poliqueto			
28						sp2	Poliqueto			
29						sp3	Poliqueto			
30						sp4	Poliqueto			
31						sp5	Poliqueto			
32						sp6	Poliqueto			
33						sp7	Poliqueto			
34						Serpulidae	<i>Spirorbis</i> sp	Poliqueto		
35							sp1	Poliqueto		
36							sp2	Poliqueto		
37							sp3	Poliqueto		
38					sp4	Poliqueto				
39					sp5	Poliqueto				
40	Mollusca	Pelecypoda	Pterioida	Ostreidae	<i>Ostrea permollis</i>	Ostra				
41								<i>Crassostrea virginica</i>	Ostra	
42								sp1	Ostra	
43								sp2	Ostra	
44							Veneroida	Lucinidae	<i>Codakia costata</i>	Lucina
45								Veneridae	<i>Chione cancellata</i>	Almeja
46									<i>Periglypta listeri</i>	Almeja
47									spp	Almeja
48							Mytiloida	Pinnidae	<i>Atrina rigida</i>	Almeja
49								Mytilidae	<i>Mytilus edulis</i>	Mejillón
50			Pterioida	Pteriidae	<i>Pteria colymbus</i>	Ostra				
51				Chamidae	spp	Ostra				
52	Arthropoda	Crustacea	Sessilia	Balanidae	<i>Amphibalanus amphitrite</i>	Cirripedio				
53				Amphipoda	Ischyroceridae	spp	Anfipodo tubícola			

Riqueza de especies desarrollada en el bronce

La riqueza de especies total determinada en los colectores de bronce durante todos los periodos de muestreo fue de 27 especies¹⁸. En los discos colectores de bronce de 5 meses de inmersión ocurrieron 19 de las 27 especies. De estas 19 especies, 10 estuvieron ausentes en el colector de 10 meses de inmersión que fue colonizado, aunque para este periodo se incorporaron 8 nuevas especies, por lo cual la riqueza en este periodo fue de 17 especies. De manera homologa a lo observado en el hierro, las especies de algas sp2, sp5, sp6 y una especie perteneciente al género *Rhipocephalus*, así como 3 especies de anélidos de las familias Sabellidae y Serpulidae, 2 especies de briozoarios (Ctenostomata y Cheilostomata) y una especie de bivalvo de la familia Veneridae; estuvieron ausentes en los discos colectores de 10 meses de inmersión. Esto sugiere que hubo diferencias entre los taxa que colonizaron los colectores de los periodos de 5 y 10 meses. Sin embargo, cabe señalar que sólo 2 de los 6 discos experimentales de bronce que estuvieron inmersos por 5 meses, así como 1 de los 6 discos que estuvieron inmersos por 10 meses, fueron colonizados por macroorganismos de la biota sésil. Ninguno de los seis colectores de bronce sumergidos por 15 meses fue colonizado.

De manera específica la riqueza de especies desarrollada en la cara superior e inferior de los colectores de bronce que estuvieron sumergidos por 5 meses fue de 14 y 15 especies respectivamente (Fig. 13). No obstante, aunque la riqueza de especies entre las caras fue similar, se observaron diferencias en su composición. Esto es, de las 19 especies que conformaron la riqueza en los colectores de bronce de este periodo de inmersión, 5 estuvieron ausentes en la cara superior y 4 en la cara inferior. Destaca que las especies ausentes en la cara superior fueron distintas de las especies ausentes en la cara inferior.

¹⁸ Menor respecto al hierro en el cual la riqueza fue de 46 especies.

Respecto del colector de bronce colonizado y que permaneció sumergido por 10 meses, se determinó que la riqueza de especies en su cara superior e inferior fue de 14 y 7 especies respectivamente. En este periodo la riqueza de especies fue mayor en la cara superior (Fig. 13). Así mismo, se observaron diferencias en la composición de especies entre la cara superior e inferior en este periodo. Por ejemplo, de las 17 especies que ocurrieron sobre el colector de bronce en este periodo, 3 de ellas estuvieron ausentes en la cara superior y 10 en la cara inferior, sobresaliendo que las 3 especies ausentes en la cara superior son distintas de las 10 especies ausentes en la cara inferior.

Todo lo anterior indica que existió una colonización específica de ciertos taxa y una preferencia por alguna de las caras de los colectores de bronce.

Finalmente, al realizar una comparación entre la riqueza de especies entre ambos materiales, se observó que determinadas especies que colonizaron los colectores de bronce en los diferentes periodos de inmersión estuvieron ausentes en los colectores de hierro en los mismos periodos, y viceversa. Por ejemplo, de la riqueza de especies total identificada en los colectores de hierro y de bronce de 5 meses de inmersión, la cual estuvo constituida por 29 especies, se encontró que 10 especies de las 29 estuvieron ausentes en el bronce y 8 especies de las mismas 29 estuvieron ausentes en el hierro. Resulta notorio que las especies ausentes en el hierro son distintas de las especies ausentes en el bronce. El mismo patrón se observó en los colectores de 10 meses de inmersión. Lo anterior, indica que existieron diferencias entre los taxa que ocurrieron entre el hierro y el bronce en los diferentes periodos de inmersión. Así mismo, denota que existió una colonización específica de ciertos taxa y preferencias hacia cada material.

Formas de crecimiento de la comunidad que se asentó en los colectores de hierro y de bronce

Las especies colonizadoras del hierro y el bronce presentaron diversas formas de crecimiento. Por lo anterior, se clasificaron en las siguientes categorías que se mencionan a continuación, las cuales se basan en la clasificación propuesta por Herrera, *op. cit.*, que considera principalmente atributos morfológicos y por consiguiente en algunos casos taxonómicos.

a) Organismos de desarrollo erecto.- Los organismos que se incluyeron en esta categoría son todos aquellos que tienen un área basal estrecha y que presentan crecimientos filamentosos, ramificados o foliáceos. Así mismo, se incluyen formas coloniales formadas por zooides. En este grupo se ubicaron todas las especies de algas determinadas en el presente trabajo, el hidrozooario *Campanularia angulata*, así como las especies de briozoarios ctenostomados *Bugula neritina*, *Savignyella lafontii* y *Aetea sica* (Anexo I).

b) Organismos de crecimiento costroso o incrustante.- En este grupo se incluyeron aquellos organismos que presentan un desarrollo laminar y que se adhieren directamente al sustrato. El grupo se integra por las 3 especies de esponjas identificadas en este estudio y cinco especies de briozoarios queilostomados (Anexo I).

c) Organismos de crecimiento estolonial.- Este grupo se conformó únicamente por dos especies de briozoarios ctenostomados que no pudieron ser identificados, pero que presentan un desarrollo colonial en el que los zooides de estos organismos se unen por medio de estolones rastreros que le dan a la

colonia un aspecto articulado. Destaca que solo se identificaron en la cara inferior de los discos colectores de bronce que estuvieron inmersos por 5 meses (Anexo I).

d) Organismos tubícolas.- Esta categoría se encuentra constituida casi en su totalidad por poliquetos tubícolas de las familias Sabellidae y Serpulidae que presentan tubos flexibles y calcáreos respectivamente. No obstante, en este grupo también se incluyó una especie de anfípodo tubícola que forma tubos calcáreos horizontales abiertos en ambos extremos y que se encuentran adheridos al sustrato (Anexo I).

e) Bivalvos de posición postrada.- Este grupo quedó constituido en su totalidad por moluscos de la clase Pelecypoda que se adhieren al sustrato por alguna de sus dos valvas. En general todas las especies de moluscos determinadas en el presente trabajo pertenecen a esta clase taxonómica (Anexo I).

f) Organismos de desarrollo cónico.- Esta categoría se integró únicamente por la especie de cirripedio balanomorfo *Amphibalanus amphitrite*, determinada durante este estudio (Anexo I).

Abundancia de la biota sésil colonizadora del hierro

Es importante recapitular en este momento, que durante el estudio se recolectaron 6 discos colectores de hierro de un periodo de exposición de 5 meses de inmersión, 3 colectores de 10 meses de inmersión y 6 discos colectores de un periodo de inmersión de 15 meses, todos ellos colonizados por macroorganismos pertenecientes a la biota sésil.

Tabla 4 Cobertura de la biota sésil que colonizó los discos colectores de hierro y de bronce de 5 meses de inmersión

Material	Colector	Cobertura (%)	
		Superior	Inferior
Hierro	1D1Fe	53.59	59.36
	2D1Fe	35.54	53.54
	3D1Fe	37.62	69.17
	1D2Fe	70.99	56.85
	2D2Fe	70.59	58.76
	3D2Fe	51.77	43.63
	Σ	320.1	341.31
	\bar{x}	53.35	56.885
Bronce	1D1Brass	27.83	56.62
	2D1Brass	24.76	15.45
	Σ	105.9	72.1
	\bar{x}	26.3	36.0

La abundancia (analizada mediante el porcentaje de cobertura) de la biota sésil sobre la superficie de los discos colectores de hierro con un periodo de exposición de 5 meses fue en promedio de 55%, siendo para las caras superior e inferior de 53% y 57% respectivamente. Por otro lado, los discos colectores de hierro que estuvieron inmersos por 10 meses presentaron una cobertura promedio de 91%, mientras que la cobertura de su cara superior fue de 97% y la de la cara inferior de 85%. Así mismo, la cobertura de los discos colectores expuestos durante 15 meses fue en promedio de 97%, presentado una cobertura en la cara superior de 99% y en la cara inferior de 96% (Fig. 14) (Tablas 4, 5 y 6).

Tabla 5 Cobertura de la biota sésil que colonizó los discos colectores de hierro y de bronce de 10 meses de inmersión

Material	Colector	Cobertura (%)	
		Superior	Inferior
Hierro	1D1Fe	98.29	87.87
	1D2Fe	97.16	75.79
	2D2Fe	95.90	92.82
	Σ	291.35	256.48
	\bar{x}	97.12	85.49
Bronce	1D1Brass	20.38	32.89

La cara superior de los discos colectores de hierro de 5 meses de inmersión presentó una dominancia por superficie de moluscos bivalvos de dos especies pertenecientes a la familia Ostreidae (30%) y briozoarios principalmente de formas costrosas como *Labioporella sinuosa* (12%), siendo menos dominantes las esponjas identificadas como sp1 y sp2 (6%) y los artrópodos como *Amphibalanus amphitrite* (4%). No obstante, se determinó que después de 10 meses de inmersión ésta fue dominada por briozoarios (60%) principalmente de crecimiento costroso de las especies *L. sinuosa* y *Schizoporella floridana*, aunque también presentaron una cobertura significativa otros organismos como la esponja *Anthosigmella varians* (16%), el alga *Cladophora liniformis* (12%) y en menor grado los moluscos *Ostrea permollis* y *Crassostrea virginica* (6%). Por otra parte, la cara superior de los discos colectores que estuvieron inmersos por 15 meses, mostró un incremento considerable en la cobertura de los briozoarios de formas costrosas, principalmente de *L. sinuosa* (82%) que dominó esta superficie, mientras que decreció el grado de cobertura de la esponja *A. varians* (5%) y los moluscos *O. permollis* y *C. virginica* (4%), aunque en este periodo de inmersión también fueron relativamente importantes diversas especies de anélidos de la familia Sabellidae (4%) (Fig. 14).

Tabla 6 Cobertura de la biota sésil que colonizó los discos colectores de hierro de 15 meses de inmersión

Material	Colector	Cobertura (%)	
		Superior	Inferior
Hierro	1D1Fe	98.72	94.81
	2D1Fe	98.09	98.65
	3D1Fe	99.76	92.22
	1D2Fe	97.90	97.91
	2D2Fe	99.70	98.41
	3D2Fe	99.33	92.97
	Σ	593.50	574.97
	\bar{x}	98.92	95.83

En cuanto a la cara inferior de los discos colectores de hierro que permanecieron sumergidos por un periodo de exposición de 5 meses, ésta fue dominada por los moluscos bivalvos *O. permollis* y *C. virginica* (51%), así como por briozoarios de formas costrosas y ramificadas como *L. sinuosa* y *Bugula neritina* (5%) respectivamente. Mientras que la cara inferior de los discos colectores de hierro expuestos por 10 meses continuó siendo dominada principalmente por moluscos *O. permollis* y *C. virginica* (50%), aunque en menor grado dominaron también anélidos de la familia Serpulidae (17%), la esponja *A. varians* (10%) y briozoarios de formas costrosas, principalmente de la especie *L. sinuosa* (9%). Así mismo, la cara inferior de los colectores inmersos por 15 meses, mostró que los moluscos bivalvos *O. permollis* y *C. virginica* continuaron dominando e incluso incrementaron su cobertura (73%), aunque la esponja *A. varians* (12%) y los briozoarios de formas costrosas, principalmente *L. sinuosa* (5%), continuaron siendo dominantes en este periodo (Fig. 14).

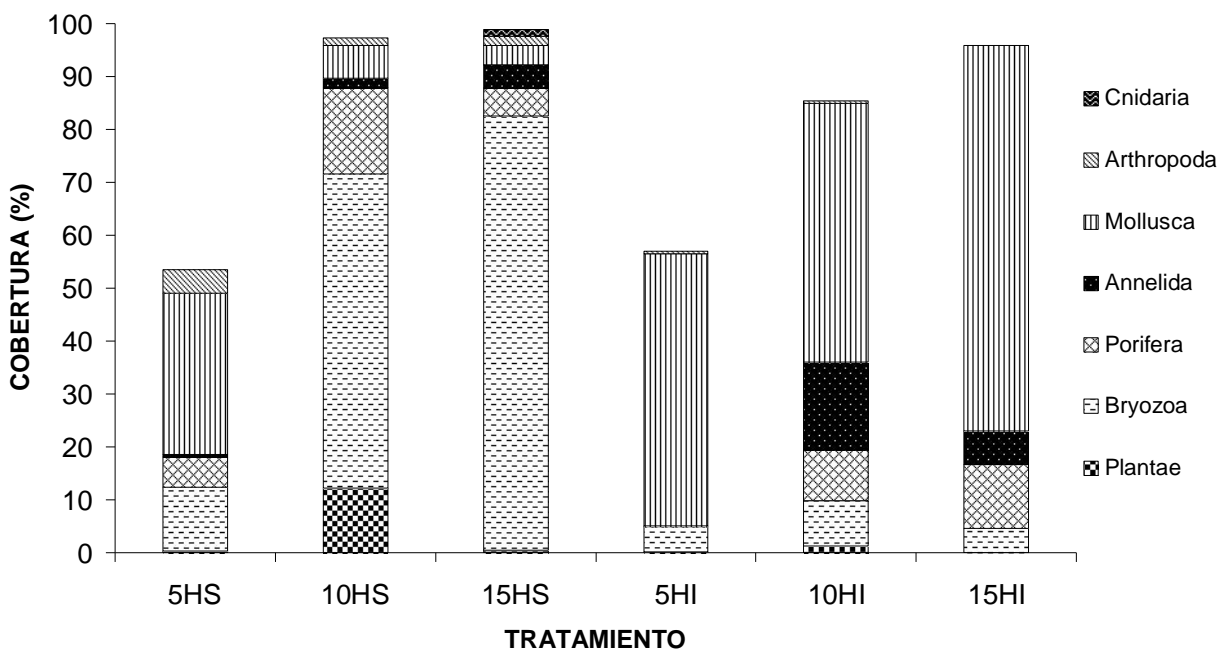


Figura 14.- Cobertura (%) por Phylum de la biota sésil que colonizó los discos colectores de hierro de 5, 10 y 15 meses de inmersión (5, 10 y 15= Meses de inmersión; H= Hierro; S=cara superior I=cara inferior).

Abundancia de la biota sésil colonizadora del bronce

Durante este estudio fue evidente que sólo algunos de los discos colectores de bronce expuestos a las condiciones marinas fueron colonizados por organismos pertenecientes a la biota sésil. Por otra parte, la cobertura biológica de las muestras que fueron colonizadas, resultó ser en promedio de 29%. Destaca que de los seis discos colectores de bronce expuestos durante los primeros 5 meses de inmersión, solamente dos de ellos fueron colonizados y presentaron una cobertura promedio en la cara superior e inferior de 26% y 36% respectivamente, mientras que de los 6 discos colectores de bronce correspondientes a 10 meses de inmersión, solamente uno fue colonizado y presentó una cobertura en su cara superior de 20% y en la inferior de 33% (Tablas 4 y 5). Más aun, de los cinco discos colectores recuperados y que

estuvieron expuestos por un periodo de inmersión de 15 meses, ninguno presentó colonización por macroorganismos de la biota sésil.

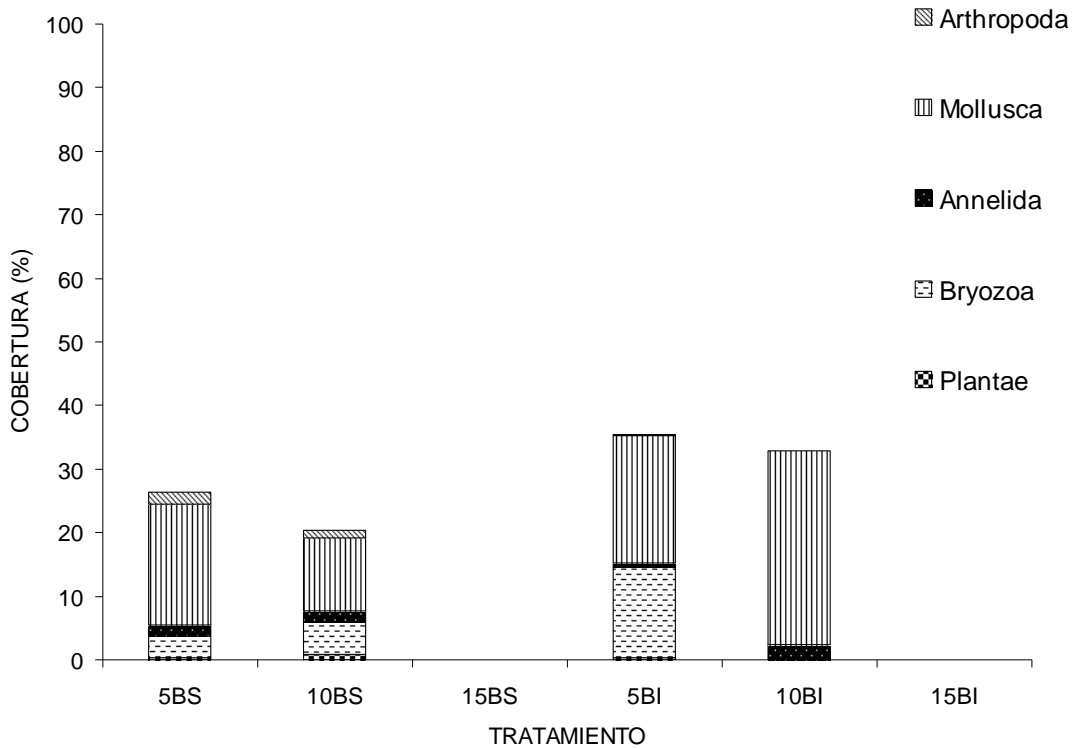


Figura 15.- Cobertura (%) por Phylum de la biota sésil que colonizó los discos colectores de bronce de 5 y 10 meses de inmersión (5, 10 y 15= meses de inmersión; B=bronce; S=cara superior I=cara inferior).

La cara superior de los discos colectores de bronce que fueron colonizados y que permanecieron sumergidos por 5 meses, fue dominada principalmente por moluscos bivalvos de las especies *Ostrea permollis* y *Crassostrea virginica* (19%), y en menor grado por briozoarios de crecimiento costroso y ramificado como *Labioporella sinuosa* y *Bugula neritina* (3%) respectivamente. Mientras que el colector colonizado de las muestras que permanecieron sumergidas por 10 meses continuó presentando una dominancia de moluscos bivalvos (11%), principalmente de la especie *O. permollis* y en

menor grado de briozoarios de formas costrosas y ramificadas (5%), principalmente *L. sinuosa* y *Schizoporella floridana*, así como *B. neritina* y *Aetea sica* respectivamente (Fig. 15).

Por otra parte, la cara inferior de los discos colectores de bronce correspondientes a 5 y 10 meses de inmersión que fueron colonizados, fue dominada por los bivalvos *O. permollis* y *C. virginica* (20% y 30%, respectivamente). No obstante, en el caso de los colectores de 5 meses de inmersión, los briozoarios de formas costrosas como *L. sinuosa* y de formas ramificadas como *B. neritina* presentaron una cobertura relativamente importante (14%) (Fig. 15). Cabe destacar que no se encontraron esponjas que colonizaran los discos colectores de bronce.

Diversidad biológica, equidad y dominancia de la biota sésil colonizadora del hierro

La diversidad evaluada a través del índice de Shannon-Wiener (H), mostró que en la cara superior de los discos colectores de hierro, ésta fue relativamente baja y decreció a lo largo del tiempo, mostrando la mayor diversidad (0.59) en los discos colectores de 5 meses de inmersión, mientras que la menor diversidad (0.38) se presentó en los discos colectores de 15 meses de inmersión (Fig. 16). El análisis de varianza realizado indicó que no existió una diferencia significativa [$F(2,12)=5.6093$, $p=0.05390$] entre la diversidad biológica de la biota sésil que colonizó la cara superior de los discos colectores de hierro que estuvieron expuestos 5, 10 y 15 meses de inmersión. Así mismo, el índice de equidad evaluado mediante la relación entre la diversidad de Shannon-Wiener (H) y la máxima equidad matemática posible, fue relativamente bajo y decreció de la misma manera a lo largo del tiempo (0.59-0.37) (Fig. 16). No obstante, en este caso el análisis de varianza indicó que si existió una diferencia significativa [$F(2,12)=5.5918$, $p=0.01923$] en la equidad de la biota sésil que

colonizó los discos expuestos en al menos uno de los periodos de inmersión. La estimación de la dominancia realizada mediante el inverso de la equidad, muestra una tendencia opuesta en la que ésta se incrementó a lo largo del tiempo (0.40-0.62) (Fig. 16). En este caso, el análisis de varianza indicó que existió una diferencia significativa [$F(2,12)=1.5985$, $p=0.01923$] en la dominancia de la biota sésil que colonizó la cara superior de los discos colectores, en al menos uno de los periodos de exposición.

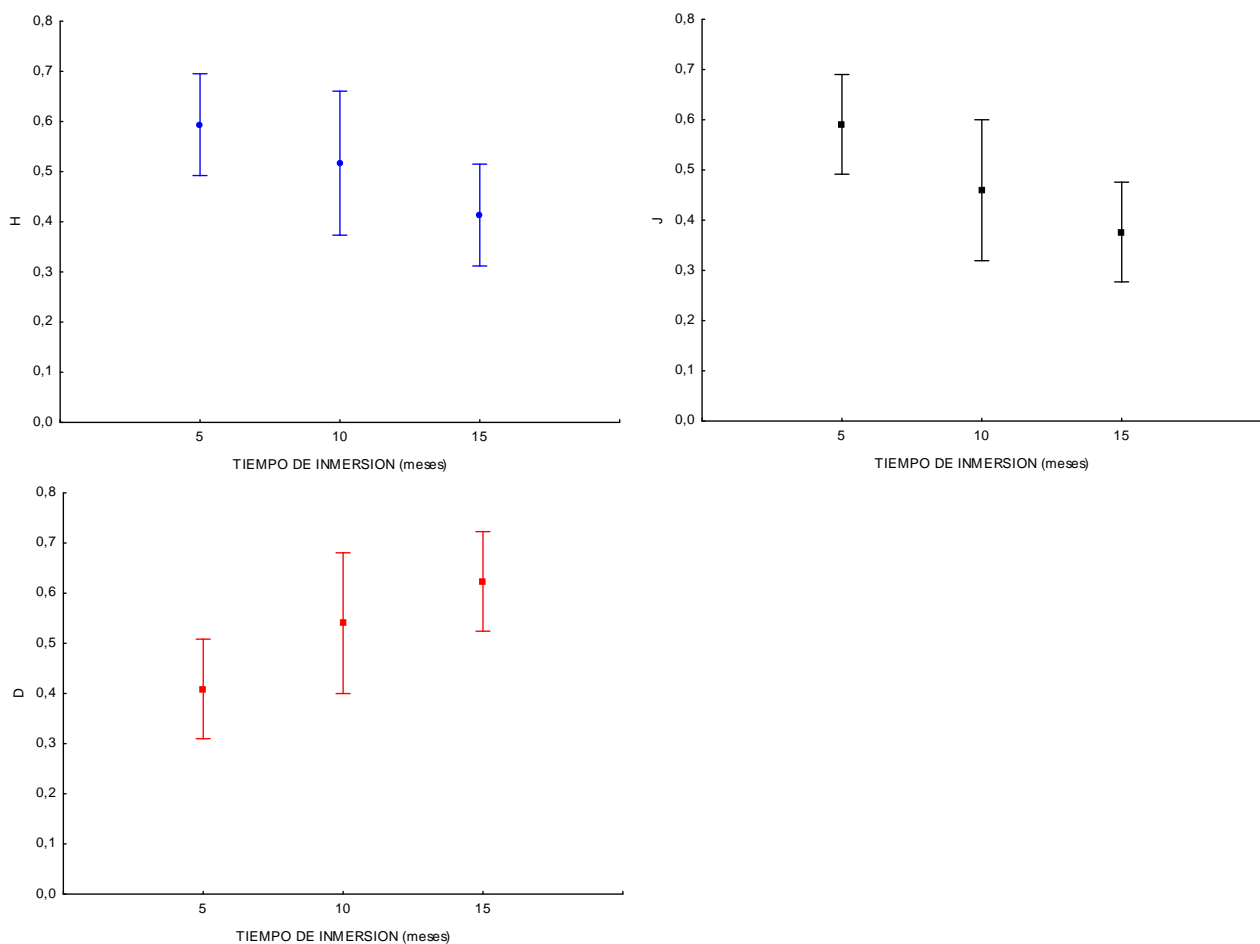


Figura 16.- Diversidad (H), Equidad (J) y Dominancia (D) de la biota sésil que colonizó la cara superior de los discos colectores de hierro durante los periodos de inmersión de 5, 10 y 15 meses (puntos=promedio; barras=intervalo de confianza con $\alpha=0.05$).

De todo lo anterior, se puede inferir que la biota sésil que colonizó las caras superiores de los discos colectores de hierro se conformó por un número

de especies reducido, que de manera general, el número de individuos que integraron a cada una de estas especies fue relativamente poco equitativo y que existe la dominancia de algunas especies. Esto último se explica debido al incremento en la dominancia por superficie de algunas especies de briozoarios de crecimiento costero, las cuales presentaron una cobertura promedio de casi el 70% en la cara superior de los discos colectores que permanecieron sumergidos por 10 meses, y que se incrementó al 80% en los discos colectores que permanecieron inmersos por 15 meses (Fig. 14).

Por otra parte, la diversidad de la biota sésil que colonizó la cara inferior de los discos colectores de hierro se incrementó (0.38-0.59) de los discos colectores que permanecieron inmersos los primeros 5 meses a los discos colectores expuestos por 10 meses, aunque decreció ligeramente en los discos colectores de 15 meses de inmersión (0.53) (Fig. 17). El análisis de varianza realizado en este caso indicó que existió una diferencia significativa [$F(2,12)= 5.6093$, $p= 0.01906$] en la diversidad evaluada en la cara inferior de los discos colectores de hierro, en al menos uno de los periodos de inmersión. La equidad mostró una tendencia similar, ya que fue menor en los discos colectores inmersos por 5 meses (0.47), incrementándose en los discos colectores expuestos por 10 meses (0.61), para después, decrecer ligeramente en los discos colectores inmersos por 15 meses (0.58) (Fig. 17). No obstante, el análisis de varianza indicó que no existieron diferencias significativas en la equidad evaluada en la biota sésil que colonizó las caras inferiores de los discos colectores de hierro en los diferentes periodos de inmersión [$F(2,12)= 1.5985$, $p= 0.24241$]. Por otra parte la dominancia evaluada en la cara inferior de los discos colectores de hierro de 5 meses de inmersión fue mayor (0.52) respecto de la evaluada en los discos colectores inmersos por 10 meses (0.39), aunque mostró un ligero incremento en los discos colectores expuestos por 15 meses (0.41) (Fig. 17). El análisis de varianza indicó que no hubo diferencias significativas [$F(2,12)= 1.5985$, $p= 0.24241$] en la dominancia de la biota sésil que colonizó la cara inferior de los discos colectores inmersos en los diferentes periodos.

Con base en lo anterior, se puede inferir que la biota sésil que colonizó la cara inferior de los discos colectores de hierro también se integró por un número reducido de especies, que el número de individuos que integran las especies fue relativamente poco equitativo y que existió la dominancia de alguna(s) especie(s). Lo anterior se relaciona con la dominancia por superficie de unas cuantas especies a lo largo de todo el tiempo, principalmente de moluscos bivalvos de posición postrada que se asentaron en las caras inferiores de los discos colectores y que mostraron una cobertura abundante durante los 5, 10 y 15 meses de inmersión (Figura 14).

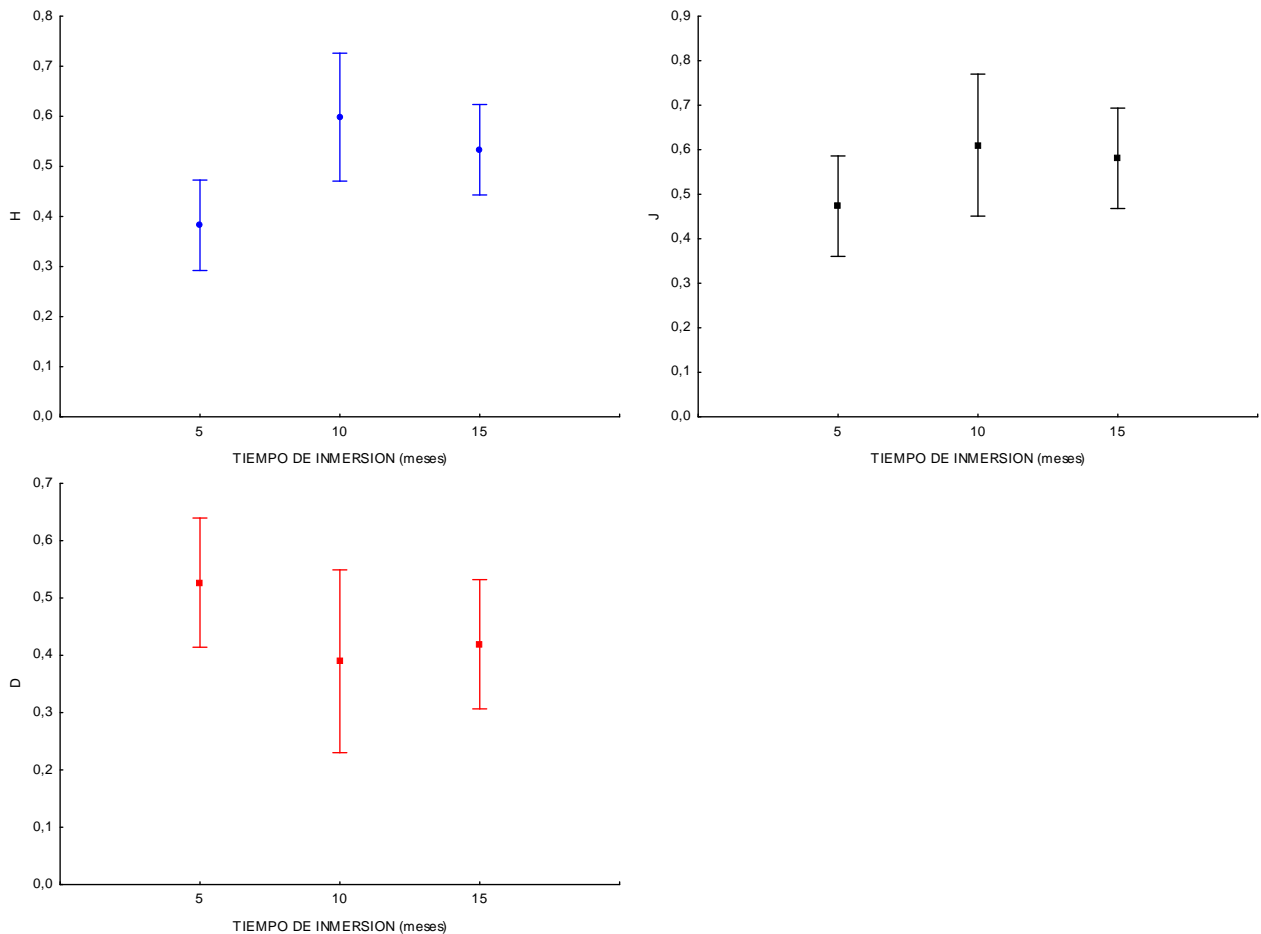


Figura 17.- Diversidad (H), Equidad (J) y Dominancia (D) de la biota sésil que colonizó la cara inferior de los discos colectores de hierro durante los periodos de inmersión de 5, 10 y 15 meses (puntos=promedio; barras=intervalo de confianza con $\alpha=0.05$).

Por último, el análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas en la diversidad, equidad y dominancia de la biota sésil que colonizó la cara superior e inferior de los discos colectores de hierro, en al menos uno de los periodos de inmersión (Fig. 18). En este sentido, si se analizan los taxones, la composición de especies, las formas de vida y la dominancia por superficie de los organismos, es indiscutible que la comunidad que se asentó en la cara superior de los discos colectores de hierro es distinta de la comunidad que se asentó en la cara inferior de los mismos colectores (Figura 14).

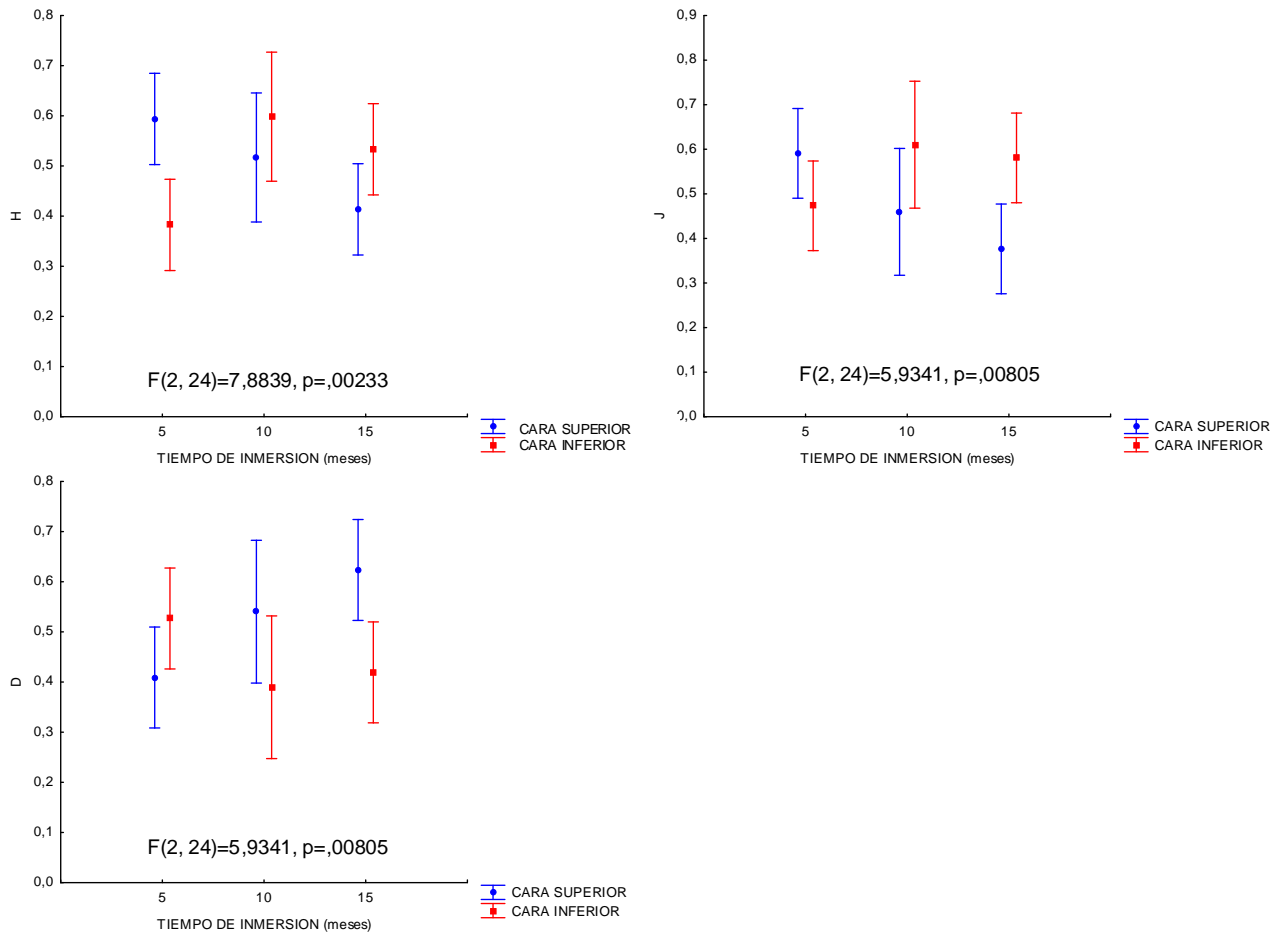


Figura 18.- Comparación de la Diversidad (H), Equidad (J) y Dominancia (D) de la biota sésil que colonizó la cara superior e inferior de los discos colectores de hierro durante 5, 10 y 15 meses de inmersión (puntos=promedio; barras=intervalo de confianza con $\alpha=0.05$).

Diversidad biológica, equidad y dominancia de la biota sésil colonizadora del bronce

Cómo se había mencionado anteriormente, debido a que solo se colonizaron dos discos colectores en los primeros 5 meses de inmersión, un solo disco colector en las muestras de 10 meses de inmersión y ninguno de las muestras recolectadas a los 15 meses, no pudo ser comparada estadísticamente mediante un análisis de varianza la diversidad, equidad y dominancia a lo largo del tiempo ni entre superficies.

No obstante, se apreció un incremento en la diversidad de la biota sésil que colonizó la cara superior de los discos colectores de bronce, de 0.58 a 0.72 en las muestras de 5 y 10 meses de inmersión respectivamente. La equidad mostró una tendencia semejante, en la que se incrementó de 0.34 a 0.63. Aunque, la dominancia mostró una tendencia inversa, en donde esta decreció de 0.66 a 0.37 (Fig. 19). Debido a lo anterior, se puede inferir que la biota sésil que se asentó en la cara superior de los discos colectores de bronce que fueron colonizados en los periodos de inmersión de 5 y 10 meses, se integró de manera general, por un número reducido de especies, que el número de individuos por especie fue relativamente poco equitativo y que existe la dominancia de alguna(s) especie(s). Esto se relaciona con la mayor dominancia por superficie de los bivalvos de posición postrada en los colectores de 5 y 10 meses de inmersión, donde también fueron dominantes por superficie algunas especies de briozoarios de formas costrosas y ramificadas (Fig. 15).

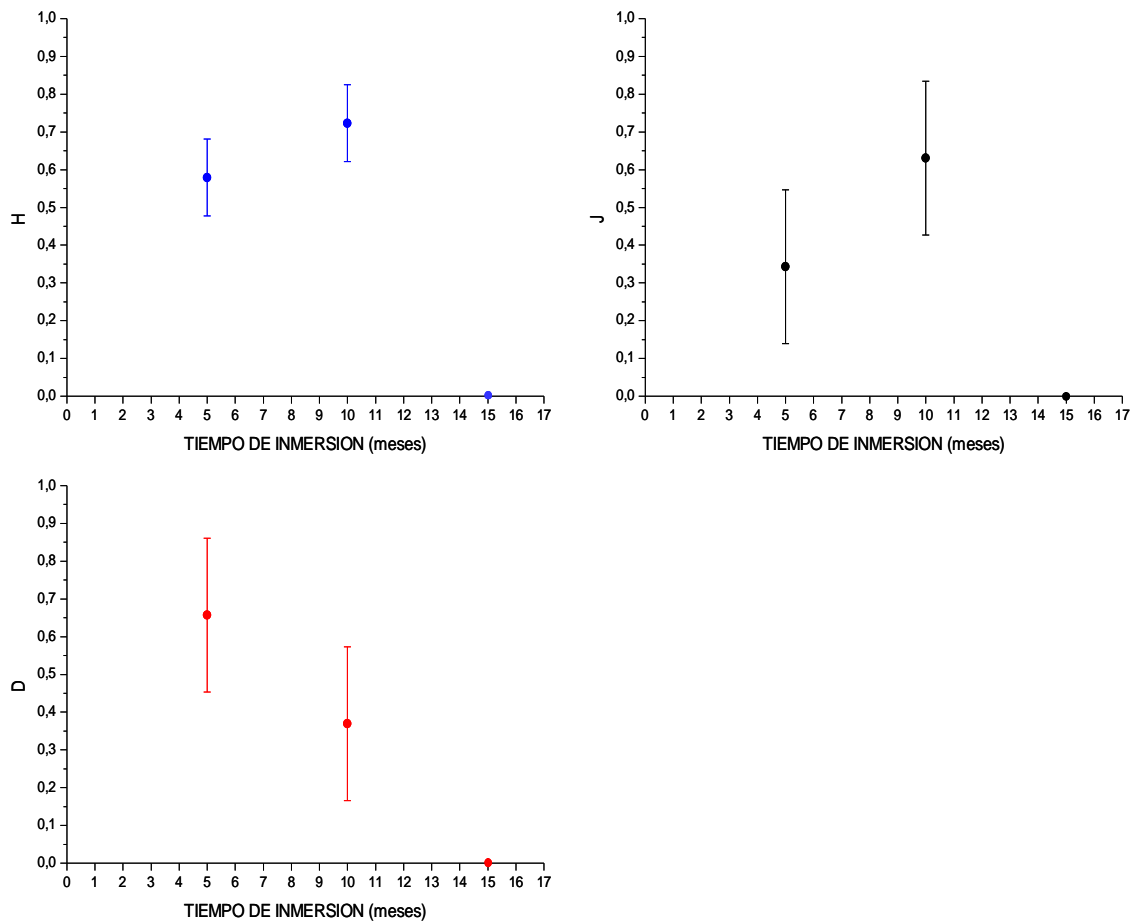


Figura 19.- Diversidad (H), Equidad (J) y Dominancia (D) de la biota sésil que colonizó la cara superior de los discos colectores de bronce durante los periodos de inmersión de 5, 10 y 15 meses (puntos= promedio; barras=desviación estándar).

Por otra parte, en la cara inferior de los discos colectores de bronce la diversidad, equidad y dominancia mostraron una tendencia inversa respecto de lo observado en la cara superior. La diversidad decreció de 0.61 a 0.37 en los discos colectores de 5 y 10 meses de inmersión respectivamente. La equidad también decreció de 0.63 a 0.45, mientras que la dominancia se incrementó de 0.37 a 0.55 (Fig. 20). Resumiendo lo anterior, se puede decir que la biota sésil que colonizó la cara inferior de los discos colectores de bronce también se integró por un número de especies reducido al igual que la comunidad que se asentó en la cara superior. No obstante, el número de individuos por especie fue menos equitativo a lo largo del tiempo, lo que indica la dominancia de algunas

especies. Lo anterior se explica debido a que en la cara inferior de los discos colectores de 5 meses de inmersión que fueron colonizados, los bivalvos de posición postrada junto con algunos briozoarios de formas costrosas y ramificadas, fueron los organismos dominantes por superficie. No obstante, los organismos dominantes por superficie en la cara inferior del colector colonizado correspondiente a 10 meses de inmersión, fueron los bivalvos de posición postrada (Fig. 15).

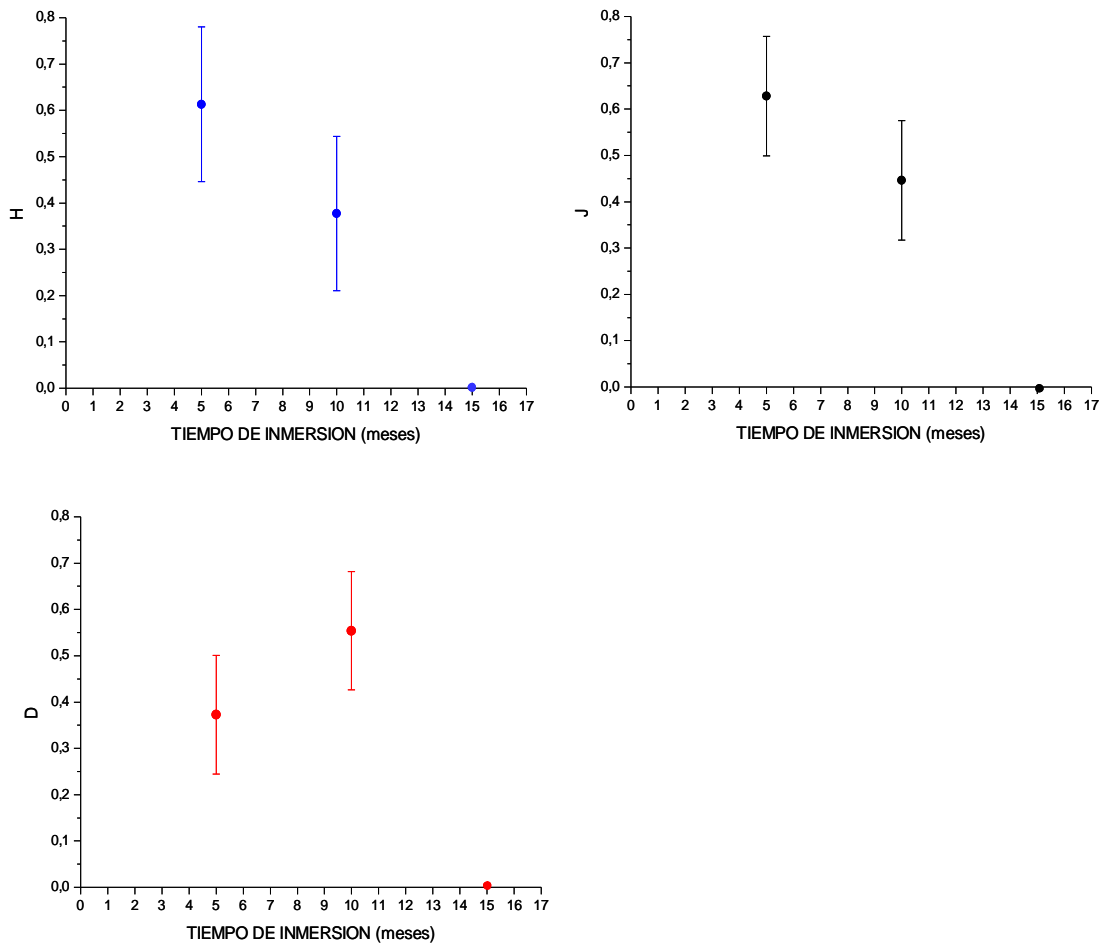


Figura 20.- Diversidad (H), Equidad (J) y Dominancia (D) de la biota sésil que colonizó la cara inferior de los discos colectores de bronce durante los periodos de inmersión de 5, 10 y 15 meses (puntos= promedio; barras=desviación estándar)

DETERIORO DE LOS MATERIALES EXPERIMENTALES DE HIERRO Y DE BRONCE EXPUESTOS A LAS CONDICIONES QUE CARACTERIZAN LOS FONDOS MARINOS DE CAMPECHE

Comportamiento electroquímico de los discos colectores de hierro y evaluación de sus velocidades de corrosión

De la curva de polarización potenciodinámica obtenida de la prueba electroquímica realizada al testigo de hierro sin colonización biológica y cero meses de inmersión, se observa que el potencial de corrosión (E_{corr}) fue de -691.32mV. En las pruebas electroquímicas realizadas posteriormente a las muestras correspondientes a 5, 10 y 15 meses de exposición que presentaron colonización biológica, se observó que el potencial de corrosión se incrementó e hizo más electronegativo hacia el mayor de estos periodos, hasta un máximo de -810.69mV, valor medido en una de las dos pruebas realizadas a los discos colectores de un periodo de inmersión de 15 meses. Así mismo, la semejanza en los potenciales de corrosión en cada una de las pruebas realizadas por duplicado, indica la reproducibilidad de las mediciones y su confiabilidad (Anexo II).

Por otra parte, la magnitud de los valores de densidad de corriente (mA cm^{-2}) fue mayor en los discos colectores de hierro correspondientes a la muestra testigo y en los colectores que estuvieron inmersos por 5 meses, respecto de la evaluada en los discos colectores que estuvieron expuestos por un periodo de inmersión de 10 y 15 meses. A pesar de que los valores de densidad de corriente se mantuvieron en el orden de magnitud de 10^{-1} , se aprecia una tendencia de “pasivación” (lo cual se observa en la rama anódica de las curvas de polarización que se muestran en el Anexo II) en los discos colectores de 10 y 15 meses de inmersión. De esta manera, por el comportamiento electroquímico

del hierro observado en las curvas de polarización, se infiere que el proceso de corrosión, al menos del disco colector de hierro “testigo”, presenta un control por “activación”, donde la etapa más lenta de este proceso es la transferencia de carga en la reacción de disolución del hierro (Anexo II).

Por otra parte, las velocidades de corrosión evaluadas en los colectores de hierro, decrecieron a lo largo de los periodos de exposición a las condiciones ambientales marinas en el área de estudio. La mayor velocidad de corrosión fue la del colector testigo (4.69mm año^{-1}) de cero meses de inmersión. En comparación, las velocidades de corrosión determinadas para los colectores expuestos por 5, 10 y 15 meses de inmersión fueron de 4.22 mm año^{-1} , 3.04mm año^{-1} y 1.20mm año^{-1} respectivamente (Fig. 21 y Tabla 7).

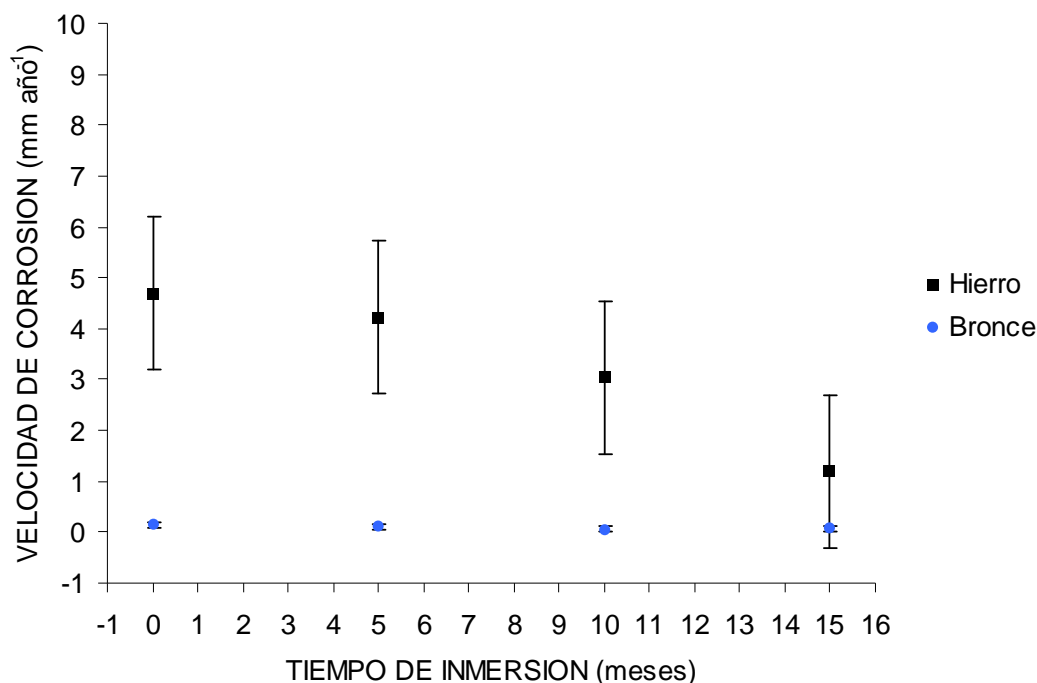


Figura 21.- Velocidad de corrosión (mm año⁻¹) de colectores de hierro y de bronce expuestos durante los periodos de inmersión de 0, 5, 10 y 15 meses, calculada a partir de las pruebas de Polarización Potenciodinámica. Nótese que los puntos de cero meses de inmersión corresponden a las mediciones realizadas a los testigos, previo a la inmersión de los discos colectores (puntos= promedio; barras= desviación estándar).

Comportamiento electroquímico de los discos colectores de bronce y evaluación de sus velocidades de corrosión

El potencial de corrosión determinado en la prueba electroquímica para el colector testigo de bronce sin colonización biológica y cero meses de inmersión en el mar fue de -263.85mV. En las pruebas realizadas posteriormente a los discos colectores de bronce correspondientes a 5, 10 y 15 meses de inmersión, se observó que los valores de potencial fueron variables a lo largo de los meses de exposición. (Anexo II).

Tabla 7 Velocidades de corrosión estimadas a partir de la técnica de Polarización Potenciodinámica

Tiempo de inmersión en el mar (meses)	Velocidad de corrosión (mm año ⁻¹) de discos colectores de hierro bajo condiciones de total exposición en el mar	Velocidad de corrosión (mm año ⁻¹) de discos colectores de bronce bajo condiciones de total exposición el mar
0	4.69*	0.15*
5	4.22	0.11
10	3.04	0.06
15	1.20	0.09

* Velocidades de corrosión de testigos, evaluadas previo a su inmersión y sin colonización biológica

Resalta que la magnitud de los valores de densidad de corriente evaluados en las curvas de polarización potenciodinámica correspondientes a los periodos de exposición de los discos colectores, estuvieron en el mismo orden de magnitud (10^{-2}), aunque el disco colector de bronce que sirvió como testigo, presentó un potencial de corrosión de un orden de magnitud mayor (10^{-1}) (Anexo II).

El comportamiento electroquímico del colector testigo de bronce mostró una corriente límite en donde a diferentes sobrepotenciales se presentaron incrementos pequeños en los valores de densidad de corriente comprendidos en la región lineal de Tafel de la rama catódica. Este comportamiento indicó la presencia de una capa de difusión en la que precisamente, la difusión del oxígeno hacia la superficie del metal en la reacción de reducción, representó la etapa más lenta en el proceso de corrosión del bronce, lo cual fue determinante en la velocidad neta del proceso. El mismo comportamiento se observó en los discos colectores de 5, 10 y 15 meses de inmersión (Anexo II). No obstante, la turbulencia en el medio marino puede aumentar de manera considerable la velocidad de difusión del oxígeno por el adelgazamiento de la capa de difusión.

Las velocidades de corrosión calculadas a partir de las curvas de polarización potenciodinámica de los colectores que permanecieron expuestos en los periodos de 0, 5, 10 y 15 meses, exhiben una tendencia lineal más o menos constante a lo largo del tiempo, aunque de un orden de magnitud relativamente pequeño (Fig. 21 y Tabla 7).

Determinación de las velocidades de corrosión del hierro mediante la pérdida de peso de probetas experimentales

Durante los primeros 5 y 10 meses de inmersión de las probetas de hierro en el mar, se observó un incremento en su pérdida de peso. No obstante, las probetas de hierro que permanecieron inmersas por 15 meses, mostraron una pérdida de peso de menor magnitud (Fig. 22) (Tabla 8).

Tabla 8 Datos experimentales de la pérdida de peso (gr) de probetas de hierro inmersas en el mar

Colocación 04-05-08 (peso inicial)			Primer muestreo 8-10-08 (5 meses de inmersión)					Segundo muestreo 26-02-09 (10 meses de inmersión)					Tercer muestreo 05-09-09 (15 meses de inmersión)					
No.	Medición 1	Medición 2	\bar{X}	Medición 1	Medición 2	Medición 3	\bar{X}	Δm	Medición 1	Medición 2	Medición 3	\bar{X}	Δm	Medición 1	Medición 2	Medición 3	\bar{X}	Δm
1	31.9012	31.9011	31.9012															
2	30.9529	30.9523	30.9526						29.4021	29.4023	29.4026	29.4023	1.5503					
3	33.8305	33.8304	33.8305											32.7539	32.7568	32.7579	32.7562	1.0743
4	31.4158	31.4156	31.4157						30.1111	30.1094	30.1093	30.1099	1.3058					
5	30.9224	30.9222	30.9223						29.3158	29.3143	29.3137	29.3146	1.6077					
6	32.7481	32.7481	32.7481															
7	31.2344	31.2343	31.2344	30.1706	30.1708	30.1710	30.1708	1.0636										
8	32.4132	32.4330	32.4231	31.5414	31.5411	31.5412	31.5412	0.8819										
9	31.1867	31.1867	31.1867															
10	35.1624	35.1621	35.1623	34.0595	34.0595	34.0595	34.0595	1.1028										
							\bar{X}	1.0161				\bar{X}	1.4879				\bar{X}	1.0743

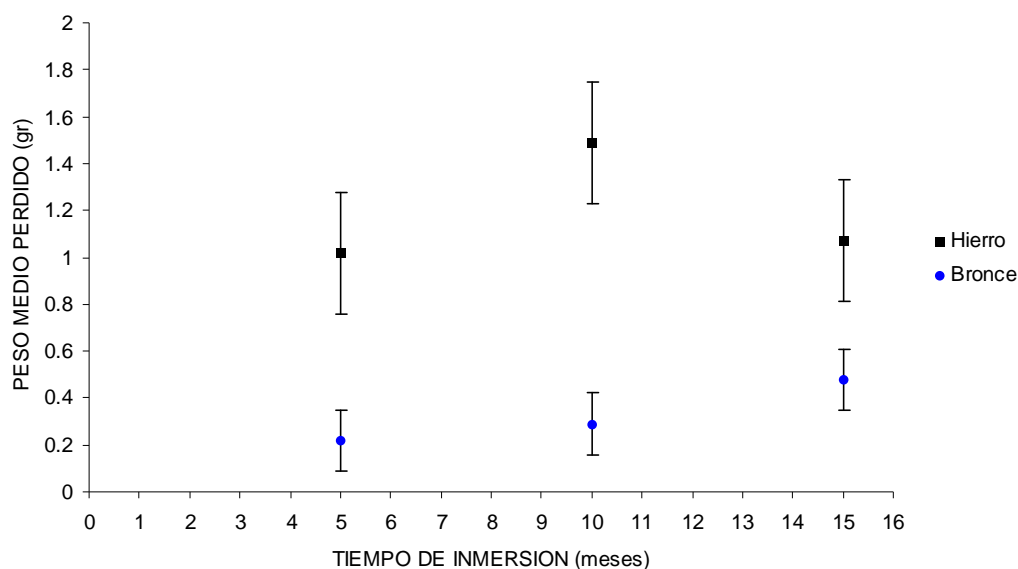


Figura 22.-Peso medio perdido (gr) a lo largo del tiempo por efecto del proceso de corrosión de probetas experimentales de hierro y de bronce expuestas durante 5, 10 y 15 meses de inmersión (puntos= promedio; barras= desviación estándar).

La evaluación de las velocidades de corrosión a partir de la pérdida de peso de las probetas de hierro, muestran una tendencia semejante, en donde se observó un incremento en la velocidad de corrosión de las probetas de hierro que estuvieron expuestas por un periodo de 10 meses, respecto de aquellas que permanecieron sumergidas por un periodo de 5 meses. Aunque posteriormente, se observó un decremento en la velocidad de corrosión de las probetas que estuvieron expuestas por un periodo de 15 meses (Fig. 23) (Tabla 9).

Tabla 9 Velocidades de corrosión calculadas a partir de la pérdida de peso de probetas de hierro y de bronce

Tiempo de inmersión (meses)	Material	
	Hierro	Bronce
Velocidad de Corrosión (mm año ⁻¹)		
5	0.63	0.22
10	0.92	0.29
15	0.66	0.48

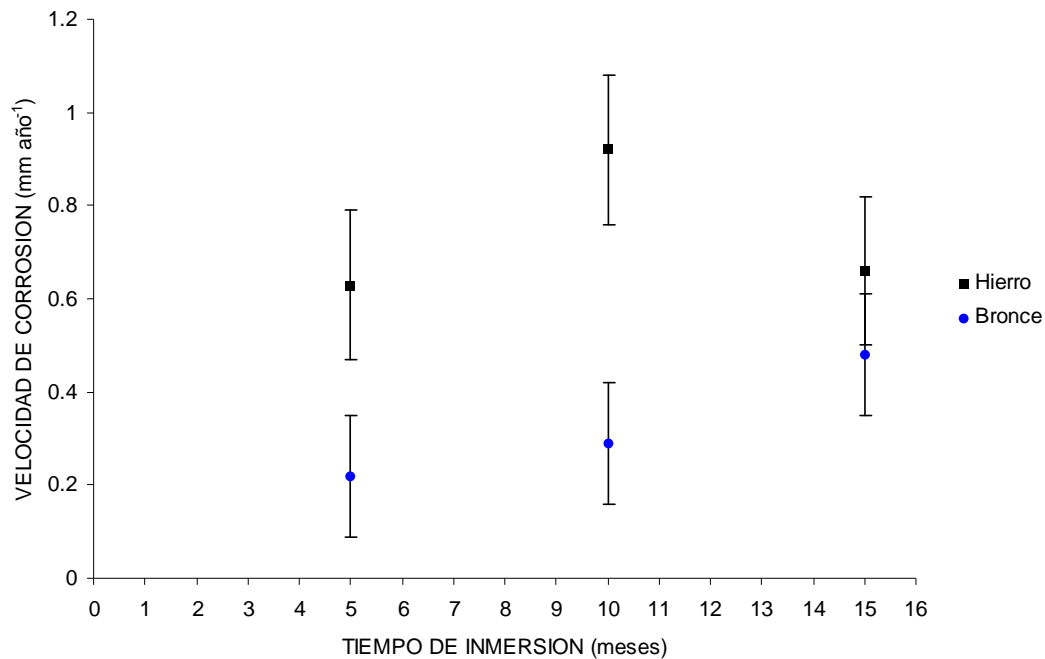


Figura 23.-Velocidad de corrosión (mm año⁻¹) de probetas experimentales de hierro y de bronce expuestas durante 5, 10 y 15 meses de inmersión, estimada a partir de su pérdida de peso (puntos= promedio; barras= desviación estándar).

Determinación de las velocidades de corrosión del bronce mediante la pérdida de peso de probetas experimentales

Las probetas de bronce que permanecieron expuestas en el mar por 5, 10 y 15 meses, sufrieron una pérdida de peso que se incrementó con el tiempo de manera casi aritmética (Fig. 22), tal y como se muestra en la Tabla 10. Las evaluaciones de las velocidades de corrosión de las probetas de bronce en los mismos periodos de exposición, mostraron de la misma manera un incremento constante a lo largo del tiempo (Fig. 23). En la Tabla 9 se muestran los datos de las velocidades de corrosión de las probetas de bronce.

Tabla 10 Datos experimentales de la pérdida de peso (gr) de probetas de bronce inmersas en el mar

No.	Colocación 04-05-08 (peso inicial)				Primer muestreo 8-10-08 (5 meses de inmersión)					Segundo muestreo 26-02-09 (10 meses de inmersión)					Tercer muestreo 05-09-09 (15 meses de inmersión)				
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	\bar{X}	Medición 1	Medición 2	Medición 3	\bar{X}	Δm	Medición 1	Medición 2	Medición 3	\bar{X}	Δm	Medición 1	Medición 2	Medición 3	\bar{X}	Δm
1	21.4063	21.4605	21.4603	21.4424											20.6827	20.6825	20.6823	20.6825	0.7599
2	22.4846	22.4846	22.4845	22.4846						21.9173	21.9169	21.9167	21.9170	0.5676					
3	25.3265	22.3263	22.3265	23.3264															
4	22.1780	22.1780	22.1780	22.1780						21.8065	21.8062	21.8060	21.8062	0.3718					
5	24.5208	24.5207	24.5208	24.5208						24.1615	24.1613	24.1611	24.1613	0.3595					
6	22.0484	22.0484	22.0484	22.0484	21.7098	21.7096	21.7094	21.7096	0.3388										
7	23.5359	23.5361	23.5361	23.5360	23.1554	23.1554	23.1554	23.1554	0.3806										
8	23.4334	23.4335	23.4334	23.4334	23.1519	23.1518	23.1518	23.1518	0.2816										
9	22.8112	22.8114	21.8112	22.4779															
10	22.7311	22.7312	22.7311	22.7311											22.0781	22.0775	22.0774	22.0777	0.6535
									\bar{X} 0.3337					\bar{X} 0.4329					\bar{X} 0.7067

CAPÍTULO 8

EFFECTO DE LOS PROCESOS DE COLONIZACIÓN BIOLÓGICA Y DE CORROSIÓN EN LA TRANSFORMACIÓN Y DEGRADACIÓN DEL HIERRO Y EL BRONCE

“.....Desde que comenzamos a recorrer mares más frecuentados, divisamos frecuentemente cascos de navío que se iban pudriendo entre dos aguas, y en lo profundo sobre el suelo, cañones, proyectiles, anclas, cadenas y otros mil objetos de hierro, que devoraba el moho”.

Julio Verne

Veinte mil leguas de viaje submarino

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS MUESTRAS EXPERIMENTALES DE HIERRO Y DE BRONCE RESPECTO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ARTEFACTOS ARQUEOLÓGICOS

En la antigüedad una gran cantidad de los artefactos metálicos que se fabricaban y que iban a bordo de las embarcaciones eran piezas de artillería. Sin embargo, la metalurgia para su fabricación al menos en el siglo XVI, se basaba en la observación y en la experiencia, pues no se conocían ni se podía controlar con precisión las composiciones de las aleaciones empleadas (Arano, *op. cit.*). No obstante en la actualidad, gracias al avance de las técnicas de fundición y del análisis de materiales, es posible fabricar piezas con una composición precisa y conocer de la misma manera la composición de las aleaciones. Por ejemplo, ahora se sabe que el hierro fundido o colado contiene entre el 2% y el 4.5% en peso de C, el cual está presente en la matriz de hierro en forma de grafito. El

resto se compone principalmente de Fe y en menor proporción de algunos otros elementos como Si, Mn, S y P. Así mismo, las aleaciones ferrosas que contienen menos del 2% de C, conforman el grupo de los aceros, entre los cuales en la actualidad existe una gran diversidad.

Por otro lado, el bronce es una aleación cuyos principales elementos son el Cu, Zn y Sn. Aunque algunos autores señalan que se denomina latón a la aleación en donde el Zn se encuentra en mayor proporción que el Sn, mientras que si la cantidad de Sn presente en la aleación es mayor que la del Zn, se denomina bronce. Sin embargo, la diferencia entre bronce y latón es bastante imprecisa y no existe una división clara entre ambos, por lo que de manera general en este estudio se le denomina bronce. Este metal fue muy usado además de para la fabricación de artillería, para la fabricación de láminas de bronce que eran usadas como recubrimiento de los cascos de madera de embarcaciones, con la finalidad de proteger éste de la actividad biológica de organismos como el *Teredo navalis*¹⁹, así como de la incrustación de organismos marinos. Así también, fue empleado en la fabricación de piezas específicas que formaban parte de la estructura de los barcos antiguos, por ejemplo, algunos herrajes que iban sujetos a la quilla y al timón o en la fabricación de objetos de uso cotidiano en las embarcaciones.

Algunos datos publicados sobre la composición química de diversos artefactos fabricados tanto de hierro como de bronce incluyen cañones, balas de cañón, abrazaderas empleadas en el timón, campanas y compases náuticos, entre otros, todos ellos con cronologías que van desde el siglo I a.C. hasta el siglo XIX d.C. Estos artefactos han sido recuperados de diversos sitios de naufragio localizados en las Islas Scilly de la Gran Bretaña, así como en Sicilia en Italia y en diversos sitios de Australia. Por ejemplo, el estudio de la composición elemental de balas de cañón recuperadas del sitio de naufragio del

¹⁹ molusco bivalvo bien conocido desde épocas antiguas por que se alimenta de la madera y puede perforar y hacer túneles en ésta

Batavia, que se sabe se hundió en el año de 1629 y se localiza en los arrecifes de la costa oeste de Australia (North y MacLeod, *op. cit.*), mostró la siguiente composición química (%-peso): Fe= 94; C= 4.6; P= 0.22; S= 0.55 y Si =0.71. Estos datos indican que el hierro empleado en la fabricación de estas balas de cañón contiene un alto porcentaje de carbono, típico de los hierros colados.

En el caso de artefactos de bronce se aprecia una variabilidad en su composición elemental, tal como lo muestran algunos datos publicados por North y MacLeod, (*op. cit.*). Por ejemplo, un cañón de bronce desmontable de tamaño pequeño hallado en el sitio de naufragio del *HMS Association* hundido en 1707, presentó la siguiente composición (%-peso): Cu= 74.5; Sn= 1; Zn= 22.2; Pb= 1.3; Fe= 0.7; Sb=0.1, As=0.07 y Ni= 0.1. Así mismo, se determinó que la composición elemental (%-peso) de otro cañón de tamaño pequeño procedente de este mismo sitio contenía (%-peso): Cu= 90.3; Sn= 6.6; Zn= 0.4, Pb= 2.0; Fe= 0.02; Sb= 0.2; As= 0.4 y Ni= 0.1. Otro tipo de objetos arqueológicos analizados, como un compás náutico procedente del mismo sitio de naufragio del *HMS Association* presentó la siguiente composición (%-peso): Cu= 78.4; Sn= 1; Zn= 20.6; Pb= 1; Fe= 1; As=0.1 y Ni= 0.2. Algunos otros vestigios de bronce pertenecientes al timón de la embarcación del naufragio *Chalmers* hundido en 1874 en las costas de Australia, mostraron estar compuestos de la siguiente manera (%-peso): Cu= 63; Sn= 2.4; Zn= 20.5; Pb= 13.6; Fe= 0.8 y Sb=0.1 (North y MacLeod, *op. cit.*).

Los datos anteriormente citados permiten tener un referente sobre la composición de artefactos arqueológicos de diversas cronologías y comparar su composición elemental con respecto de la composición de las muestras experimentales de hierro y de bronce que fueron fundidas especialmente para este estudio (Tabla 2). Como se puede apreciar, ésta se encuentra dentro de los intervalos de composición de algunos de los artefactos mencionados. El hierro experimental usado en este estudio, se clasifica como un hierro colado con un alto contenido de carbono, similar en composición al hierro con que fueron

fabricadas las balas de cañón recuperadas del sitio de naufragio del *Batavia* (1629). Así mismo, la composición de las muestras experimentales de bronce es muy similar a la composición del cañón desmontable procedente del sitio de naufragio del *HMS Association* (1707). De tal manera que los resultados de la evaluación del deterioro y de la colonización biológica de las muestras experimentales de hierro y de bronce empleadas en este estudio, pueden ser extrapolados con un grado de confiabilidad considerable a lo sucedido a artefactos arqueológicos de hierro y de bronce que yacen en condiciones similares en los fondos marinos en la costa de Campeche²⁰.

COLONIZACIÓN BIOLÓGICA DEL HIERRO Y SU EFECTO SOBRE EL PROCESO DE CORROSIÓN

Desarrollo de la biota sésil sobre la superficie de los discos colectores de hierro

En un sitio de naufragio es común encontrar vestigios de hierro que al ser analizados presentan una abundante concreción y con un desarrollo de organismos en su superficie bastante considerable, desde algas hasta corales. En este sentido, los datos obtenidos en el presente estudio, mostraron que los colectores de hierro fueron ampliamente colonizados, llegando a presentar hacia el final del periodo de inmersión después de 15 meses, una cobertura biológica casi del 100%. La abundante colonización que presentaron las muestras experimentales de hierro es sobresaliente si se considera que desde el punto de vista químico, el hierro no es un sustrato inerte. Aunque, es bien conocido que no presenta efectos biocidas.

²⁰ Aunque, sería muy recomendable comenzar a realizar estudios sobre la composición de artefactos arqueológicos de hierro y de bronce que yacen específicamente en los diversos sitios arqueológicos subacuáticos que se localizan en la costa de Campeche.

La experimentación con materiales experimentales de hierro semejantes en composición química a artefactos arqueológicos, permite inferir el proceso de colonización que siguen éstos bajo condiciones naturales de total exposición en los fondos marinos de Campeche. De esta manera se pudo determinar que existió una colonización específica y preferencia de ciertos taxa hacia el hierro y hacia cada una de las superficies (cara superior e inferior) de los colectores. También se observó que la comunidad cambió su estructura estacionalmente, aunque se integró de manera general de un número reducido de especies, donde existió la dominancia de unas cuantas de ellas. En este sentido, los datos mostraron que la estructura de la comunidad que se asentó en la cara superior de los discos colectores presentó un cambio estacional muy marcado entre los 5 y los 10 meses de exposición de los colectores. A pesar de lo anterior, no se observó un cambio significativo en la diversidad de la biota sésil que colonizó la cara superior de los colectores de hierro expuestos durante 5, 10 y 15 meses, aunque si se observó un cambio en la composición, abundancia y formas de vida dominantes. Por ejemplo, la cara superior de los discos colectores expuestos por 5 meses, estuvo dominada principalmente por bivalvos de la familia Ostreidae, los cuales mostraron una clara asociación con esta superficie tal como evidenció el análisis de redundancia que se muestra en la Figura 24. Así mismo, el análisis de redundancia mostró que las esponjas y la especie de anfípodo tubícola identificadas en este estudio se asentaron preferentemente en la cara superior de los colectores de hierro expuestos durante 5 meses. No obstante, el briozoario *Labioporella sinuosa* que también fue dominante por superficie en la cara superior en este periodo, no mostró una relación evidente con la cara superior de los colectores de hierro (Fig. 24).

Por otra parte, en la cara superior de los discos colectores que estuvieron sumergidos por 10 meses, *L. sinuosa* junto con la esponja *Anthosigmella varians* y el alga *Cladophora liniformis* pasaron a ser las formas dominantes por superficie, reemplazando casi por completo a los bivalvos (Ostreidae). Lo anterior, concuerda con los resultados derivados del análisis de redundancia que

se muestra en la Figura 25, en donde se observa que existió una asociación entre la cara superior de los colectores de hierro y las especies de briozoarios *L. sinuosa* y *Aetea sica*, así como con el alga *C. liniformis*, la esponja *A. varians*, algunas especies de anélidos (sabellidae) y la especie de anfípodo tubícola (Amphipoda).

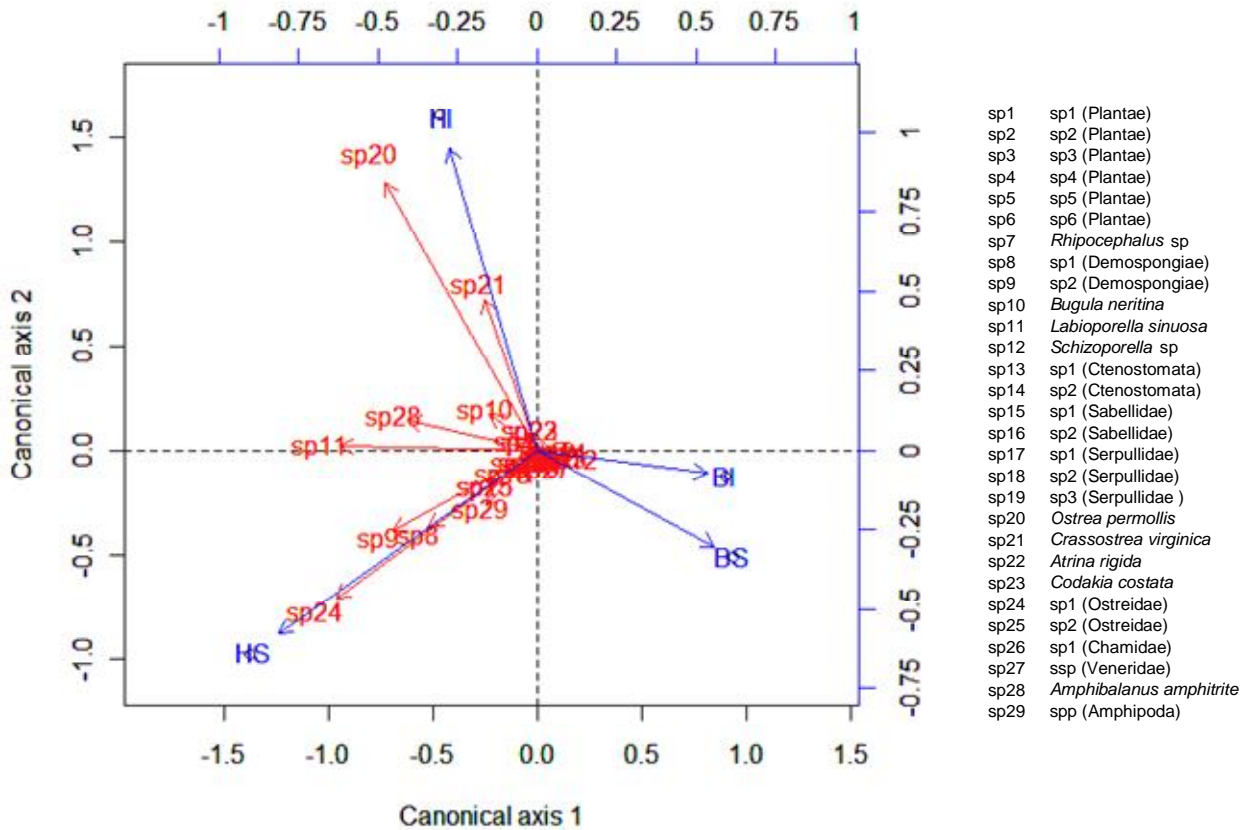


Figura 24 .- Análisis de redundancia (RDA) aplicado a la biota sésil que colonizó los materiales experimentales de hierro y de bronce que estuvieron expuestos por 5 meses. Flechas representan vectores de especies y tipo de sustrato. HS= hierro cara superior; HI= hierro cara inferior; BS= bronce cara superior; BI= bronce cara inferior; sp + número= código asociado con cada especie.

Para los 15 meses de inmersión, la superficie de la cara superior de los discos colectores de hierro fue dominada casi por completo por la especie *L. sinuosa*. Esta especie continuó manteniendo una asociación con la cara superior de los colectores de hierro de este periodo de inmersión (Fig. 26). No obstante, algunas especies de anélidos (Sabellidae), el hidrozooario *Campanularia angulata* y la especie de anfípodo tubícola identificada en el presente estudio, también

mostraron una asociación con la cara superior de los discos colectores de 15 meses de inmersión, tal como se aprecia en la Figura 26.

Por otra parte, la biota sésil que colonizó la cara inferior de los discos colectores también presentó cambios estacionales en su estructura. Los datos mostraron cambios significativos en la diversidad y la abundancia de la biota sésil en los diferentes periodos de inmersión. Por ejemplo, a pesar de que la superficie de la cara inferior de los colectores fue dominada desde los cinco meses de inmersión y hasta los 15 meses por los bivalvos *Ostrea permollis* y *Crassostrea virginica*, en determinados periodos se incorporaron algunas especies que fueron relativamente abundantes, como el briozooario *Bugula neritina* en los discos colectores de 5 meses de inmersión ó como la esponja *A. varians* y diversas especies de poliquetos (Serpulidae) y briozooarios (*L. sinuosa*) en los discos colectores de 10 meses de inmersión. Lo anterior coincide con los resultados observados en el análisis de redundancia, donde se observa que existió una asociación evidente entre la cara inferior de los colectores de hierro y *O. permollis* y *C. virginica*. De igual manera el análisis de redundancia mostró que la esponja *A. varians* y otras especies de bivalvos, así como de anélidos (Serpulidae) presentaron una asociación con la cara inferior de los discos colectores de hierro inmersos por 10 meses y 15 meses (Figs. 24-26).

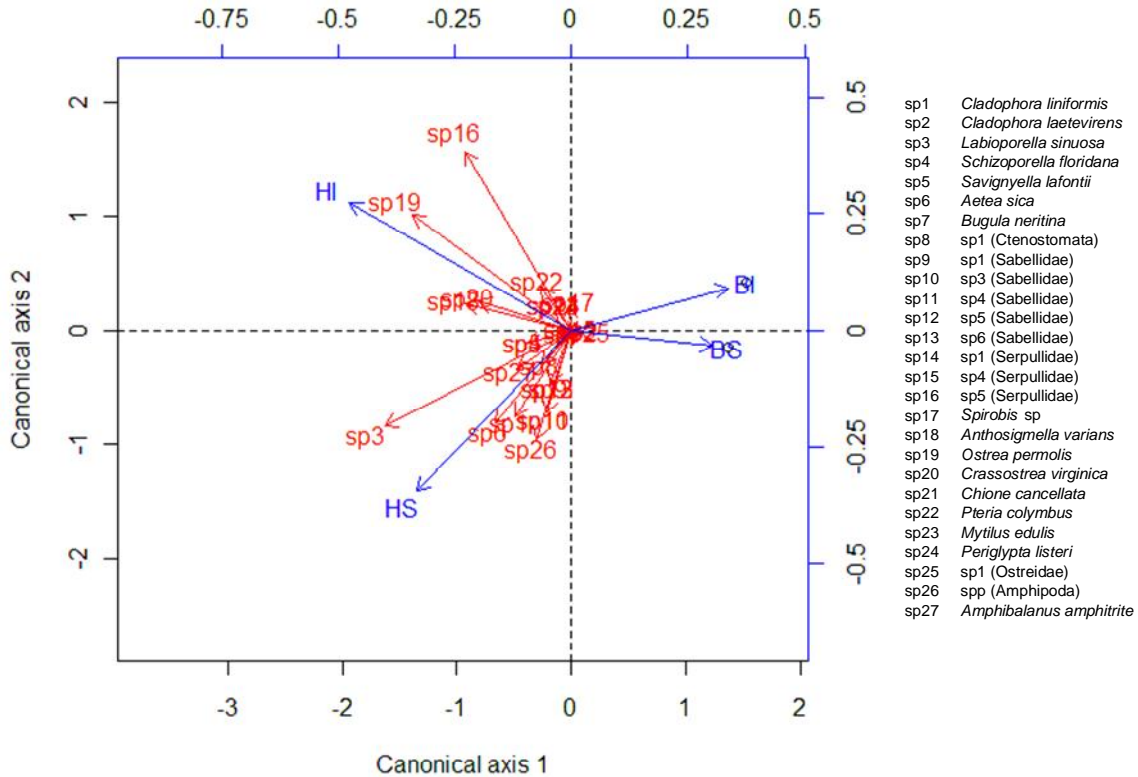


Figura 25.- Análisis de redundancia (RDA) aplicado a la biota sésil que colonizó los materiales experimentales de hierro y de bronce que estuvieron expuestos por 10 meses. Flechas representan vectores de especies y tipo de sustrato. HS= hierro cara superior; HI= hierro cara inferior; BS= bronce cara superior; BI= bronce cara inferior; sp + número= código asociado con cada especie.

Así mismo, se presentaron diferencias en la composición de especies, formas biológicas, abundancia, diversidad, equidad y dominancia entre la cara superior e inferior de los colectores de hierro, lo cual mostró una clara divergencia en la estructura de la comunidad que se asentó en cada una de estas superficies. En este sentido la diversidad y equidad mostró una tendencia de disminución en la cara superior de los colectores, así como un aumento en la dominancia. Por otro lado, estas mismas variables en la cara inferior mostraron una tendencia de aumento en los primeros 10 meses de desarrollo de la comunidad, aunque después, a los 15 meses éstas parecieron estabilizarse.

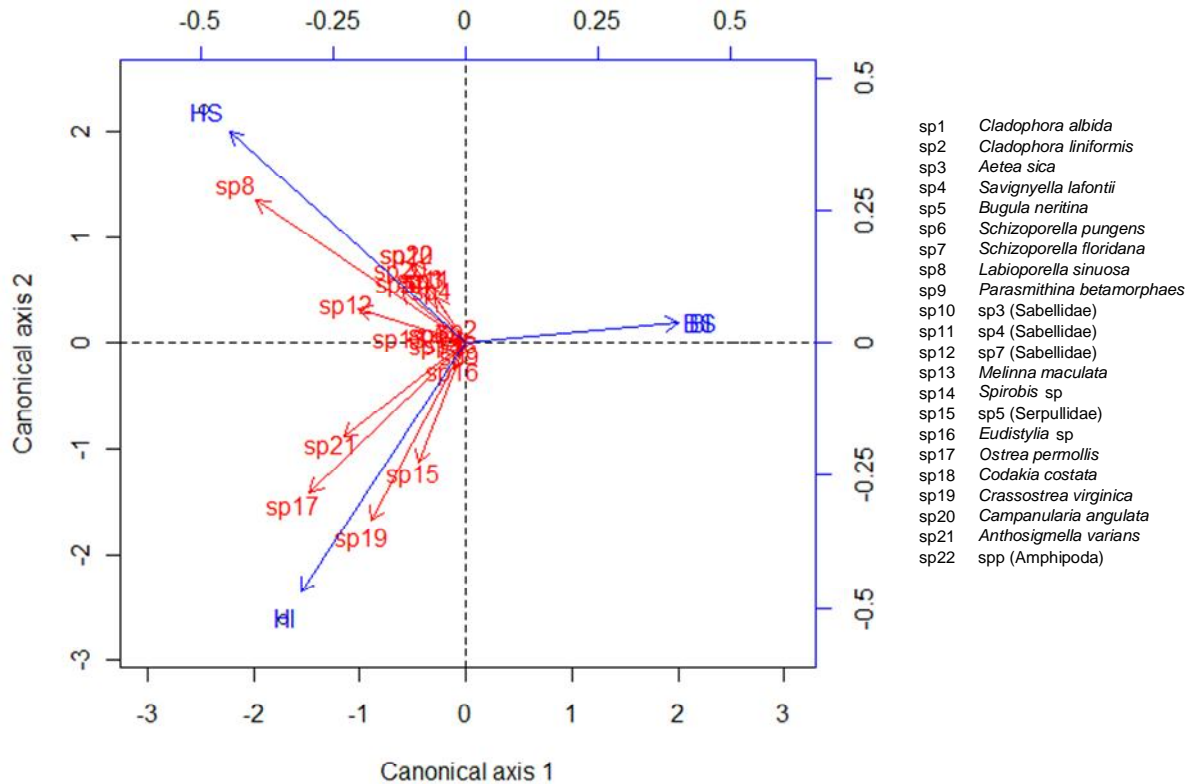


Figura 26.- Análisis de redundancia (RDA) aplicado a la biota sésil que colonizó los materiales experimentales de hierro y de bronce que estuvieron expuestos por 15 meses. Flechas representan vectores de especies y tipo de sustrato. HS= hierro cara superior; HI= hierro cara inferior; BS= bronce cara superior; BI= bronce cara inferior; sp + número= código asociado con cada especie.

Las diferencias en la estructura de la biota sésil que colonizó la cara superior e inferior pueden ser analizadas desde el punto de vista del asentamiento de las larvas, así como de los factores físicos y químicos que afectan esta etapa del ciclo de vida de los organismos, donde de manera general, pasan de una existencia planctónica a una perifitónica.

Se conoce que durante el periodo de pre-asentamiento, las larvas no son sensibles a los cambios de presión hidrostática, pero al final del estado planctónico durante la etapa de asentamiento, éstas se vuelven muy sensibles a otros factores como la dirección de la luz, la gravedad y en algunas ocasiones a la dirección de la corriente. Estos vectores permiten a las larvas orientarse respecto de su posición en la columna de agua y respecto del sustrato (Railkin,

op. cit.), por lo que en general se considera que determinan en buena parte el lugar de asentamiento de la larva. Por ejemplo, con base en diversos experimentos realizados tanto en laboratorio como en campo, se ha establecido en algunos casos, que las larvas de ciertos invertebrados marinos presentan fototaxis, es decir, su asentamiento se ve afectado en respuesta a estímulos luminosos.

Entre los organismos cuyas larvas presentan fototaxis se han identificado dos tipos principales. En el primer tipo, que se considera el más numeroso, se agrupan los organismos que en su estadio larval planctónico presentan una reacción positiva a la luz y durante el asentamiento presentan una reacción negativa. El segundo grupo se integra por aquellos organismos cuyas larvas en su etapa de asentamiento continúan presentando una reacción positiva al estímulo luminoso. Por ejemplo, se ha establecido que diversas especies de poliquetos, entre ellas, algunas pertenecientes al género *Spirobis*, así como briozoarios del género *Bugula*, algunas ascidias y cirripedios, presentan fototaxis negativa durante la etapa de asentamiento. Por otro lado, algunos otros cirripedios como *Amphibalanus amphitrite* e igualmente algunas especies del género *Spirobis*, presentan fototaxis positiva durante su etapa de asentamiento (Railkin, *op. cit.*).

Al respecto, en las muestras experimentales de hierro se identificó al briozoario ramificado *Bugula neritina* y una especie de poliqueto del género *Spirobis spp.* Aunque se registró que estas especies colonizaron ambas caras (superior e inferior) de los discos colectores de hierro, en general, los poliquetos fueron mucho más abundantes en la cara inferior de los colectores que permanecieron sumergidos por 10 y 15 meses. De la misma manera, el cirripedio *Amphibalanus amphitrite* fue relativamente abundante en la cara superior de los discos colectores que permanecieron expuestos por 5 meses. Otros organismos como las macroalgas que evidentemente su colonización depende en gran parte de la iluminación, colonizaron la cara superior de los

discos colectores, siendo más abundantes en los colectores que permanecieron sumergidos por 10 meses.

Ciertamente los factores mencionados no son los únicos que pueden intervenir en el patrón de distribución de los organismos que colonizaron la cara superior e inferior de las muestras experimentales de hierro, sino también factores como la gravedad, la turbulencia y la corriente. Por ejemplo, se ha visto que las larvas de los bivalvos *Mytilus edulis* y *Hiatella artica* muestran fototaxis negativa durante su etapa de asentamiento, sin embargo se ha visto que también pueden presentar una geotaxis positiva, en donde el vector de su asentamiento se dirige en el sentido de la dirección de la gravedad (Bayne, 1976, *apud* Railkin, *op. cit.*). De acuerdo con Railkin, *op. cit.*, lo anterior ayuda a explicar por qué en diversos experimentos realizados con placas de asentamiento colocadas de forma horizontal, estos organismos colonizan preferentemente la cara superior de los sustratos experimentales. Sin embargo, lo observado en los discos colectores de hierro no concuerda con esta afirmación, pues los bivalvos *Ostrea permollis* y *Crassostrea virginica* presentaron una asociación con la cara inferior de los discos colectores a lo largo de todo su periodo de inmersión (Figs. 24-26), donde colonizaron y fueron más abundantes. Por lo que el asentamiento de las larvas de estos organismos puede estar determinado entre otros factores, por fototaxis negativa.

En muchos casos la selección del sustrato no está solamente supeditada a la acción de los factores mencionados anteriormente, sino también depende de factores como los propios sistemas de sensoramiento de las larvas que utilizan en la selección de dicho sustrato. Aunque también se han establecido diversos mecanismos por los cuales las larvas son inducidas y estimuladas al asentamiento. Estos mecanismos incluyen factores de superficie físicos, químicos y físico-químicos que actúan por contacto, aunque en el caso de los factores químicos, éstos también pueden actuar a distancia. De tal manera que los propios organismos pueden inducir el asentamiento de los estadios larvales

mediante estos factores, por lo que se distinguen dos tipos de inducción (y estimulación). El primer tipo conocido como inducción conespecífica, se refiere a la generada por individuos de la misma especie, mientras que el segundo, conocido como inducción heteroespecífica, se refiere a la generada por individuos de otra u otras especies.

Existe un número limitado de estudios en donde se ha logrado comprobar definitivamente la atracción a distancia de las larvas hacia un determinado tipo de sustrato. Uno de los ejemplos más notables para los fines de este estudio es el de *Crasostrea virginica*, debido a que fue una de las especies dominantes por superficie en la cara inferior de los discos colectores de hierro a lo largo de todo su periodo de exposición. De acuerdo con el estudio realizado por Tamburri et al., (1996) *apud* Railkin *op. cit.*, cuando a larvas de *C. virginica* se les coloca en un acuario circular con agua clara en donde la corriente imita la forma del acuario, éstas nadan en trayectorias rectas. Sin embargo, cuando se coloca una base en el fondo del acuario con los adultos de estos organismos adheridos a dicha base, el comportamiento de las larvas cambia drásticamente, comenzando a nadar en trayectorias curvas en dirección hacia el fondo para posteriormente asentarse. Lo anterior, muestra la posibilidad de una inducción conespecífica química a distancia. Un efecto similar ha sido reportado para el bivalvo *Ostrea edulis* en donde se estableció que los juveniles de esta especie indujeron el asentamiento de las larvas de su misma especie (Railkin *op. cit.*). *O. edulis* forma grandes agregaciones de individuos al igual que lo hizo *O. permollis* en las caras inferiores de los discos colectores de hierro durante todo su periodo de inmersión.

Uno de los ejemplos más conocidos de inducción conespecífica química por contacto ocurre en los cirripedios, en donde las larvas de estos organismos se asientan cerca de los individuos adultos de la misma especie (Lewis, 1978 *apud* Railkin, *op. cit.*), evitando el contacto con otros individuos de otras especies de cirripedios (Railkin, *op. cit.*). En este caso llamó la atención que

Amphibalanus amphitrite sólo fue abundante como se había mencionado, en la cara superior de los discos colectores de hierro de 5 meses de inmersión, debido probablemente a su fototaxis positiva durante el asentamiento de las larvas de estos organismos, pero además, fue notorio que sólo en algunos de los discos colectores de hierro de este periodo se encontraron agregaciones densas de estos organismos. Esto, debido tal vez a un efecto de inducción conespecífica química por contacto, como la que ha sido reportada en diversas especies de cirripedios, así como para la propia *A. amphitrite*.

Se ha establecido también que el desarrollo de biofilms induce y/o estimula el asentamiento, la fijación, e incluso, en algunos casos la metamorfosis de diversos organismos. Por ejemplo, bajo condiciones de laboratorio, se ha detectado que biofilms de bacterias inducen el asentamiento y la metamorfosis de *Crassostrea virginica* (Walch et al. 1987 *apud* Railkin *op. cit.*).

Así mismo, factores como el tipo de sustrato, su orientación (horizontal y vertical), su textura, la forma superficial del sustrato, entre otros, tienen un efecto sobre el asentamiento de las larvas. En trabajos como los de Herrera, *op. cit.*, se ha documentado y estudiado el efecto rugofílico de los sustratos sobre el asentamiento de comunidades de formas de vida sésil, aunque esto no es una regla general. Así mismo, en algunos estudios como los realizados por Riggio y di Pissa (1981) *apud* Railkin *op. cit.*, se ha evaluado la colonización biológica en superficies de forma convexa y cóncava, encontrando que las superficies convexas fueron las primeras en ser colonizadas, en comparación con las superficies cóncavas que permanecieron sin ser colonizadas por un largo periodo de tiempo. En este estudio, ambas superficies fueron puestas bajo condiciones de igual iluminación. Lo anterior es relevante, pues los artefactos arqueológicos presentan diversas formas, como por ejemplo los cañones que ofrecen una superficie convexa, lo cual también puede ser una variable que afecte el asentamiento y colonización de la superficie de los vestigios en un sitio de naufragio.

Por otro lado, los resultados obtenidos indicaron que la estructura de la comunidad que colonizó el hierro fue distinta de la comunidad que colonizó el bronce, como se explica un poco más adelante. El tipo de sustrato y las características químicas, en específico las del bronce, fueron determinantes en las diferencias en la estructura y asentamiento de la comunidad que colonizó estos materiales.

La biota sésil y su efecto sobre el proceso de corrosión del hierro

El desarrollo de las comunidades marinas de macroorganismos bentónicos de formas de vida sésil sobre la superficie de vestigios arqueológicos metálicos tal cómo cañones, anclas, balas de cañón o los propios cascos de las embarcaciones hundidas, entre otros, ha sido señalado por algunos autores como un factor de importancia en el proceso de corrosión de dichos vestigios. En este sentido, MacLeod, (2002) y North y MacLeod, *op. cit.*, consideran que el desarrollo de estas comunidades en la superficie de los artefactos arqueológicos constituye una barrera que disminuye el intercambio de especies químicas que intervienen en el proceso de corrosión, además de que resulta en la formación de un microambiente en la interfase metal-biota sésil.

Visto de cierta manera, la corrosión de los metales en el medio marino es un proceso que se da en la superficie de éstos y en la cual ocurren diversas reacciones químicas heterogéneas de oxidación y reducción. No obstante, es bien conocido que para que se produzca una reacción química sobre una superficie determinada, debe en primer lugar haber la difusión de los reactivos hacia la superficie con su consecuente adsorción. Una vez ocurrida la reacción, se presenta la desorción de los productos y su difusión desde dicha superficie. La rapidez con que ocurra cualquiera de estos procesos o la combinación de ellos es determinante en la velocidad de reacción.

Debido a lo anterior, si es interpuesta una barrera física entre la superficie de un metal y el medio marino, las reacciones catódica y anódica serán afectadas como consecuencia por ejemplo de la menor difusión del oxígeno (agente oxidante) hacia la superficie del metal, así como por la menor rapidez en la transferencia de la carga y la liberación de iones metálicos. Bajo estas condiciones, la velocidad de corrosión estará controlada por la combinación de estos procesos.

En el caso del hierro, el comportamiento electroquímico observado en la curva de polarización potenciodinámica del colector testigo, sugirió que la velocidad del proceso de corrosión del hierro sin colonización biológica, estuvo controlada por “activación”, es decir, la transferencia de carga en la reacción de disolución del hierro, fue la etapa más lenta en todo el proceso. No obstante, este comportamiento electroquímico fue distinto en el caso de los colectores expuestos durante 5, 10 y 15 meses de inmersión, debido al efecto del desarrollo de la comunidad biológica de formas de vida sésil que colonizaron la superficie de los discos colectores.

En general la cobertura promedio de los colectores de hierro se incrementó a lo largo del tiempo de 55% a 97%. Aunque de manera particular, en los discos colectores de 5 meses de inmersión ambas superficies (superior e inferior) fueron dominadas por bivalvos de posición postrada, organismos que se puede considerar ofrecieron una cobertura espacial poco uniforme y heterogénea debido a su forma de crecimiento, distribución y grado de cobertura sobre el sustrato. En contraste, la cara superior de los colectores expuestos por un periodo de 10 meses de inmersión fue dominada por organismos de desarrollo costroso (briozoarios y esponjas) que presentaron un porcentaje de cobertura del 76%. Mientras que la cara inferior, fue dominada por bivalvos de posición postrada (49%) y organismos de crecimiento costroso como briozoarios y esponjas (20%). Como se puede apreciar, la cobertura de las formas costrosas sobre la superficie de los discos colectores de hierro expuestos por 10 meses,

se incrementó respecto de los colectores que permanecieron expuestos por 5 meses. En cuanto a los discos colectores que permanecieron expuestos por un periodo de inmersión de 15 meses, la cara superior de éstos fue dominada por formas de crecimiento costroso, principalmente briozoarios y esponjas (87%), mientras que la cara inferior continuó siendo dominada por bivalvos de posición postrada (73%) y organismos de crecimiento costroso (17%) representados por esponjas y briozoarios. Como se observó, las muestras expuestas por un periodo de 15 meses de inmersión mostraron nuevamente un incremento en la cobertura de organismos de formas de crecimiento costroso. Lo anterior es importante, pues estos organismos proporcionaron una cobertura más uniforme que se puede considerar homogénea y de menor porosidad, respecto de la cobertura que ofrecieron los bivalvos de posición postrada. De esta manera, las formas de crecimiento costroso llegaron a conformar una barrera natural poco porosa.

Al analizar y comparar los datos biológicos y de corrosión obtenidos, se observó que la velocidad de corrosión mostró una tendencia en la cual decreció a lo largo del tiempo, mientras que la cobertura biológica y la dominancia de formas de crecimiento costroso se incrementó a lo largo de este mismo periodo (Tabla 11).

Estos resultados sugieren que el incremento general en la cobertura biológica, así como la dominancia de formas de crecimiento costroso, que en este caso colonizaron y predominaron en los colectores de hierro correspondientes a 10 y 15 meses de inmersión, tuvo un efecto significativo en la cinética del proceso de corrosión de los materiales de hierro en esta área, ya que conformaron una barrera física más homogénea y menos porosa que disminuyó el intercambio de especies químicas que participan en las reacciones de corrosión. Es decir, la velocidad de corrosión del hierro fue afectada por el grado de cobertura de la comunidad biológica y la dominancia de unas cuantas especies de formas costrosas, que conformaron una barrera física que afectó la

difusión del oxígeno, así como la rapidez en la transferencia de la carga y la liberación de iones metálicos.

Este mismo efecto ha sido reportado en un estudio realizado en aguas tropicales de la India en la costa de Mandapam, en el cual fueron expuestas a las condiciones marinas durante un ciclo anual muestras experimentales de un tipo de acero comercial. Las muestras de acero fueron colonizadas y dominadas por algas y cirripedios, cuyo incremento de biomasa a lo largo del tiempo se relacionó con la disminución en las tasas de corrosión de este acero. De acuerdo con este estudio, estos organismos crearon una densa cubierta en la superficie de las muestras de acero que redujo la difusión del oxígeno (Palraj, 2006).

Por otra parte, los resultados obtenidos en el presente estudio también indicaron que la cobertura biológica poco densa de los colectores de hierro de 5 meses de inmersión, dominada por bivalvos de posición postrada que conformaron una distribución espacial heterogénea, no tuvo un efecto considerable en la cinética del proceso de corrosión. Lo anterior, debido a que estos organismos no conformaron una barrera física que afectara de manera significativa el intercambio de especies químicas que participan en el proceso de corrosión. No obstante, por los resultados observados en otros estudios, parece ser que estos organismos inducen o se encuentran relacionados con otro tipo de procesos corrosivos.

Tabla 11. Efecto de la comunidad de macroorganismos de vida sésil sobre el proceso de corrosión del hierro

Tiempo de inmersión (meses)	Cobertura promedio (%)	Formas biológicas dominantes	Velocidad de corrosión (mm año ⁻¹)	
			Polarización Potenciodinámica	Gravimétrico
0	0	-	4.69	-
5	55	Bivalvos de posición postrada	4.22	0.63
10	91	Organismos de desarrollo costroso (briozoarios y esponjas) y bivalvos de posición postrada	3.04	0.92
15	97	Formas de crecimiento costroso (briozoarios y esponjas) y en menor grado de bivalvos de posición postrada	1.20	0.66

Por ejemplo, en un estudio realizado por Neville y Hodgkiess, *op. cit.*, se halló que muestras de un tipo de acero comercial que fueron sumergidas durante un periodo de 18 meses en un sitio localizado en aguas frías en la costa oeste de Escocia, presentaron una colonización principalmente de cirripedios y bivalvos, determinando que el desarrollo de estos organismos tuvo un efecto poco significativo en las tasas de corrosión del acero evaluado. Más aún, se determinó que estos organismos indujeron un tipo de corrosión “localizada”²¹ que se presentó bajo la cobertura de los cirripedios vivos.

Otros estudios también coinciden en que la distribución espacial de las formas biológicas, además de sus mecanismos específicos de adhesión y su metabolismo, afectan el proceso de corrosión. Por ejemplo, en un estudio realizado en el Mar Caspio sobre una tubería industrial de acero, se determinó que existe una correlación entre las diferentes zonas de corrosión determinadas sobre la superficie de la tubería y la biota sésil que colonizó esta estructura. Las

²¹ La corrosión electroquímica puede ser dividida en generalizada y localizada. La corrosión generalizada involucra la pérdida de metal de manera homogénea sobre toda la superficie, en cambio, la corrosión localizada involucra la disolución del metal en áreas muy específicas de la superficie. La corrosión localizada puede ser clasificada como corrosión por picaduras, en hendiduras, por agrietamiento, por esfuerzo, etc. (Arano, *op. cit.*).

áreas en donde fueron dominantes por superficie las algas, presentaron una corrosión bastante severa. Por otro lado, las zonas de colonización de bivalvos presentaron áreas localizadas de corrosión debajo de estos organismos, mientras que en zonas donde la cobertura fue más densa y se encontró dominada por bivalvos e hidrozoarios, los puntos localizados de corrosión fueron más pequeños (Railkin, *op. cit.*).

De lo anterior, llama la atención que los organismos dominantes que colonizaron los aceros comerciales en estas localidades, tanto en aguas tropicales como en aguas frías, fueron principalmente algas, cirripedios y bivalvos, cuya cobertura tuvo un efecto poco significativo sobre las tasas de corrosión de estos materiales. Mientras que en este caso los organismos dominantes por superficie en los colectores de hierro expuestos durante 10 y 15 meses de inmersión, fueron organismos de formas costrosas, principalmente briozoarios Cheilostomados que forman esqueletos calcificados que cubren de manera uniforme el sustrato, por lo que su cobertura tuvo un efecto más significativo en las tasas de corrosión del hierro en esta área marina de la costa de Campeche.

Sobre las diferencias de magnitud de las velocidades de corrosión del hierro evaluadas mediante las técnicas de Polarización Potenciodinámica y Pérdida de Peso

La velocidad de corrosión de las probetas de hierro, evaluada por la técnica gravimétrica de pérdida de peso, mostró valores del orden de magnitud de 10^{-1} , que van de 0.630mm año^{-1} a 0.920mm año^{-1} en los primeros 5 y 10 meses de exposición en el mar. Posteriormente se observó una disminución en la velocidad de corrosión, cuyo valor fue de 0.660mm año^{-1} en las probetas que estuvieron expuestas por un periodo de 15 meses, aunque dentro del mismo orden de magnitud de 10^{-1} .

En cuanto a la velocidad de corrosión de los discos colectores de hierro, evaluada mediante la técnica electroquímica de Polarización Potenciodinámica, decreció de 4.690mm año^{-1} (determinada en el colector testigo) a 1.200mm año^{-1} (determinada para los discos colectores que estuvieron inmersos por 15 meses). Estos valores claramente se encuentran un orden de magnitud por arriba de los determinados a partir de gravimetría. No obstante, ambas técnicas mostraron una tendencia en la que la velocidad de corrosión del hierro decreció a lo largo del periodo de exposición en el mar (Figs. 21 y 23).

Las diferencias mencionadas anteriormente se explican en parte debido a las propias particularidades metodológicas de cada una de las pruebas, ya que la técnica gravimétrica se basa en la evaluación de la pérdida de peso por efecto del proceso de corrosión, mientras que la técnica de Polarización Potenciodinámica se basa en la aplicación de una corriente directa para polarizar el sistema, tomando como referencia el potencial de corrosión (E_{corr}). Esto último genera un sobrepotencial a la superficie metálica a analizar, que en este caso funciona como el electrodo de trabajo en la celda electroquímica que conforma el sistema. El resultado de la aplicación de este sobrepotencial al sistema, es la obtención de una respuesta en corriente, la cual depende del área analizada, por lo cual las mediciones se expresan como densidad de corriente (mA cm^{-2}). En este sentido, Gu, et al. (2009), mediante ensayos realizados con la técnica de polarización potenciodinámica, ha visto que la formación de capas alcalinas de diferentes espesores, morfologías, estructuras y composiciones químicas sobre la superficie de ciertas aleaciones metálicas, produce un efecto que incrementa la magnitud de los valores de velocidad de corrosión medidos. Mientras que si la capa formada, es muy homogénea y uniforme, la magnitud de la velocidad de corrosión evaluada disminuye. Un efecto similar puede estar ocurriendo en este caso debido al desarrollo de los macroorganismos sobre la superficie del hierro, donde la estructura vertical de la comunidad, las diferentes formas biológicas de los organismos y su cobertura, pudieron haber producido un efecto de área, en donde los diferentes espesores y morfologías en la

superficie del hierro, incrementaron la magnitud de las tasas de corrosión evaluadas.

No obstante, evaluaciones realizadas con la técnica de Polarización Potenciodinámica sobre la corrosión de muestras de un tipo de acero comercial que fueron sumergidas en aguas tropicales de la costa de Mandapam en la India, mostraron que la velocidad de corrosión fue de 1.4780mm año^{-1} en muestras que permanecieron sumergidas por un periodo de 3 meses, mientras que ésta disminuyó a 0.7958mm año^{-1} en muestras que permanecieron sumergidas por 6 meses (Palraj, *op. cit.*). De lo anterior, sobresale que la velocidad de corrosión evaluada decreció en un orden de magnitud.

Por otra parte, no existe gran cantidad de datos publicados sobre la evaluación de las velocidades de corrosión de artefactos arqueológicos de hierro en sitios de naufragio contra los que se pueda comparar. Aunque, McLeod, (2002), ha realizado algunas estimaciones de la velocidad de corrosión de artefactos arqueológicos en diversos sitios en Australia. Por ejemplo, algunos datos publicados indican que la tasa de corrosión promedio de determinados artefactos de hierro como cañones procedentes del sitio *James Mathews* hundido en 1841, el cual yace en una región tropical de la costa oeste de Australia, fue de 0.460mm año^{-1} y 0.890mm año^{-1} . Estas estimaciones se basaron en una técnica de medición directa, que analiza la microestructura de la capa de concreción de dichos artefactos, en el supuesto de que el hierro fundido dado el alto contenido de carbono que presenta deja tras de sí una capa de grafito, cementita y perlita; de los cuales el grafito permanece inalterado, logrando con ello estimar el espesor original del metal a partir del cual se obtiene la tasa de corrosión promedio anual. Lo anterior se hace mediante la simple relación entre el espesor estimado y los años que permaneció o ha permanecido sumergido el artefacto. Para ello, es evidente que se tiene que tener la fecha precisa del naufragio.

Como se puede apreciar, el método empleado por McLeod, *op. cit.* para la estimación de la velocidad de corrosión de artefactos arqueológicos es completamente distinto de los métodos empleados en el presente estudio, no obstante, destaca que los valores de corrosión de estos artefactos de hierro son semejantes y se encuentran en el mismo orden de magnitud que la velocidad de corrosión determinada mediante la evaluación gravimétrica de las probetas de hierro, a pesar de que el periodo de exposición de los artefactos arqueológicos en el caso del *James Mathews* fue de 150 años, respecto del periodo de exposición de las probetas de hierro que fue de 1.25 años (15 meses).

Así mismo, otros datos publicados muestran que la tasa de corrosión estimada para el casco de la embarcación *HMVS Cerberus*, hundido en 1926 como rompeolas en la bahía de Port Phillip en una región templada en Australia, fue de 0.242mm año^{-1} (McLeod, *op. cit.*). Otras estimaciones revelan que la velocidad de corrosión del casco del *USS Arizona*, hundido en 1941 en la bahía de Pearl Harbor Hawaii en una región de latitud tropical, va de 0.075mm año^{-1} a 0.040mm año^{-1} en profundidades entre 1.5m y 10m respectivamente (Russel et al. 2006). Como se observa existen diferencias importantes entre las tasas de corrosión de los vestigios arqueológicos analizados en ambos sitios. Lo anterior obedece a diversas razones. En primer lugar el casco de la embarcación *HMVS Cerberus* se encuentra en aguas de latitud templada, mientras que el *USS Arizona* yace en aguas cálidas tropicales. En segundo lugar, el casco del *HMVS Cerberus* yace en una zona intermareal parcialmente sumergido, mientras que el *USS Arizona* se encuentra totalmente sumergido. En tercer lugar, de acuerdo con la información publicada de estos sitios se aprecia que existe una diferencia en la composición del acero empleado en la construcción de los cascos de estas embarcaciones. Por ejemplo, el acero empleado en el casco del *USS Arizona* es un tipo de acero al bajo carbono. Adicionalmente, es muy probable que la comunidad biológica que colonizó la superficie del casco del *USS Arizona* haya tenido un efecto más significativo sobre el proceso de corrosión de la embarcación, ya que se ha determinado que la cobertura biológica sobre el

casco de la embarcación hundida es de alrededor del 99%, donde briozoarios y esponjas son grupos dominantes por superficie. Como hemos visto por los resultados obtenidos en el presente estudio, en aguas tropicales el efecto de la cobertura biológica y las formas de vida de los organismos tienen un efecto importante en el proceso de deterioro de los vestigios metálicos ferrosos al funcionar como una barrera física que afecta la cinética del proceso de corrosión.

Finalmente, los datos referidos ofrecen un buen parámetro de la confiabilidad de los resultados obtenidos en el presente estudio, aunque también indican que se requiere establecer técnicas más precisas y sencillas para la evaluación del proceso de corrosión de artefactos arqueológicos, así como un sistema de monitoreo a largo plazo de los factores biológicos y/o ambientales que lo afectan en diferentes zonas geográficas.

EL PROCESO DE COLONIZACIÓN BIOLÓGICA EN LA FORMACIÓN DE LA CONCRECIÓN Y SU EFECTO SOBRE EL PROCESO DE CORROSIÓN DE VESTIGIOS ARQUEOLÓGICOS DE NATURALEZA FERROSA

Al analizar algunas concreciones formadas en artefactos arqueológicos de hierro que permanecieron sumergidos en el ambiente marino entre 100 y 200 años, se puede observar en buena parte su proceso de formación. El análisis microscópico de cortes transversales de estas concreciones muestra que el desarrollo de las comunidades marinas (conformadas por organismos de vida sésil) sobre la superficie de dichos artefactos es de gran importancia en el proceso de formación de la concreción. El tipo de concreción que se forma en artefactos ferrosos cuya superficie se encuentra expuesta a las condiciones del medio acuático circundante es el resultado de la acción de cuatro procesos biológicos: la colonización y sucesión biológica principalmente de organismos que forman estructuras de carbonato de calcio (CaCO_3), la estratificación vertical de la comunidad y la acumulación de biomasa en la superficie de los artefactos. Así mismo, la serie de cambios químicos que ocurren en la capa biológica como consecuencia de la difusión de iones y productos de corrosión a través de ésta (North y MacLeod, *op. cit.*), terminan de conformar y consolidar dicha concreción tal como es posible apreciar en la Figura 27.



Figura 27.-Sección transversal de la concreción de una bala de cañón procedente del sitio arqueológico "Don Pancho" en la Sonda de Campeche. Nótese la difusión de los productos de corrosión desde la región interna hacia la región externa de la concreción a través de los restos de organismos de formas costrosas y que forman tubos calcáreos. Fotografía cortesía de la Subdirección de Arqueología Subacuática del INAH.

De manera general se ha considerado que en el largo plazo la concreción formada en artefactos de hierro es poco porosa²², además de que conforma una barrera física que afecta significativamente la cinética del proceso de corrosión al retardar el intercambio de especies químicas que participan en las reacciones de corrosión. Esto se basa en la determinación de las tasas de corrosión que han sido realizadas en algunos artefactos de hierro procedentes de sitios de naufragio, empleando la técnica de medición directa desarrollada por McLeod que fue mencionada anteriormente.

La tasa de corrosión (mm año^{-1}) estimada mediante esta técnica proporciona una medida promedio del deterioro por corrosión que han sufrido los artefactos arqueológicos en el largo plazo durante su periodo de hundimiento, lo

²² Aunque en realidad no existe ningún estudio en donde se haya evaluado la porosidad de la concreción.

cual es muy importante. Sin embargo, mediante esta técnica se puede saber muy poco sobre la cinética del proceso de corrosión de estos vestigios en sus etapas iniciales, así como en el mediano plazo. En este sentido, no es posible conocer la cinética del proceso de deterioro de los vestigios metálicos a lo largo del tiempo. Por ejemplo, no es posible saber en que punto en el tiempo la velocidad de corrosión disminuyó de manera significativa y si se ha mantenido de manera más o menos constante, o si cambios en la estructura de las comunidades que se asientan sobre la superficie de los vestigios o disturbios ambientales, afectan de manera considerable la corrosión de los vestigios.

No obstante, con la información generada de manera experimental en el presente estudio, se puede establecer que en las etapas iniciales del deterioro del hierro en esta área, en un periodo de tiempo relativamente corto, el incremento natural de la cobertura biológica y la dominancia de organismos de crecimiento costroso (principalmente aquellos que forman esqueletos de carbonato de calcio), conformaron una barrera física bastante uniforme y poco porosa que afectó el intercambio de especies químicas que participan en el proceso de corrosión. Disminuyendo de manera considerable la velocidad de corrosión en este periodo de tiempo relativamente corto.

COLONIZACIÓN BIOLÓGICA DEL BRONCE Y SU PROCESO DE CORROSIÓN

Desarrollo de la biota sésil sobre la superficie de los discos colectores de bronce

En un sitio de naufragio es común encontrar que la superficie de los vestigios de bronce que yacen expuestos a las condiciones del medio acuático circundante ha sido escasamente colonizada por invertebrados marinos de vida sésil. Por lo anterior, las concreciones que presentan son por lo general bastante insignificantes en comparación con las concreciones formadas en vestigios de naturaleza ferrosa. No obstante, por observaciones realizadas en diversos sitios de naufragio tanto en México como en otras partes del mundo, se ha visto que algunos vestigios pueden llegar a presentar una colonización biológica abundante y formar concreciones relativamente considerables. Por ejemplo, en la costa de Campeche y en sus arrecifes que se localizan a varios kilómetros de distancia de la costa yacen una gran cantidad de vestigios arqueológicos de naturaleza metálica, tales como cañones o propelas de bronce pertenecientes a embarcaciones hundidas. Algunos de estos vestigios han sido hallados con una abundante colonización de diversas clases de organismos como esponjas, algas, briozoarios e incluso corales (Fig. 28).



Figura 28.- Izquierda: cara de succión de una propela de bronce perteneciente a los restos de una embarcación hundida en el sitio arqueológico "Fipesco", localizado en la Sonda de Campeche. Derecha: cara de presión de dicha propela de bronce. Nótese la abundante colonización biológica de esponjas, briozoarios e incluso de corales blandos. Fotografía cortesía de la Subdirección de Arqueología Subacuática del INAH.

La experimentación con los colectores de bronce empleados en el presente estudio permitió caracterizar en general la biota sésil que se asentó en la superficie de éstos, la cual estuvo integrada por un número reducido de especies que se distribuyeron en cinco Phylum, que son: Plantae, Bryozoa, Annelida, Mollusca y Arthropoda. Fue notoria la ausencia de organismos del Phylum Porifera.

Al igual que en el caso del hierro, el análisis de la riqueza y composición de especies de los colectores de bronce sugiere que existió una colonización específica de ciertos taxa y una preferencia por alguna de las caras de los colectores de bronce. A pesar de lo anterior, los análisis de redundancia aplicados a los datos de abundancia (dominancia por superficie) de la biota sésil que colonizó ambas superficies de los colectores de bronce en los diferentes periodos de inmersión, no mostraron una asociación clara de alguna de las especies identificadas con este material (Figs. 24-26).

Por otra parte, de acuerdo con los datos obtenidos, a lo largo del tiempo la estructura de la comunidad que se asentó en los colectores de bronce que

fueron colonizados presentó cambios estacionales, evidenciados principalmente en la composición y abundancia de especies. Por ejemplo, se observó la incorporación o eliminación de algunas especies de algas, briozoarios, anélido y una especie de bivalvo durante los periodos de exposición de los colectores. Así mismo, fue evidente que la cara superior e inferior de los colectores presentó durante todos los periodos de exposición una dominancia por superficie de los bivalvos *Ostrea permollis* y *Crassostrea virginica*. Los datos también mostraron diferencias en la diversidad, equidad y dominancia de la biota sésil que colonizó la cara superior e inferior de los colectores de bronce a lo largo del tiempo. En la cara superior la diversidad y equidad mostraron una tendencia de aumento y la dominancia, una tendencia de disminución. Mientras que en la cara inferior de los colectores estas variables presentaron una tendencia inversa en donde la diversidad y equidad disminuyeron, con el consecuente aumento en la dominancia.

No obstante, fue notorio que sólo algunos de los discos colectores de bronce recolectados a los 5 y 10 meses de exposición fueron colonizados, mientras que ninguno de los discos colectores de bronce recolectados a los 15 meses presentó colonización biológica alguna. Lo anterior difiere de lo observado en el hierro, donde todos los discos colectores sin excepción fueron colonizados. Así mismo, el grado de cobertura de la biota sésil sobre la superficie de aquellos colectores de bronce colonizados, fue evidentemente menor con respecto a la del hierro.

Lo anterior llama la atención, aunque desde tiempos históricos se ha tenido conocimiento del efecto biocida que presenta el bronce. Como se mencionó anteriormente, el bronce se colocaba a manera de placas que cubrían los cascos de madera de embarcaciones antiguas con el fin de evitar la incrustación de organismos marinos, así como la acción de los organismos perforadores de madera. Inclusive hoy en día el bronce se continúa empleando

en estructuras industriales que requieren estar en su mayor parte libres de incrustaciones marinas.

Diversos autores como North y MacLeod, *op. cit.*, quienes han estudiado también el deterioro de artefactos arqueológicos de bronce en sitios de naufragio, señalan que la actividad de los productos de corrosión del bronce, especialmente los derivados del cobre (Cu_2O , CuO , CuS) son tóxicos para los organismos. No obstante, debido a la actividad química de la forma iónica del cobre (Cu^{2+}), la liberación de esta especie química al medio acuático circundante puede ser tóxica también para las larvas de los organismos. En este sentido, se sabe que para proteger estructuras industriales contra la colonización de macroorganismos marinos, se requiere de sustancias repelentes o biocidas que continuamente sean liberadas en la superficie de dichas estructuras, así como al medio acuático circundante. Sin embargo, al igual que lo observado en artefactos arqueológicos de bronce, también se ha visto que superficies de objetos industriales protegidos con cubiertas biocidas o repelentes con base en cobre son colonizados a pesar de todos los esfuerzos por macroorganismos de vida sésil.

Al respecto, diversos estudios sugieren que las larvas de los organismos poseen un cierto límite de sensibilidad a sustancias químicas (Burke, 1983; Morse, 1990; Pawlik, 1992; Slattery, 1997; Rittschof et al., 1998 *apud* Railkin, *op. cit.*). Por tal razón, se realizó un análisis de espectroscopia por dispersión de energía de rayos X característicos (EDS) a algunos de los colectores de bronce que fueron colonizados. Lo anterior, con el fin de establecer si existían diferencias en su composición química elemental (%-peso), principalmente en la cantidad de cobre presente en la aleación, con respecto de aquellos colectores de bronce que no fueron colonizados.

Como se puede apreciar en la Tabla 12, los datos muestran que no existió una diferencia significativa entre la composición de los colectores de bronce

colonizados y no colonizados. Por lo que no se puede atribuir la colonización de los colectores de bronce a diferencias en la composición química de los materiales.

Tabla 12 Análisis químico de materiales experimentales de bronce colonizados y no colonizados (Peso-%)

MATERIAL	Cu	Sn	Zn	Pb	Fe	Ag	Sb	As	Ni	Si	Mn	C	O
Bronce colonizado	66.22	2.82	23.14	0.91	ND	0.45	0.62	0.76	0.30	0.43	0.6	3.75	ND
σ	± 1.34	± 1.35	± 0.91	± 0.55		± 0.37	± 0.43	± 0.48	± 0.27	± 0.19	± 0.21	± 1.14	
Bronce no colonizado	67.80	0.65	22.76	0.77	1.69	ND	ND	0.60	0.60	1.57	ND	2.71	0.85
σ	± 1.21	± 0.34	± 0.85	± 0.57	± 0.24			± 0.45	± 0.26	± 0.22		± 1.08	± 0.46

ND = No determinado

Sin embargo, es poco conocido el efecto sobre el proceso de colonización biológica que pueden tener las variaciones en la cantidad de cobre presente en la aleación que conforma al bronce. Este tema es relevante, pues como se señaló anteriormente la metalurgia de los artefactos arqueológicos era poco precisa en la antigüedad, debido a que su fundición se realizaba a través de métodos empíricos basados en la observación y en la práctica.

Otros procesos relacionados con la colonización del bronce, a pesar del efecto biocida que éste presenta, pueden estar asociados con los mecanismos de asentamiento de las larvas. Por ejemplo, se sabe que diversas clases de invertebrados marinos poseen sistemas de sensoramiento que emplean en la selección del sustrato. Algunas larvas poseen quimiorreceptores y mecanorreceptores situados en la región anterior, ventral y posterior del cuerpo (Railkin, *op. cit.*). Con estos sistemas de sensoramiento las larvas pueden explorar el sustrato y evaluar su asentamiento final. Sin embargo, no todas las larvas encuentran y/o se asientan en las mejores condiciones. Algunas pueden permanecer un largo periodo de tiempo como integrantes del plancton, por lo que pierden posibilidades en la selectividad del sustrato y una parte de ellas

pueden asentarse en determinados sustratos o superficies que no necesariamente ofrecen las mejores condiciones o incluso, pueden asentarse en sustratos que liberan sustancias tóxicas en su superficie y al medio acuático circundante.

Por otro lado también se conoce que algunos organismos como algas verdes, cirripedios y algunas clases de bivalvos presentan cierta resistencia a sustratos con efectos biocidas. Lo anterior concuerda con lo observado en el presente estudio, donde especies como *Ostrea permollis*, *Crassostrea virginica* o *Labioporella sinuosa* colonizaron y fueron relativamente abundantes en las superficies de los discos colectores de bronce, tal vez debido a su resistencia a los productos de corrosión de éste.

Adicionalmente se ha visto que algunos organismos gregarios o de formas costrosas que producen estructuras calcáreas y que en determinado momento logran resistir los efectos tóxicos de ciertos sustratos, como en este caso del bronce, pueden producir condiciones favorables para el asentamiento de otros organismos, debido a que ellos mismos proporcionan una superficie nueva y no tóxica factible de ser colonizada. Por ejemplo, las larvas de algunas especies de cirripedios llegan a asentarse en sustratos tóxicos, completando su etapa de fijación e incluso de metamorfosis. Aunque después estos organismos llegan a morir, su concha forma una capa neutra que crea condiciones favorables para el asentamiento y desarrollo de otros cirripedios. Los mismos procesos pueden estar operando en la colonización biológica de vestigios arqueológicos de bronce.

El desarrollo de “biofilms” (microorganismos), generalmente presentes en la superficie de sustratos artificiales y que se sabe pueden inducir el asentamiento de macroorganismos marinos de vida sésil, también pueden inducir el asentamiento y la colonización de macroorganismos en sustratos tóxicos. Algunas investigaciones sugieren que los “biofilms” bacterianos

desarrollados sobre superficies de materiales tóxicos como pinturas biocidas o repelentes, además de formar una barrera física que disminuye la acción tóxica de las sustancias químicas, también pueden llegar a utilizar dichas sustancias como fuente de alimento (Railkin, *op. cit.*).

Los procesos bióticos mencionados anteriormente representan mecanismos mediante los cuales la superficie de artefactos arqueológicos de bronce puede llegar a ser colonizada de manera abundante por macroorganismos de vida sésil. No obstante, la acción de ciertos procesos abióticos también puede facilitar la colonización de estos vestigios arqueológicos. Por ejemplo, en el presente estudio se observó que algunos de los discos colectores de bronce que fueron colonizados presentaron en la cara superior una fina capa de color blanquecino (Fig. 29). Una prueba con ácido clorhídrico demostró que esta capa estaba conformada de carbonato de calcio. Lo anterior sugiere que este carbonato de calcio pudo haber sido depositado en la superficie de los colectores de bronce mediante un proceso de precipitación.

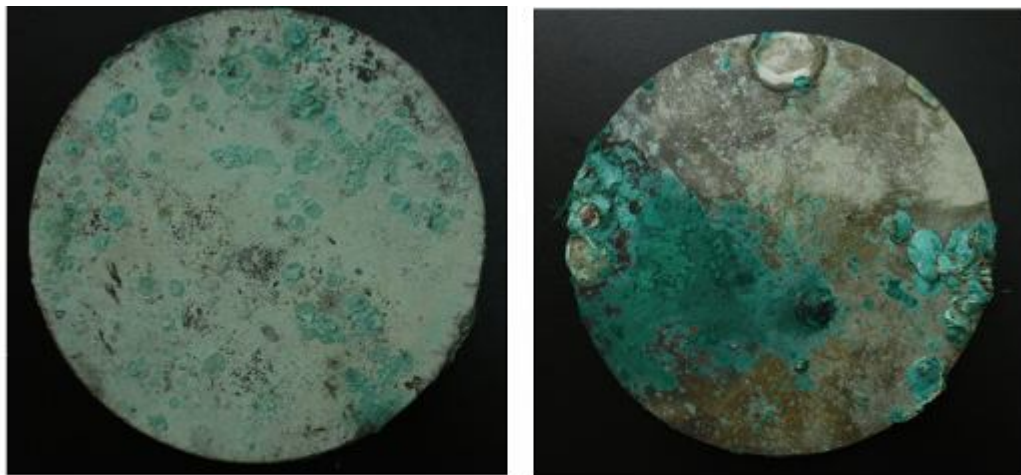
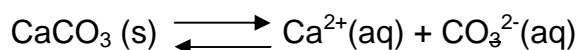


Figura 29.- Izquierda: cara superior del colector de bronce 2D1Brass de 5 meses de inmersión colonizado por macroorganismos de vida sésil. Derecha: Cara inferior de dicho colector. Nótese la fina capa de CaCO_3 depositada principalmente en la cara superior.

La cantidad de carbonato de calcio que se puede disolver en el agua de mar está controlada por procesos termodinámicos. De acuerdo con la reacción expresada a continuación, en el equilibrio la tasa de disolución y precipitación es la misma.



No obstante, la distribución vertical del carbonato de calcio en el océano Atlántico, que ha sido evaluada mediante el grado de saturación de calcita, indica que en profundidades muy someras este compuesto se encuentra supersaturado (>100%). Lo anterior podría propiciar que ligeros incrementos en el pH del agua de mar (≈ 8) desplacen el equilibrio de la reacción hacia el lado izquierdo, produciendo la precipitación de cristales de carbonato de calcio.

En este sentido, durante la época de “nortes” que se presenta de manera estacional en el área de estudio se registraron en el sitio ARQBIO-1 donde fueron sumergidos los materiales experimentales, valores de pH de 8.16 en superficie y 8.14 en fondo. Bajo estas condiciones el carbonato de calcio observado en la superficie de los colectores de bronce se pudo haber depositado por precipitación.

El análisis microscópico realizado sobre la superficie de los discos colectores de bronce colonizados, evidenció que está capa de carbonato de calcio facilitó la colonización de macroorganismos de vida sésil como moluscos y briozoarios, al conformar una barrera física que disminuyó el efecto tóxico del cobre presente en la aleación (Fig. 30).

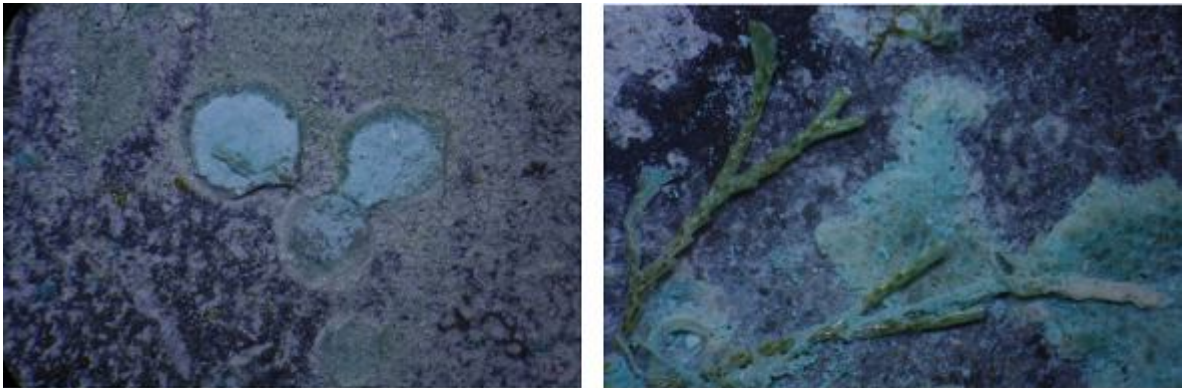


Figura 30.- Izquierda: Individuos de *Ostrea permollis* que se asentaron en la cara superior de un colector de bronce. Derecha: Colonias de los briozoarios *Bugula neritina* (ramificado) y *Labioporella sinuosa* (Incrustante) que colonizaron la cara superior de un colector de bronce. Nótese como los organismos se asentaron preferentemente sobre la fina capa de CaCO_3 .

Estudios microscópicos de la morfología de algunas concreciones formadas en artefactos arqueológicos de bronce, han mostrado que éstas presentan incorporaciones de carbonato de calcio inorgánico en forma de cristales de calcita, así como restos calcáreos de organismos como foraminíferos y moluscos. (North y MacLeod, *op. cit.*). Estos datos publicados apoyan las observaciones realizadas de manera experimental en los discos colectores, así como el posible efecto de este proceso en la colonización de vestigios arqueológicos de bronce.

La biota sésil y su efecto sobre el proceso de corrosión del bronce

En cuanto a la degradación por corrosión de las muestras experimentales de bronce, aunque ésta resultó ser de menor magnitud respecto de la degradación que sufre el hierro, los datos de corrosión muestran una tendencia ligeramente variable que se incrementó a lo largo del tiempo, destacando que los datos de corrosión evaluados por ambas técnicas se encuentran dentro del mismo orden de magnitud. La comparación entre los datos de corrosión y los

datos biológicos, no mostró ningún efecto de la biota sésil sobre la cinética del proceso de corrosión. De tal manera que la cobertura poco densa de la biota sésil, así como las formas biológicas dominantes representadas por organismos gregarios como los bivalvos de posición postrada, conformaron una cobertura espacial heterogénea que no tuvo ningún efecto significativo sobre el proceso de corrosión.

CAPÍTULO 9

MODELO EXPERIMENTAL DE LAS PRIMERAS ETAPAS DE TRANSFORMACIÓN Y DEGRADACIÓN DEL HIERRO Y EL BRONCE BAJO CONDICIONES DE TOTAL EXPOSICIÓN EN LOS FONDOS MARINOS DE CAMPECHE

“En aquellos lugares, a tres o cuatro brazas de agua entre los arrecifes de Pacú y de Vanú, yacían anclas, cañones, lingotes de hierro y de plomo incrustados en las concreciones calizas.....”.

Julio Verne

Veinte mil leguas de viaje submarino

A partir de las variables evaluadas y los datos experimentales obtenidos en el presente estudio fue posible establecer los modelos de degradación y transformación del hierro y el bronce que se muestran a continuación. La exposición total de los materiales experimentales en los fondos marinos frente a la ciudad y puerto de Campeche, bajo las mismas condiciones biológicas y ambientales en donde yacen una gran cantidad de vestigios arqueológicos de la misma naturaleza, evidenciaron los procesos iniciales de colonización biológica y de corrosión que afectaron a cada uno de estos materiales. Los resultados mostraron el efecto de estos procesos inmediatamente después de que los materiales fueron sumergidos y depositados en el lecho marino, así como durante su periodo de inmersión por aproximadamente un año y medio.

Como se muestra en la Figura 31, el modelo general de deterioro y transformación elaborado para el hierro a partir de los datos experimentales, indica la tasa de corrosión inicial del metal recién expuesto al medio marino, así como su comportamiento electroquímico, en donde destaca que la velocidad del

proceso de corrosión en esta etapa inicial estuvo controlada por la transferencia de la carga que se da en la reacción anódica.

Posteriormente, con base en el conocimiento sobre la sucesión de especies en sustratos artificiales de reciente exposición, el modelo plantea de manera general la etapa de colonización de microorganismos en la superficie de los discos colectores de hierro. Enseguida, éste muestra que a los 5 meses de haber expuesto los colectores al ambiente marino, se encontró una comunidad bien establecida de macroorganismos de vida sésil. Aunque para este periodo los organismos sólo habían colonizado en promedio el 50% del sustrato disponible. En general, durante este periodo un grupo reducido de especies colonizó el hierro²³, presentándose la dominancia de bivalvos que monopolizaron la superficie de ambas caras de los colectores. En cuanto al deterioro del hierro durante este periodo, si bien se observó que para los 5 meses de exposición hubo una disminución en su tasa de corrosión, la cobertura de estos organismos gregarios conformó una barrera física heterogénea que no tuvo un efecto significativo sobre la cinética del proceso de corrosión (Fig. 31).

Por otro lado, los materiales experimentales de hierro que fueron recolectados a los 10 meses de exposición mostraron en general un incremento significativo en la cobertura biológica, por lo que la comunidad de macroorganismos de vida sésil para este periodo colonizó un 90% del sustrato disponible. Así mismo, el cambio estacional en la estructura de la comunidad que se asentó en la superficie de los colectores para este periodo, mostró un incremento general en la abundancia y dominancia de los organismos de formas costrosas, principalmente de briozoarios y esponjas de formas costrosas, que mostraron una asociación con la cara superior de los colectores. En comparación, la cara inferior de los colectores de hierro continuó siendo dominada por los bivalvos, los cuales mostraron una asociación con esta

²³ En general el número de especies y la diversidad de la biota sésil que colonizó ambas caras fue reducida a lo largo de todo el periodo de inmersión de los colectores.

superficie. Para este periodo, el mayor grado de cobertura de la biota sésil y la dominancia de organismos de crecimiento costroso conformaron una barrera física más homogénea y de menor porosidad que afectó la cinética del proceso, reduciendo la tasa de corrosión de los materiales experimentales (Fig. 31).

Finalmente, los discos colectores recuperados a los 15 meses de inmersión, mostraron un nuevo aumento en la cobertura de la biota sésil, siendo ésta casi del 100%. Para este periodo fue evidente que los organismos de crecimiento costroso, mayormente los briozoarios, dominaron la superficie de los colectores, lo cual terminó por conformar una barrera física más homogénea y menos porosa respecto de lo observado en los colectores de 10 meses de exposición. A pesar de lo anterior, en la cara inferior de los colectores de 15 meses de exposición persistió la dominancia de los bivalvos. No obstante, para este periodo la barrera constituida principalmente por los esqueletos calcáreos de briozoarios de formas costrosas tuvo un efecto más significativo sobre la cinética del proceso de corrosión, lo cual produjo una disminución evidente en las velocidades de corrosión de los discos colectores de hierro (Fig. 31).

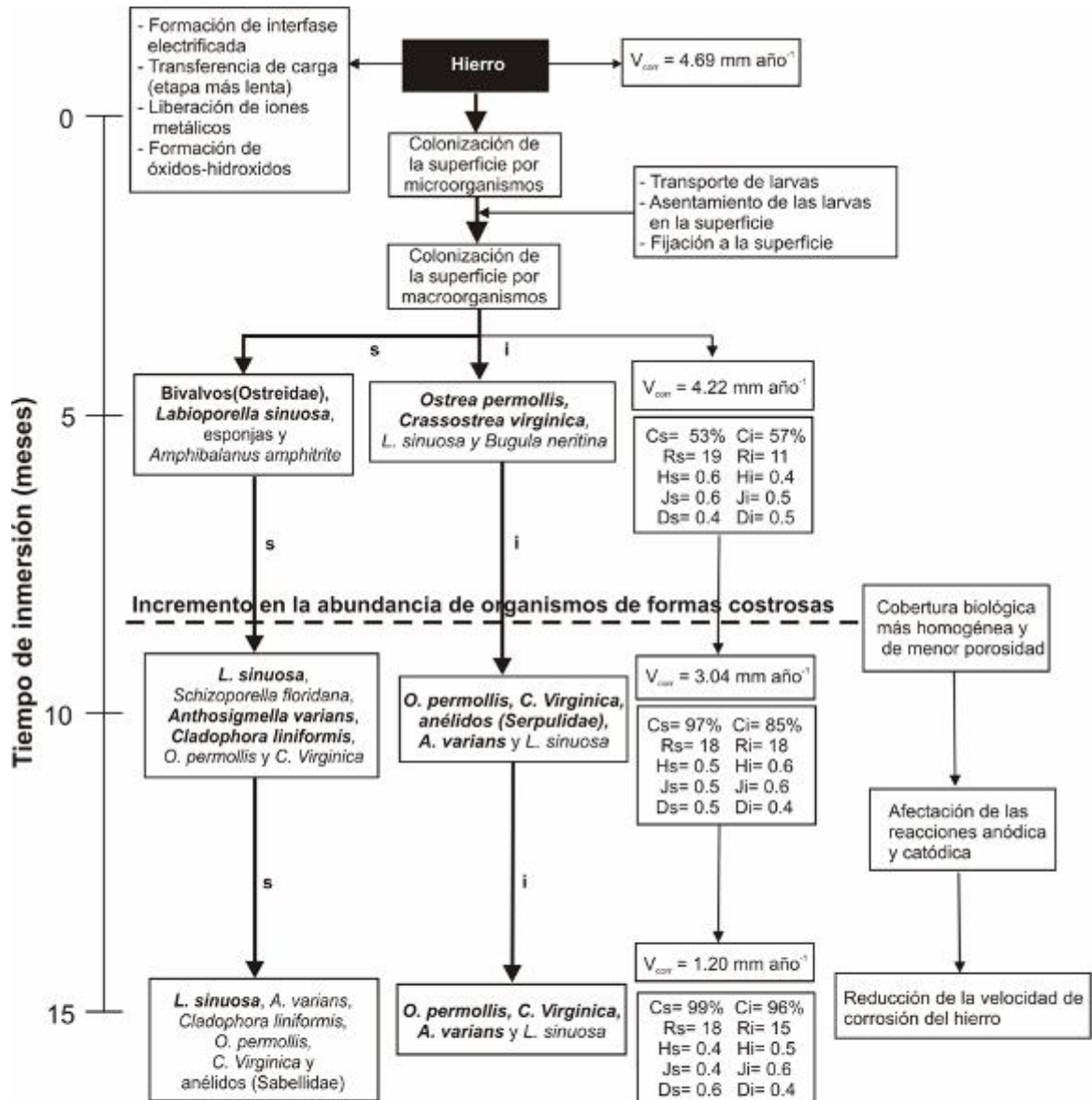


Figura 31.- Esquema general del deterioro y la transformación de los materiales experimentales de hierro a lo largo del tiempo por efecto de los procesos de corrosión y de colonización biológica de macroorganismos de vida sésil (s=cara superior de los discos colectores, i=cara inferior de los discos colectores, V_{cor} = velocidad de corrosión estimada a partir de las pruebas electroquímicas, C=cobertura de discos colectores, R=riqueza de especies, H=diversidad biológica, J=equidad y D=dominancia). Las especies mostradas en el esquema fueron las más abundantes en el periodo de inmersión, no obstante, aquellas que aparecen en letras negritas presentaron una abundancia evaluada por el grado de cobertura sobre el sustrato $\geq 10\%$.

Por otra parte, el modelo de deterioro y transformación del bronce planteado en la Figura 32, muestra los principales procesos químicos que ocurrieron en la superficie de este sustrato durante sus etapas iniciales de exposición a las condiciones marinas. En éste se observa que la difusión del oxígeno hacia la superficie del bronce controló la velocidad de corrosión al ser la etapa más lenta en todo el proceso. La afirmación anterior tiene como fundamento la evaluación del comportamiento electroquímico del bronce que se realizó durante las pruebas de polarización potenciodinámica.

Posteriormente en el modelo ilustrado en la misma Figura 32 se muestra la etapa de colonización de los microorganismos, que como ya se mencionó anteriormente, casi siempre están presentes en la superficie de sustratos artificiales, incluso de aquellos que liberan sustancias tóxicas para los macroorganismos. Debido al carbonato de calcio depositado en la superficie de algunos de los colectores de bronce colonizados, el modelo también señala el posible efecto de la precipitación de este compuesto sobre el proceso de colonización biológica del bronce. Es decir, la deposición de carbonato de calcio inorgánico ocurrido probablemente por precipitación (debido a cambios de pH en el medio acuático), permitió el asentamiento y la fijación de las larvas de los organismos al cambiar las condiciones en la superficie de los colectores y disminuir el efecto biocida del bronce. No obstante la ausencia de colonización biológica en la gran mayoría de los colectores fue la generalidad.

En este sentido, el número de especies que pudo colonizar la superficie de los colectores de bronce fue bastante reducido. El grado de cobertura que éstos presentaron fue en promedio de 30%, mucho menor que en el hierro. Aunque, en este caso la mayoría de la superficie colonizada estuvo monopolizada por bivalvos. Es decir, tanto la cara superior como inferior de los colectores de bronce que fueron colonizados estuvo dominada por bivalvos de posición postrada (Fig. 32).

La evaluación del deterioro del bronce mostró que las velocidades de corrosión de este material fueron relativamente variables a lo largo del tiempo, pero mantuvieron una tendencia constante y no mostraron disminución alguna. En este sentido, el menor grado de cobertura de la biota sésil sobre la superficie de los colectores y la dominancia de organismos gregarios como los bivalvos, que ofrecen una cobertura espacial heterogénea, no tuvieron ningún efecto en la cinética del proceso de corrosión. Esto indicó que la velocidad de corrosión del bronce, tanto de aquellos colectores colonizados como de aquellos que no lo fueron, continuó siendo controlada durante todo el periodo de exposición de los materiales por la difusión del oxígeno hacia la superficie del bronce, tal y como ocurrió en el colector testigo. A pesar de lo anterior, la tasa de corrosión del bronce fue menor que la del hierro (Fig. 32).

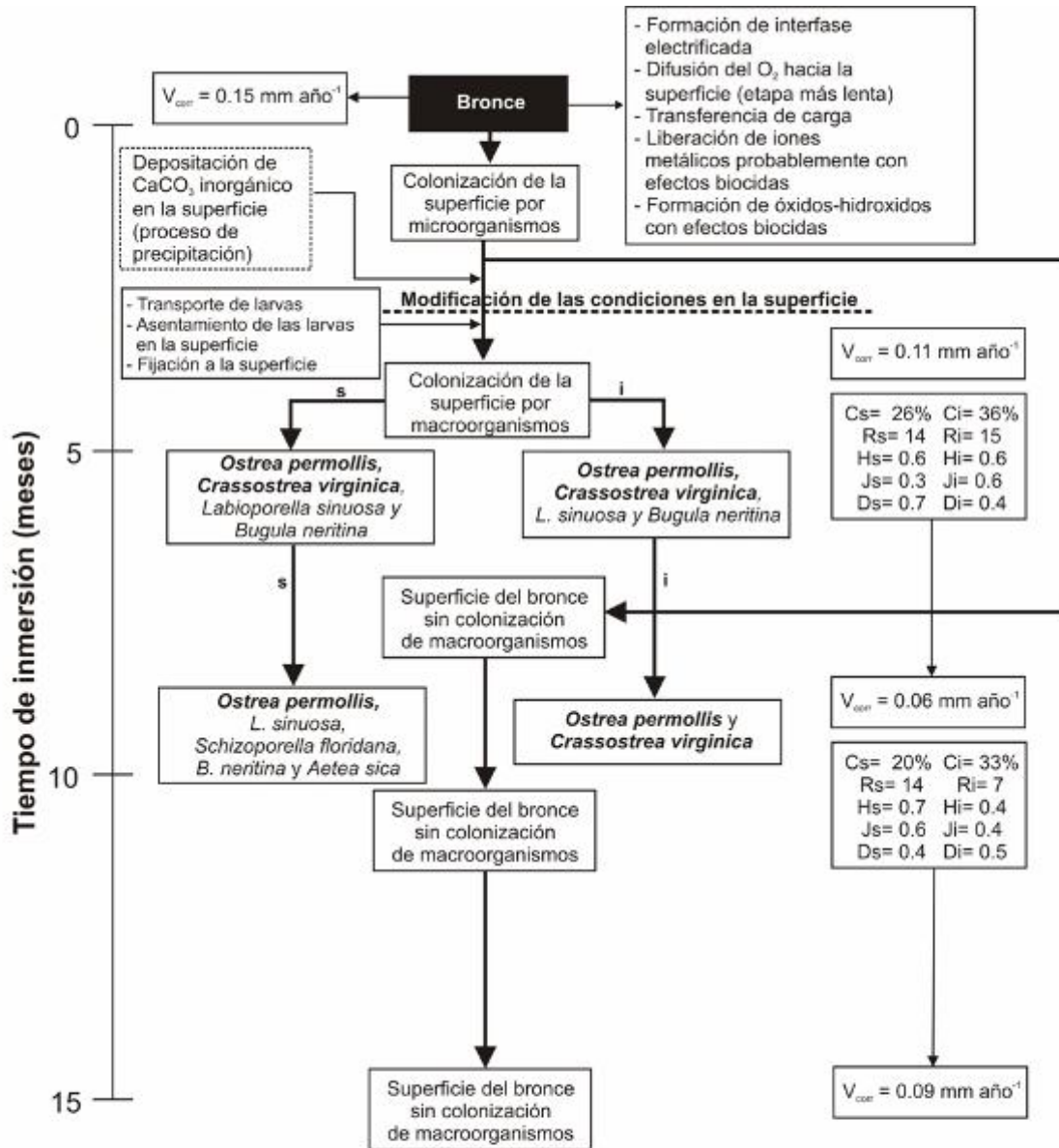


Figura 32.- Esquema general del deterioro y la transformación de los materiales experimentales de bronce a lo largo del tiempo por efecto de los procesos de corrosión y de colonización biológica de macroorganismos de vida sésil (s=cara superior de los discos colectores, i=cara inferior de los discos colectores, V_{corr} = velocidad de corrosión estimada a partir de las pruebas electroquímicas, C=cobertura de discos colectores, R=riqueza de especies, H=diversidad biológica, J=equidad y D=dominancia). La caja delimitada con línea interrumpida especifica el posible factor que propició la colonización de algunos colectores de bronce. Las especies mostradas en el esquema fueron las más abundantes en el tiempo de inmersión, no obstante, aquellas que aparecen en letras negritas presentaron una abundancia evaluada por el grado de cobertura sobre el sustrato $\geq 10\%$.

CONCLUSIONES

En total se identificaron 53 especies que se asentaron y colonizaron ambas caras de los materiales experimentales de hierro y de bronce. Estas especies se agruparon en 7 *phyla* de plantas y animales que fueron Plantae, Bryozoa, Porifera, Cnidaria, Annelida, Mollusca y Arthropoda, siendo los grupos de mayor riqueza específica el de los anélidos, seguido de los moluscos, briozoarios y algas.

De manera general, las comunidades de macroorganismos de vida sésil que colonizaron el hierro y el bronce se integraron por un número reducido de especies. No obstante, existieron diferencias entre los taxa que ocurrieron en la cara superior e inferior de los colectores, así como entre el hierro y el bronce en los diferentes periodos de inmersión. Lo anterior denota que existió una colonización específica de ciertos taxa y preferencias hacia cada material.

Las formas de crecimiento de los organismos que colonizaron la superficie tanto del hierro como del bronce se clasificaron en 6 categorías de acuerdo con sus atributos morfológicos y en algunos casos taxonómicos. Estas fueron organismos de desarrollo erecto, de crecimiento costroso o incrustante, de crecimiento estolonial, tubícolas, bivalvos de posición postrada y de desarrollo cónico.

De manera específica, la estructura de la comunidad que colonizó el hierro a lo largo del tiempo presentó cambios estacionales marcados por diferencias en la composición y abundancia de las formas de vida, así como por cambios en la diversidad, dominancia y equidad de la comunidad. Así mismo, la comunidad que se asentó en la cara superior de los colectores de hierro presentó una estructura distinta de la comunidad que se asentó en la cara inferior de dichos colectores. Lo anterior fue evidente en las diferencias observadas en la composición de especies que colonizaron cada una de las

caras, su abundancia, diversidad, equidad y dominancia. La abundancia de la biota sésil que se asentó en la cara superior de los colectores a los 5 meses mostró una dominancia por superficie principalmente de moluscos bivalvos, los cuales presentaron una asociación clara con dicha superficie durante este periodo. Mientras que en los periodos de exposición de 10 meses y 15 meses, esta superficie fue dominada por organismos de crecimiento costroso como briozoarios y esponjas, quienes mostraron una asociación con la cara superior de los colectores de hierro. Por el contrario, la cara inferior de los colectores fue dominada en su mayor parte durante todos los periodos de inmersión, por bivalvos de posición postrada y en menor grado por organismos de crecimiento costroso y organismos tubícolas, cuya abundancia presentó cambios estacionales. Aunque los moluscos estuvieron asociados notoriamente con la cara inferior de los colectores de hierro.

La cobertura total de la biota sésil sobre los discos colectores de hierro en los primeros 5 meses de exposición fue en promedio del 50%, mientras a los 10 meses se incrementó al 90% y a los 15 meses llegó a ser casi del 100%.

La velocidad de corrosión obtenida mediante la técnica de polarización potenciodinámica indicó que los niveles más altos de corrosión se presentaron en los colectores de hierro sin cobertura biológica expuestos al agua de mar natural al inicio del experimento y durante los primeros cinco meses de exposición, donde las formas dominantes por superficie en ambas caras de los colectores fueron bivalvos de posición postrada. Esto se atribuyó a la cobertura biológica heterogénea de estos organismos gregarios. Lo anterior también indicó que una cobertura poco densa y/o heterogénea como la que constituyeron los bivalvos, no tuvo un efecto significativo sobre la velocidad de corrosión del hierro y por el contrario, como lo señalan algunas investigaciones relacionadas, es probable que estas formas biológicas induzcan más bien un tipo de corrosión localizada.

El incremento general en la cobertura biológica de la comunidad conformada principalmente por organismos de formas incrustantes (ej. briozoarios y esponjas) sobre los colectores de hierro de 10 meses de exposición, conformó una barrera homogénea debido a las formas de crecimiento y al patrón de distribución de estos organismos. Esta cobertura biológica comenzó a tener un efecto importante sobre el deterioro del hierro en este periodo, lo cual se observó en la disminución de la velocidad de corrosión de los colectores. La conformación más homogénea de la capa biológica en los colectores de 10 meses interpuso una barrera poco porosa que redujo la difusión del oxígeno del medio acuático circundante hacia la superficie del metal, así como la transferencia de carga, afectando con ello las reacciones catódica y anódica del proceso de corrosión. Así mismo, las mediciones realizadas mediante las pruebas gravimétricas de pérdida de peso mostraron una tendencia semejante, en la que la velocidad de corrosión de las probetas de hierro disminuyó hacia el final de su periodo de exposición. Los datos de corrosión del hierro obtenidos por ambas técnicas, mostraron diferencias en su magnitud, las cuales se atribuyeron en gran parte a las propias diferencias metodológicas entre las técnicas de evaluación.

Por otra parte, sólo algunos de los colectores de bronce que fueron expuestos presentaron el asentamiento y colonización de organismos de vida sésil, mientras que la gran mayoría de ellos no presentó colonización biológica alguna. La cobertura biológica de aquellos colectores colonizados fue en promedio de 30%, mucho menor que en el caso del hierro. En este sentido, ninguna especie mostró una asociación con el bronce.

A pesar de lo anterior, la estructura de la comunidad que se asentó en aquellos colectores de bronce que si fueron colonizados, fue distinta de la estructura de la comunidad que colonizó el hierro. En este sentido, la comunidad que se asentó en estos colectores de bronce presentó un cambio estacional en la composición y abundancia de las formas dominantes por superficie. Los

organismos dominantes por superficie tanto en la cara superior como inferior de dichos colectores de bronce fueron bivalvos de posición postrada.

La cobertura biológica de estos organismos gregarios sobre aquellos colectores de bronce colonizados fue poco abundante y heterogénea, por lo que no tuvo un efecto significativo en la velocidad de corrosión de los mismos. Los datos de corrosión evaluados por la técnica de polarización potenciodnámica mostraron una tendencia constante en la que no disminuyó la velocidad de corrosión de los colectores de bronce a lo largo del tiempo. Mientras que la tasa de corrosión evaluada por el método gravimétrico mostró una tendencia también constante en la que la velocidad de corrosión de las probetas de bronce se incrementó a lo largo del periodo de exposición.

La ausencia de colonización biológica en los colectores de bronce o su menor densidad de asentamiento de organismos de vida sésil y grado de cobertura biológica, estuvo relacionada con el efecto tóxico de los productos de corrosión del bronce, principalmente los derivados del cobre como Cu_2O , CuO y CuS , así como probablemente con la liberación de iones Cu^{2+} . Lo anterior también sugiere que la colonización del bronce fue afectada por otros procesos bióticos y abióticos. En el presente estudio se observó en la superficie de algunos de los colectores de bronce que fueron colonizados, la presencia de una delgada capa de carbonato de calcio (CaCO_3), la cual pudo disminuir el efecto tóxico del bronce y cambiar las condiciones en su superficie, facilitando el asentamiento de las larvas y la colonización de los organismos de vida sésil. Por lo anterior, este proceso puede representar uno de los mecanismos de colonización del bronce. La acción de los diferentes mecanismos bióticos y abióticos discutidos en el presente estudio, explican en buena medida el por qué en algunos sitios de naufragio es posible hallar vestigios culturales de bronce con una colonización y cobertura biológica abundante.

Basado en la información experimental obtenida se pudieron establecer los modelos de las fases iniciales de degradación y transformación del hierro y del bronce bajo condiciones naturales en los fondos marinos adyacentes a la ciudad y puerto de Campeche, misma área en donde yacen una gran cantidad de vestigios arqueológicos metálicos de la misma naturaleza. Por lo que esta investigación permitió un mejor entendimiento de la cinética de degradación de estos materiales bajo condiciones naturales.

Por último, la información generada y las técnicas aplicadas en el presente estudio podrán ser transferidas, adoptadas y utilizadas por la propia Subdirección de Arqueología Subacuática del INAH para la evaluación del deterioro *in situ* de vestigios arqueológicos metálicos. Lo anterior también permitirá sugerir y establecer en casos específicos estrategias de monitoreo y conservación *in situ* de materiales culturales en sitios arqueológicos sumergidos de Campeche, así como en otros estados del país que cuenten con Patrimonio Cultural Sumergido y a través de diferentes zonas ecológicas.

REFERENCIAS

Arano, R.D. 2008. Conservación de cañones de fundición de hierro del período colonial, que forman parte del patrimonio cultural de la ciudad de San Francisco de Campeche. Tesis de maestría en ciencias marinas. Centro de investigación en corrosión de la Universidad Autónoma de Campeche. 121 pp.

Bakus, G.J. 2007. Quantitative analysis of marine biological communities: field biology and environment. John Wiley and Sons , inc., Publication. USA. 435 pp.

Barba, M.H., Díaz F.B. y Luna E.P. 2010. El patrimonio arqueológico en costas y mares de México ante el cambio climático. En: Rivera A.E., Azuz, A.I. Alpuche, G.L. y Villalobos Z.G.J. (eds). Cambio Climático en México, un enfoque costero-marino. Universidad autónoma de Campeche, CETYS-Universidad, Gobierno del estado de Campeche. Pp. 639-654.

Bastida, R., Elkin, D., Grosso, M., Trassens, M., and Martín, J.P. 2004. The sloop of war HMS Swift (1770): a case study on the effects of biodeterioration on the underwater cultural heritage of Patagonia. In Corrosion Review. 22 (5-6), 417-40

Bastida, R., Grosso, M., Elkin, D. 2008. The role of benthic communities and environmental agents in the formation of underwater archaeological sites. En Underwater and maritime archaeology in Latin America and the Caribbean. (Margaret Leshikar-Denton and Pilar Luna Erreguerena editors). One World Archaeology 56. 173-185 pp.

Brusca, R.C. y Brusca, G.J. 2005. Invertebrados. 2da. Ed. Editorial McGraw-Hill-Interamericana. 1005 pp.

Carabias, L. J., de la Torre, Q. G. y de la Maza, E.J. 1997. Programa de manejo de la Laguna de Términos. 1ª ed. Instituto Nacional de Ecología. México. 166 pp.

Celis, V.A. 2009. Análisis Panbiogeográfico y Taxonómico de los Cirripedios (CRUSTACEA) de México. Tesis Doctoral. UNAM. 282 pp.

Dawes, C.J. 1986. Botánica Marina. 1ª ed. Limusa. México.

De La Lanza, E.G., P.S. Hernández y R.J.C Gómez (2007), "Distribución de salinidad y oxígeno disuelto", en Nuevo Atlas Nacional de México, México, Instituto de Geografía, UNAM.

Elkin, D.C. 1998. Procesos de formación del registro arqueológico subacuático: una propuesta metodológica para el sitio Swift (Puerto Deseado, Santa Cruz). Universidad Nacional de la Patagonia Austral, Rio Gallegos. IV Jornadas de arqueología de la Patagonia. 15pp

Gómez, .P. 2002. Esponjas marinas del Golfo de México y el Caribe. AGT Editor, S.A. 1ª Edición. México. 130pp.

Gutiérrez-Estrada, M., Aguayo, C.J., Araujo, M.J. 2003. Morfobatimetría y textura de los sedimentos de las provincias Banco de Campeche y Bahía de Campeche, suroeste del Golfo de México. In: Agustín Ayala-Castañares: universitario impulsor de la investigación científica (L.A. Soto, ed) Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México:189-208pp.

Gu X.N., Zheng W., Cheng Y. y Zheng Y.F. 2009. A study on alkaline heat treated Mg–Ca alloy for the control of the biocorrosion rate. Acta Materialia Inc. Published by Elsevier Ltd. Vol. 5. 2790–2799 pp.

Herrera, F.R. 2000. Desarrollo estacional de una comunidad bentónica pionera en un sustrato artificial en Bahía Tortugas, Baja California Sur. Tesis de maestría. Sección de estudios de posgrado e investigación, ENCB Instituto Politécnico Nacional. México. 60pp.

Huerta, M.M., Guerrero, V.S. 2004. Ecología de Comunidades. Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. México. 124pp.

Humann P. y Deloach N. 2002. REEF Creature identification. Florida-Caribbean- Bahamas. New world publications I.N.C. Florida, U.S.A. 420Pp.. 3rd ed.

Lenihan D.J. 1990. Submerged cultural resources study. USS Arizona memorial and Pearl Harbor national historic landmark. National Park Service. New Mexico, USA. 192 pp. 2nd ed.

León A.D. 2007. Géneros de algas marinas tropicales de México. I Algas Verdes. UNAM. 1ª Edición. México. 174 pp.

Licea, S. y Santoyo H. 1991. Algunas características ecológicas del fitoplancton de la región central de la Bahía de Campeche. Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. 18(2):

López, G.P. 2008. "Organismos marinos asociados al patrimonio cultural sumergido de Campeche, México: relación y efectos de la interacción biológica" en Revista Arqueología. INAH. Vol. 39, Segunda época. Septiembre-Diciembre. pp. 155-172, México, D.F.

Luna. E.P. 2003. Informe de actividades del Proyecto Programas Especiales de la Subdirección de Arqueología Subacuática. Archivo Técnico, INAH. D.F., México.

Luna. E.P. 2004. Informe de actividades del Proyecto Programas Especiales de la Subdirección de Arqueología Subacuática. Archivo Técnico, INAH. D.F., México.

Luna. E.P. 2005. Informe de actividades del Proyecto Programas Especiales de la Subdirección de Arqueología Subacuática. Archivo Técnico, INAH. D.F., México.

Luna. E.P. 2006. Informe de actividades del Proyecto Programas Especiales de la Subdirección de Arqueología Subacuática. Archivo Técnico, INAH. D.F., México.

Luna. E.P. 2007. Informe de actividades del Proyecto Programas Especiales de la Subdirección de Arqueología Subacuática. Archivo Técnico, INAH. D.F., México.

Luna. E.P. 2008. Informe de actividades del Proyecto Programas Especiales de la Subdirección de Arqueología Subacuática. Archivo Técnico, INAH. D.F., México.

Luna. E.P. 2009. Informe de actividades del Proyecto Programas Especiales de la Subdirección de Arqueología Subacuática. Archivo Técnico, INAH. D.F., México.

MacLeod, I.D. 2002. *In situ* corrosion measurements and management of shipwreck sites. In The plenum series in underwater archaeologist. International

handbook of underwater archaeologist. Chapter 41. Kluwer Academic/Plenum Publishers. 697- 714.

MacLeod, I.D, y Schindelholz. E. 2004. Surface analysis of corroded silver coins from the wreck of the San Pedro De Alcantara (1786). Proceedings of Metal. National Museum of Australia Canberra ACT. ABN 70592 297 967.

MacLeod, I.D. 2006. In-situ Corrosion Studies on Wrecked Aircraft of the Imperial Japanese Navy in Chuuk Lagoon, Federated States of Micronesia, *International Journal of Nautical Archaeology*, , 35.1, p.128-136

Mille, P.S. & C.A. Pérez. 1993. Géneros más comunes de moluscos gasterópoda y pelecypoda de México. Instituto Politécnico Nacional, México. 42 pp.

Monreal, G. M.A., D.A. Salas de León, Padilla, P.A.R. y Alatorre, M.M.A. 1992. Hidrografía y estimación de las corrientes de densidad en el Sur de la Bahía de Campeche, México. *Ciencias Marinas*, 18(4):115-133

Morris, P. A. 1975. A Field Guide to Shells of the Atlantic and Gulf Coasts and the West Indies. Houghton Mifflin Company Boston, Boston. 330 pp.

Muckelroy, K. 1978. Maritime Archaeology. Cambridge: Cambridge University Press. 280 pp.

Murphy, L.E. 1990. 8SL17: Natural site–formation process of a multiple-component underwater site in Florida. National Park Service. New Mexico, USA. 94 pp. 1st ed.

Murphy, L.E. 1993. Dry Tortugas national park. Submerged cultural resources assessment. National park services. New Mexico. 434 pp.

Neville, A. y Hodgkiess, T. 2000. Localised effects of macrofouling species on electrochemical corrosion resistant alloys. *British Corrosion Journal* Vol. 35 No. 1, pp. 54-59.

Nielsen, C. 2009. "Entoprocta of the Gulf of Mexico". En *Gulf of Mexico Origin, Waters, and Biota. Volume 1, Biodiversity. 1ST Ed.* Tunell, J.W. Jr. , Fólger, D.L. y Earle, S.A. Editores. Texas A&M University-Corpus Christi. 1143-1163 pp.

North, N.A. and I.D. Mcleod. 1987. Corrosion Metals. En *Conservation of Marine Archaeological Objects.* Colin Pearson ed. 68-98

Ortega M.M., Godínez J.L., Ruvalcaba R. M. 1993. Una clave de campo de las algas pardas de las costas mexicanas del Golfo de México y Mar Caribe. AGT Editor. 1a. Edición. 42 pp.

Palma, P. 2005. Monitoring of Shipwreck Sites. *The International Journal of Nautical Archaeology.* Vol. 34 No. 2. 323–331 pp.

Palraj S. y Venkatachari, G. 2006. Biofouling Characteristics of Mild Steel in Mandapam Waters. *NACE International,* Vol. 45, No. 6. 46-50 pp.

Railkin, A.I. 2004. *Marine Biofouling. Colonization processes and defenses* Ed. Americana. NY. 1-39pp

Ruppert, E. y Barnes, R. 2007. *Zoología de los invertebrados.* McGraw-Hill Interamericana editores. 6ª. ed. México. 1114 pp.

Russell, M.A., Colin, D.L., Murphy, L.E., Johnson, D.L., Wilson, B.M. y Carr, J.D. 2006. A Minimum-Impact Method for Measuring Corrosion Rate of

Steel-Hulled Shipwreck in Seawater. The international Journal of Nautical Archaeology, Vol. 35, Num. 2, pp. 310-318.

Salas de León, D.A, G. M.A Monreal, Sanvicente-Añorve, L, C. Flores-Coto. 1996. Influence de la circulation à long terme sur la répartition des organismes zooplanctoniques dans la Baie de Campeche, Mexique. Acta Oceanológica, Vol. 21, Num. 1, pp. 87-93

Salas de León, D.A, G. M.A Monreal, Salas-Monreal, D, Expósito, D.G., M.L. Riveron-Enzastiga y Vázquez, G.F. 2007. Tidal Current Components in the Southern Bay of Campeche, Gulf of Mexico. Geofísica Internacional, Vol. 46, Num. 2, pp. 141-147

Páginas de Internet consultadas

[http://portal.unesco.org/es/ev.php-
URL_ID=13520&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html](http://portal.unesco.org/es/ev.php-URL_ID=13520&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html)

http://www.sms.si.edu/irlspec/Beania_klupei.htm

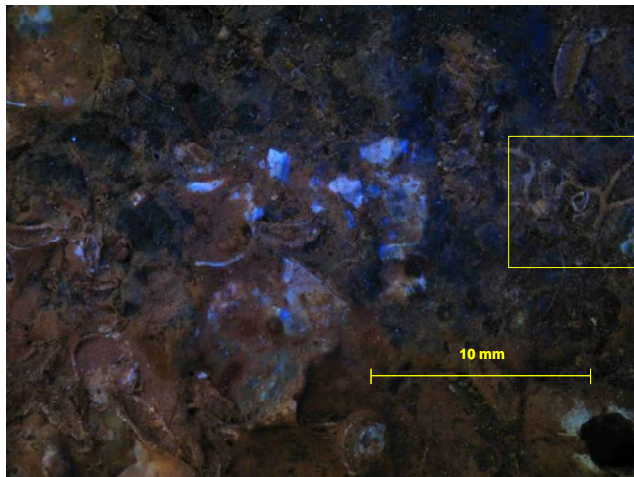
<http://www.bryozoa.net/genb.html>

[http://www.R-project.org/.](http://www.R-project.org/)

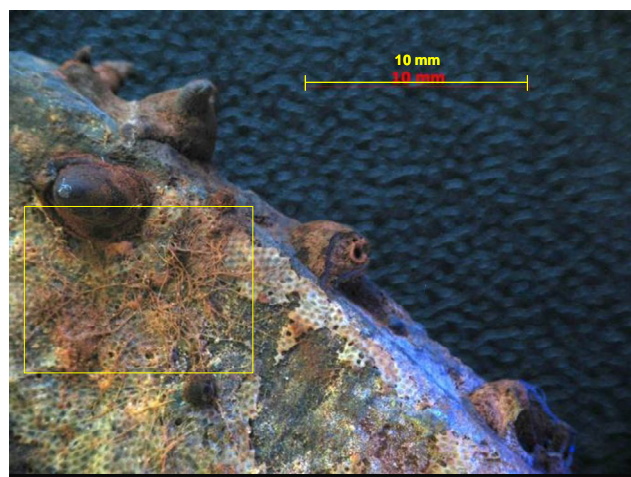
ANEXO I
CATÁLOGO DE ESPECIES

Reino Plantae

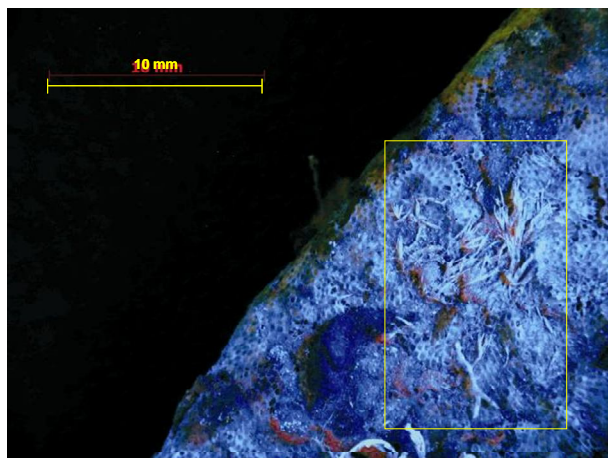
Algas



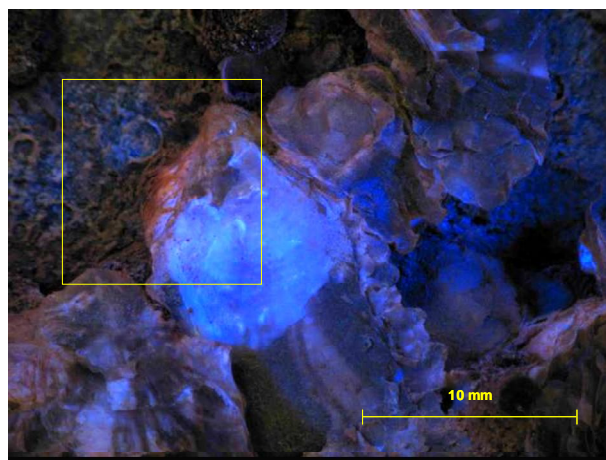
sp1
Muestreo 1
Colector 1D1Fe_superior
Imagen ID 3-9



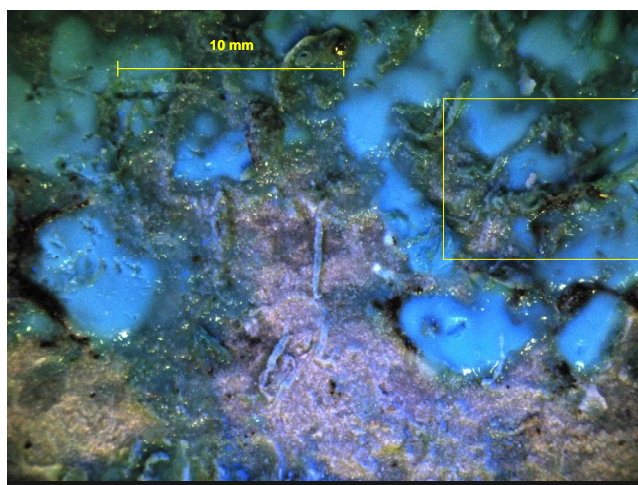
sp2
Muestreo 1
Colector 1D2Fe_superior
Imagen ID 8-1



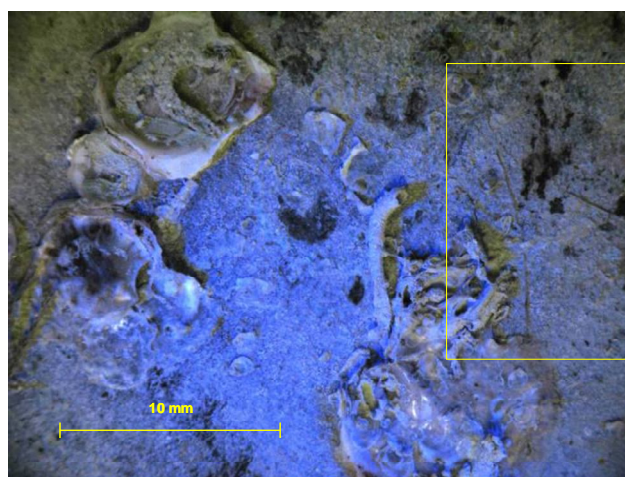
sp3
Muestreo 1
Colector 2D2Fe_superior
Imagen ID 0-1



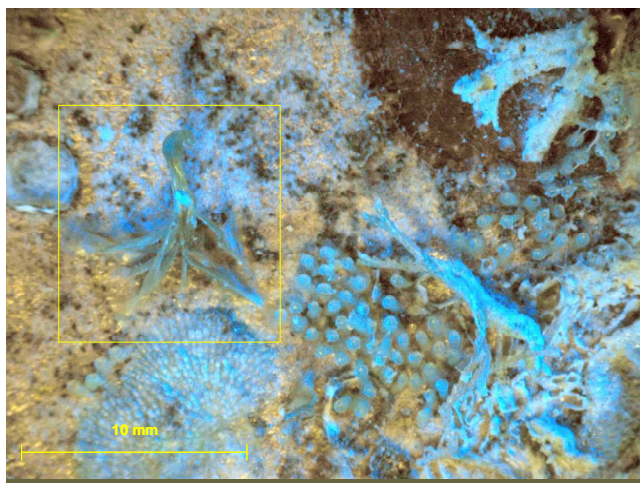
sp4
Muestreo 1
Colector 2D2Fe_inferior
Imagen ID 6-13



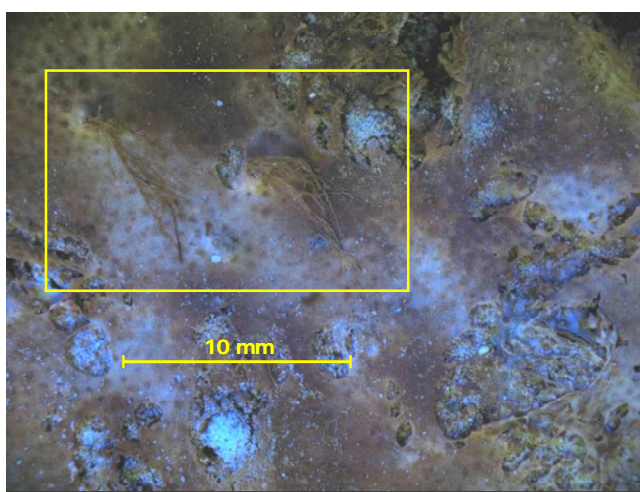
sp5
Muestreo 1
Colector 1D1Brass_superior
Imagen ID 1-7



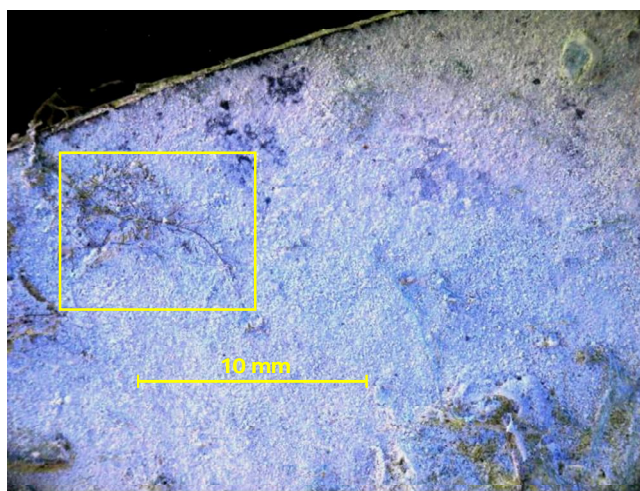
sp6
Muestreo 1
Colector 2D1Brass_superior
Imagen ID 5-14



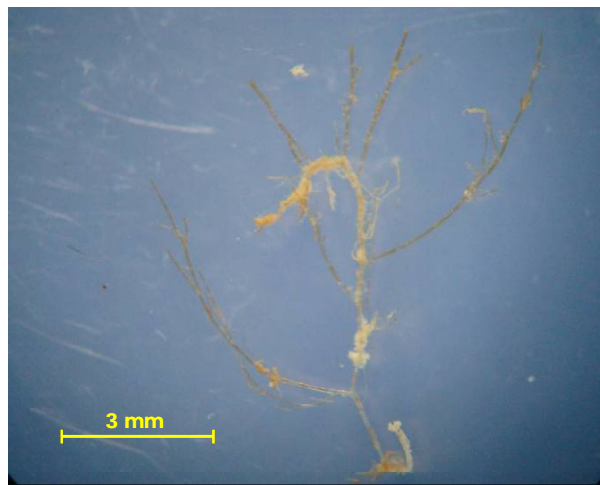
Rhipocephalus sp
 Muestreo 1
 Colector 1D1Brass_inferior
 Imagen ID 7-7



Cladophora liniformis
 Muestreo 2
 Colector 1D1Fe_superior
 Imagen ID 7-3

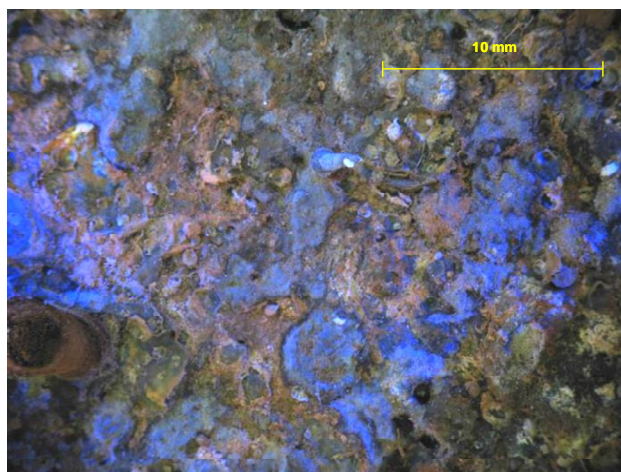


Cladophora laetevirens
 Muestreo 2
 Colector 1D1Brass_superior
 Imagen ID 3-16

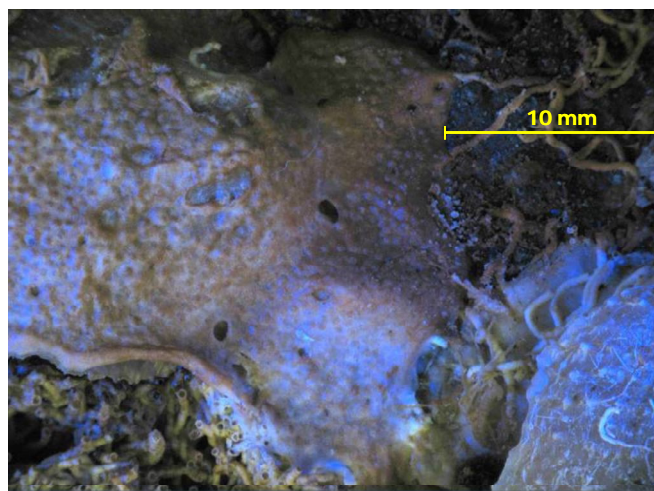


Cladophora albida
Muestreo 3
Colector 2D1Fe_Superior
Imagen ID

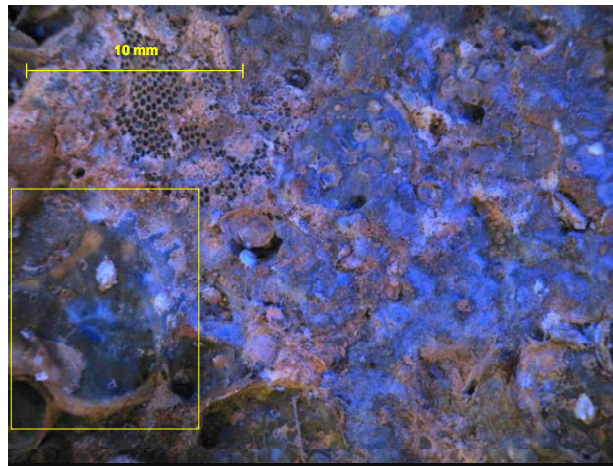
Phylum Porifera Esponjas



sp1 (Dictyonellidae)
Muestreo 1
Colector 2D1Fe_superior
Imagen ID 7-7

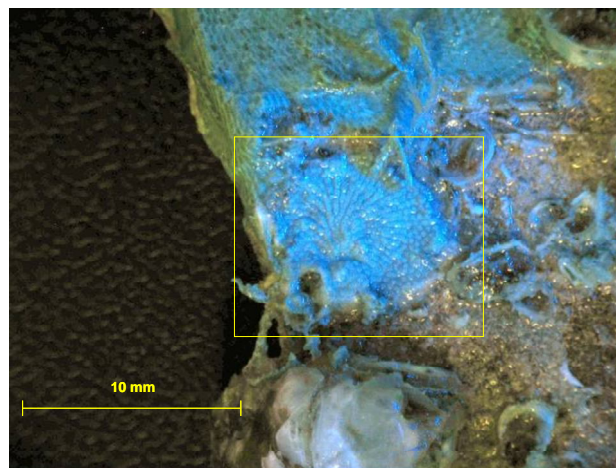


Anthosigmella varians
Muestreo 2
Colector 1D1Fe_superior
Imagen ID 5-15

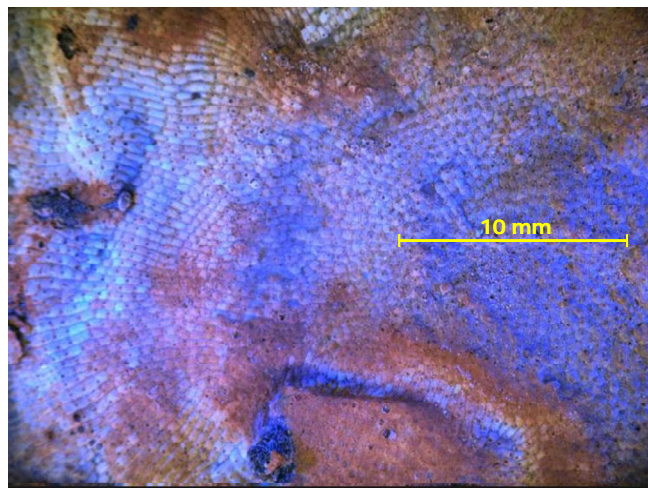


sp2 (Clonalidae)
 Muestreo 1
 Colector 2D1Fe_superior
 Imagen ID 5-14

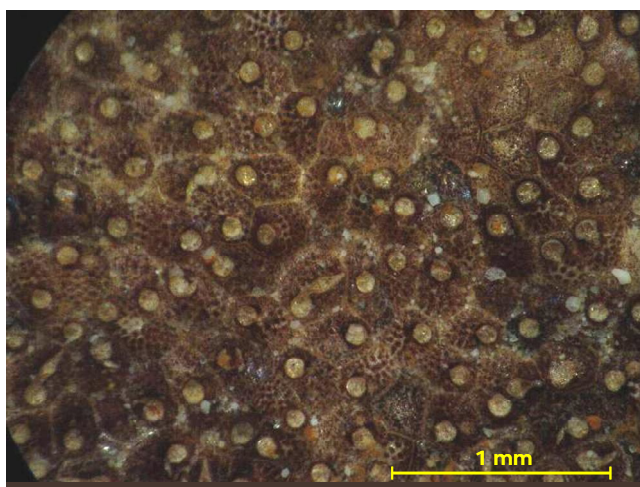
Phylum Bryozoa Briozoarios



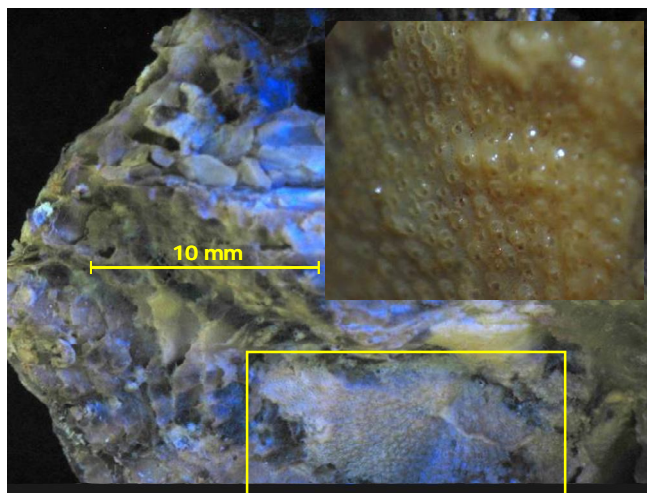
Schizoporella sp
 Muestreo 1
 Colector 1D1Brass_inferior
 Imagen ID 0-9



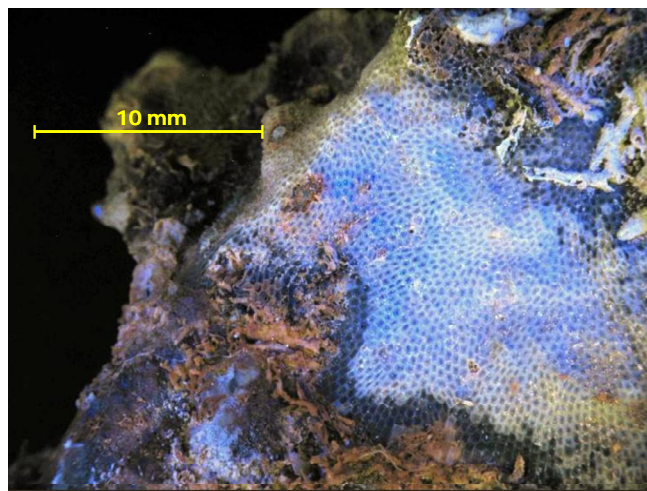
S. floridana
 Muestreo 2
 Colector 1D2Fe_superior
 Imagen ID 6-14



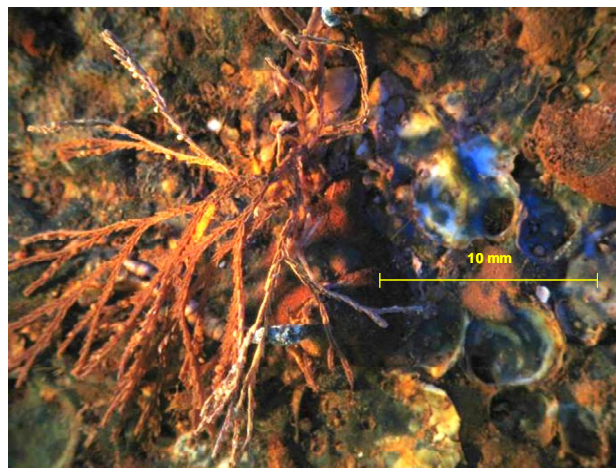
S. pungens
 Muestreo 3
 Colector 2D1Fe_Superior
 Imagen



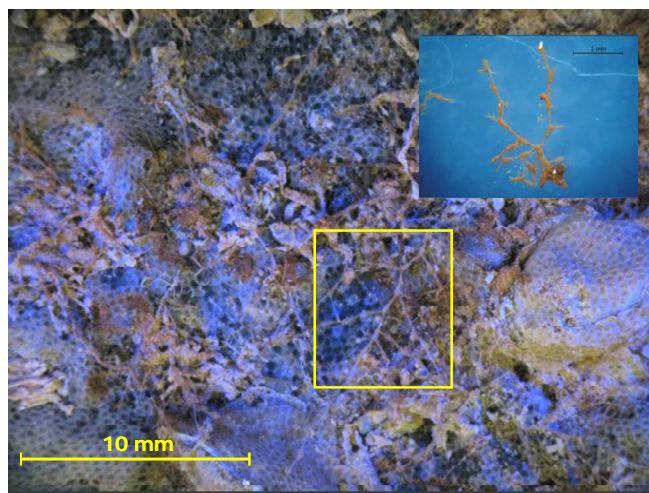
Parasmitina betamorphaes
 Muestreo 3
 Colector 1D1Fe_Superior
 Imagen ID 3-2



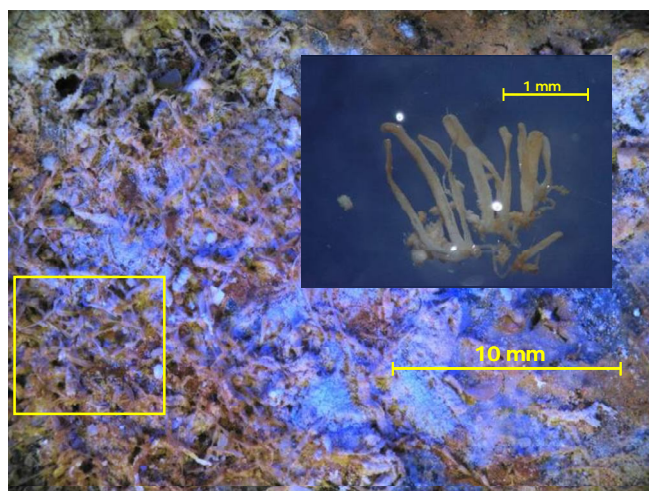
Labioporella sinuosa
 Muestreo 2
 Colector 1D1Fe_superior
 Imagen ID 1-13



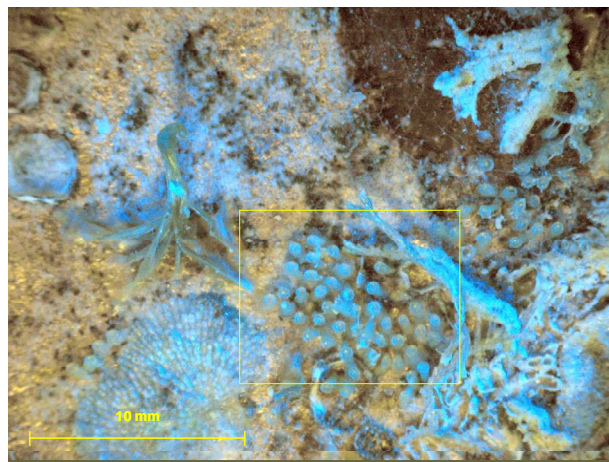
Bugula neritina
 Muestreo 1
 Colector 3D2Fe_superior
 Imagen ID 2-9



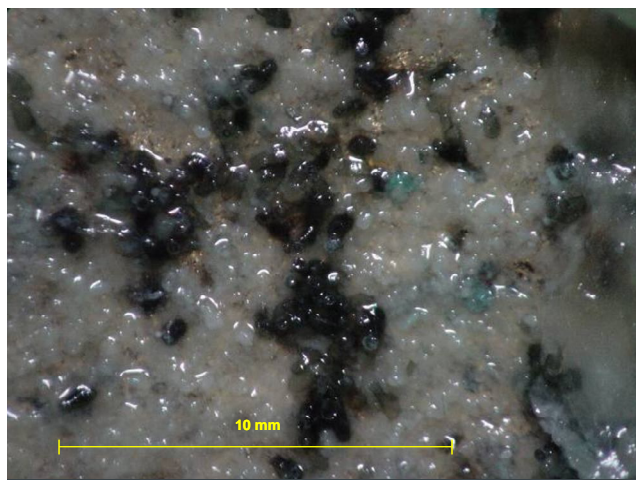
Savignyella lafontii
 Muestreo 2
 Colector 1D1Fe_superior
 Imagen ID 3-5



Aetea sica
 Muestreo 2
 Colector 1D1Fe superior
 Imagen ID 3-7

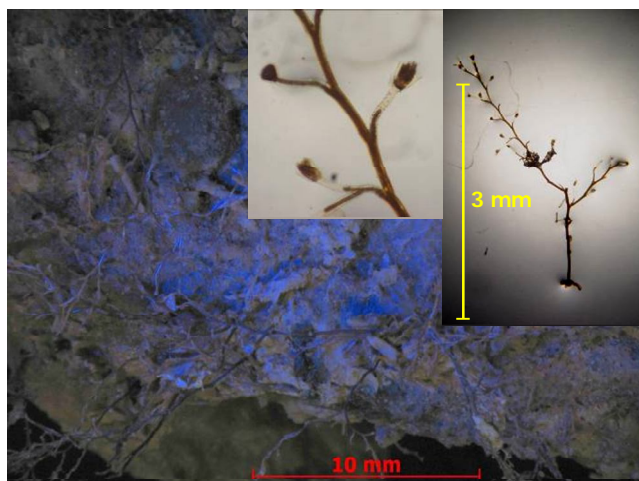


sp1 (Ctenostomata)
 Muestreo 1
 Colector 1D1Brass_inferior
 Imagen ID 7-7



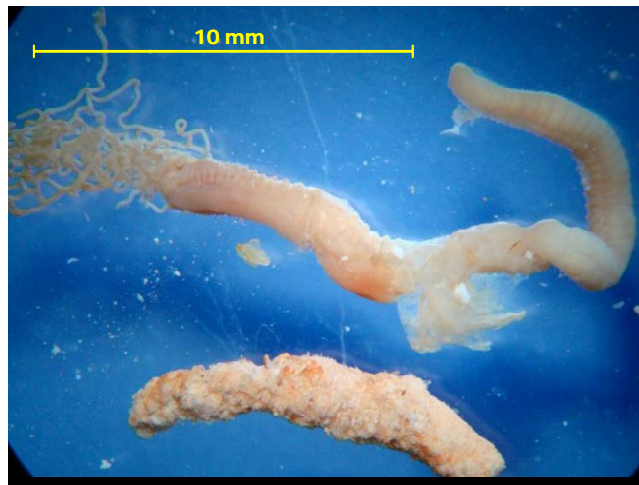
sp2 (Ctenostomata)
 Muestreo 1
 Colector 1D1Brass_inferior
 Imagen ID

Phylum Cnidaria Hidrozoarios

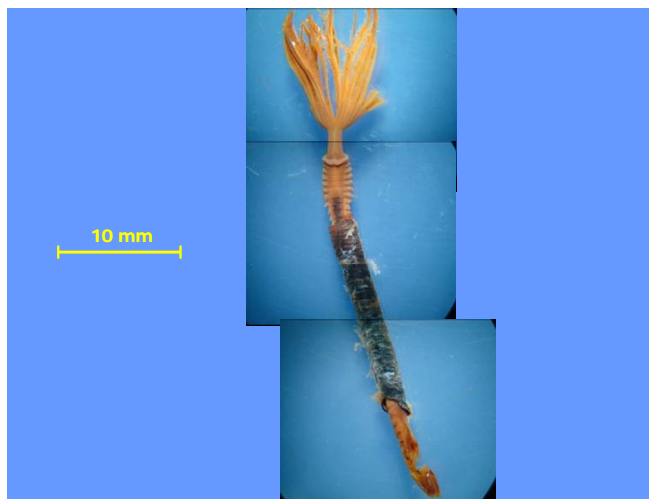


Campanularia angulata
 Muestreo 3
 Colector 1D1Fe_Superior
 Imagen ID 3-1

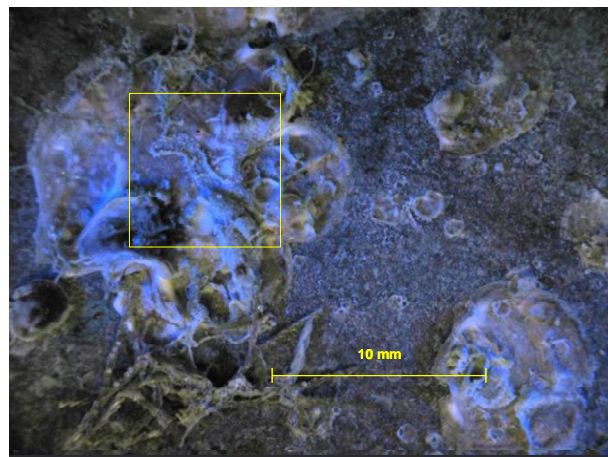
Phylum Annelida Poliquetos



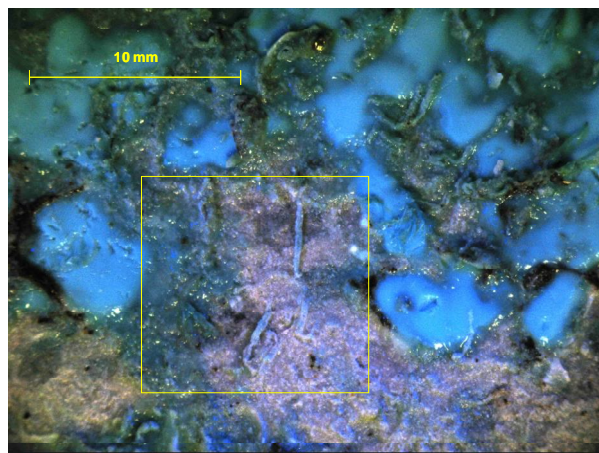
Melinna maculata
Muestreo 3
Colector 3D1Fe_Superior
Imagen ID



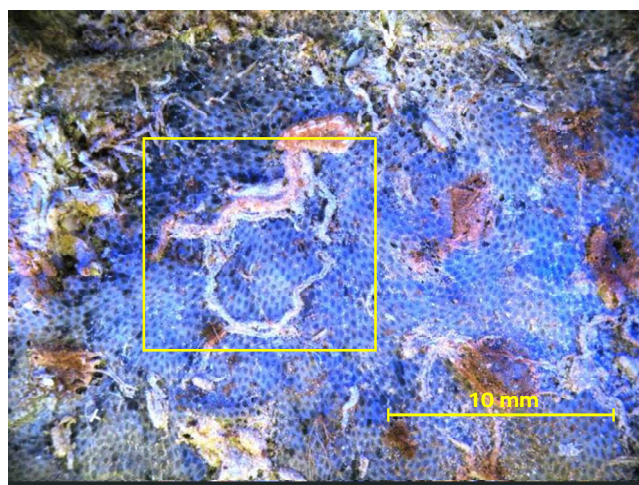
Eudistylia sp
Muestreo 3
Colector 3D1Fe_Inferior
Imagen ID



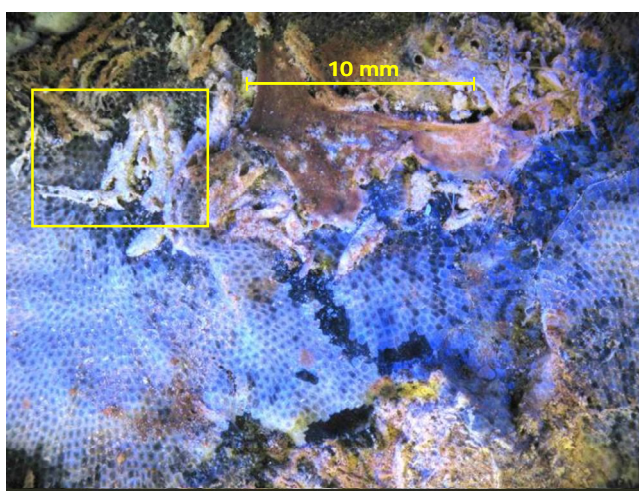
sp1 (Sabellidae)
Muestreo 1
Colector 2D1Brass_superior
Imagen ID 2-12



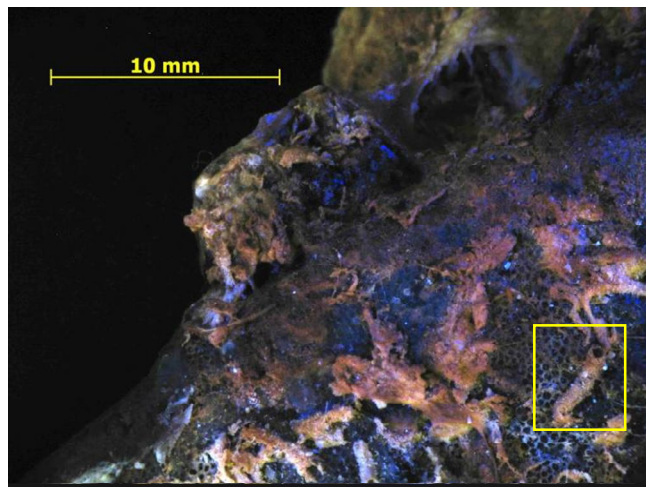
sp2 (Sabellidae)
 Muestreo 1
 Colector 1D1Brass_superior
 Imagen ID 1-7



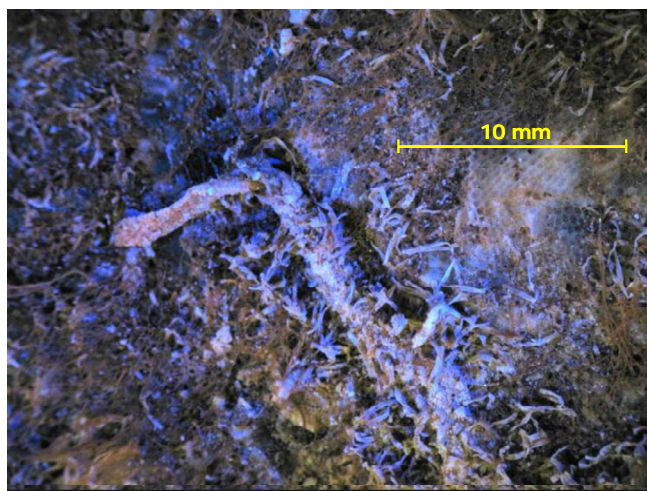
sp3 (Sabellidae)
 Muestreo 2
 Colector 1D1Fe_superior
 Imagen ID 2-6



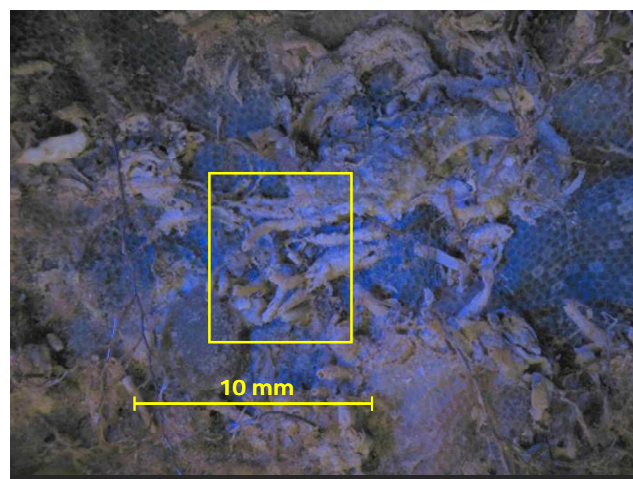
sp4 (Sabellidae)
 Muestreo 2
 Colector 1D1Fe_superior
 Imagen ID 2-3



sp5 (Sabellidae)
Muestreo 2
Colector 1D1Fe_superior
Imagen ID 2-1



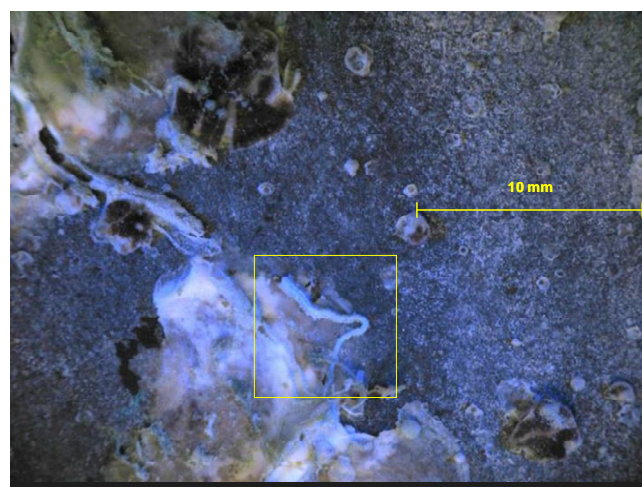
sp6 (Sabellidae)
Muestreo 2
Colector 1D2Fe_superior
Imagen ID 1-8



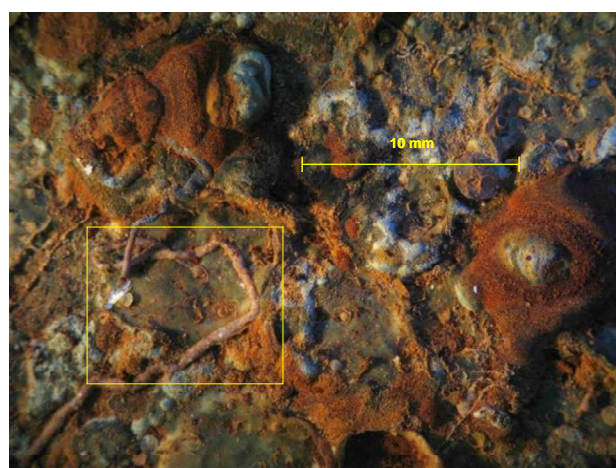
sp7 (Sabellidae)
Muestreo 3
Colector 1D1Fe_Superior
Imagen ID 3-2



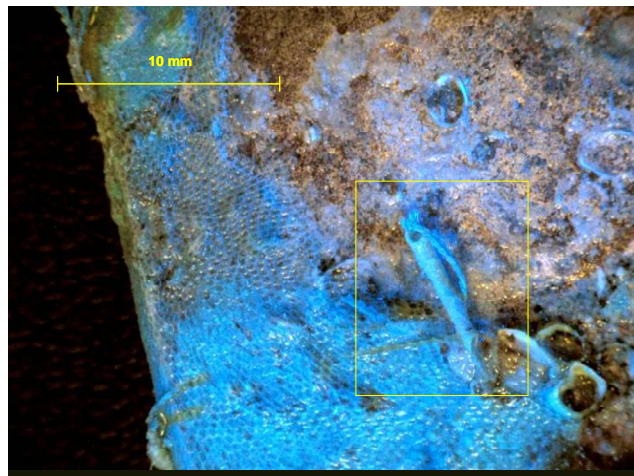
Spirorbis sp
 Muestreo 2
 Colector 1D1Brass_superior
 Imagen ID 6-14



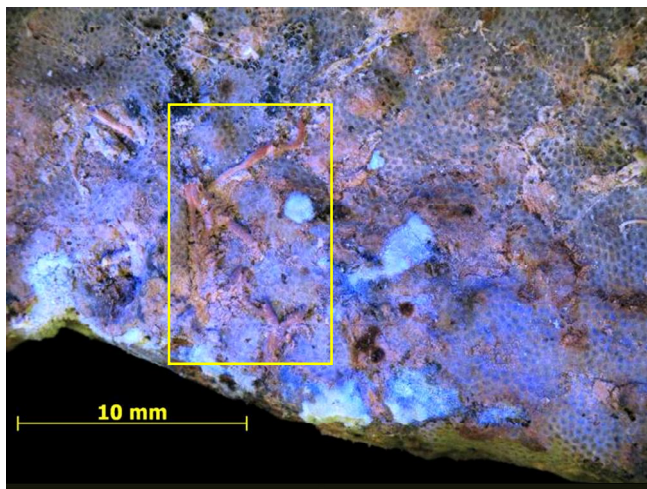
sp1 (Serpulidae)
 Muestreo 1
 Colector 2D1Brass_superior
 Imagen ID 2-10



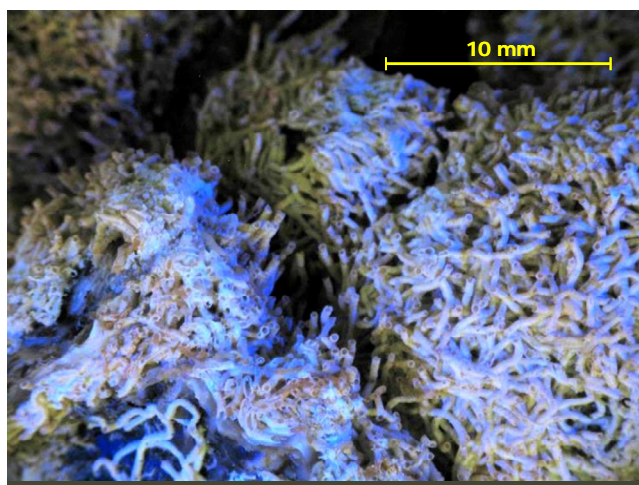
sp2 (Serpulidae)
 Muestreo 1
 Colector 3D2Fe_superior
 Imagen ID 3-5



sp3 (Serpulidae)
Muestreo 1
Colector 1D1Brass_inferior
Imagen ID 0-7

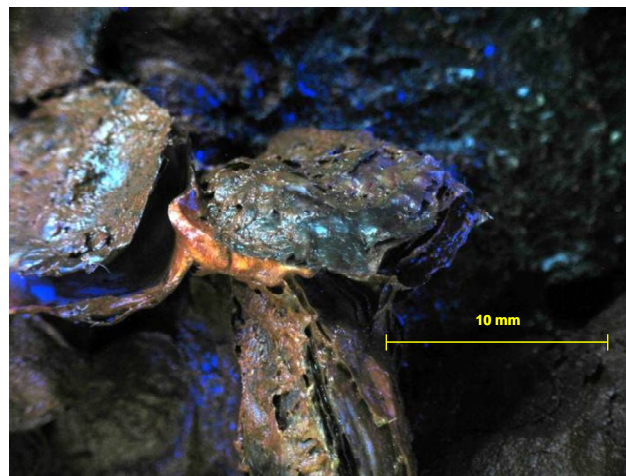


sp4 (Serpulidae)
Muestreo 2
Colector 1D1Fe_superior
Imagen ID 3-1

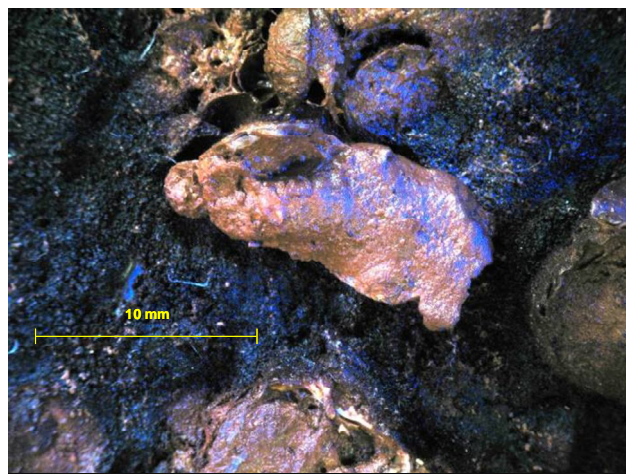


sp5 (Serpulidae)
Muestreo 2
Colector 1D1Fe_inferior
Imagen ID 2-13

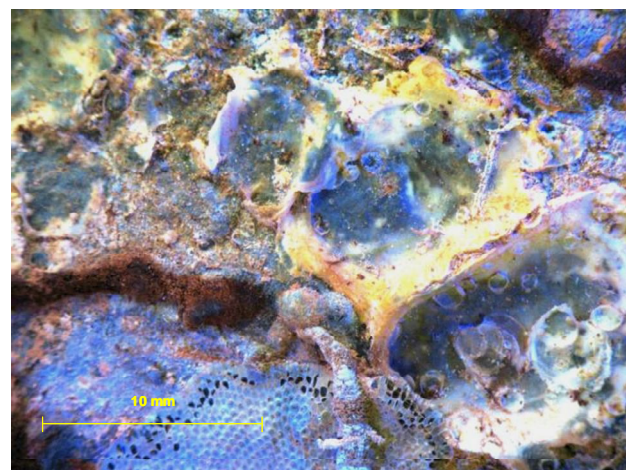
Phylum Mollusca Moluscos



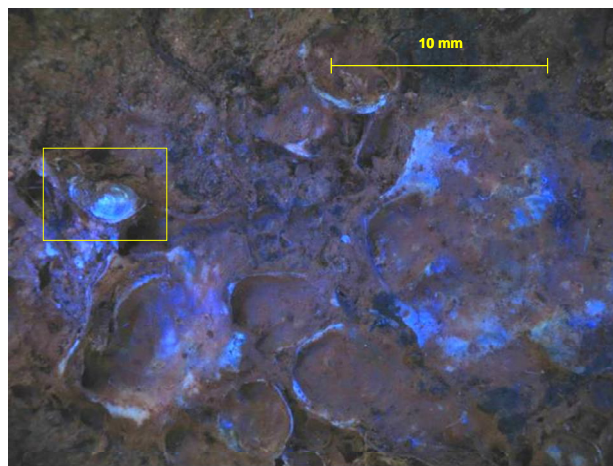
Ostrea permodis
Muestreo 1
Colector 1D1Fe_inferior
Imagen ID 4-15



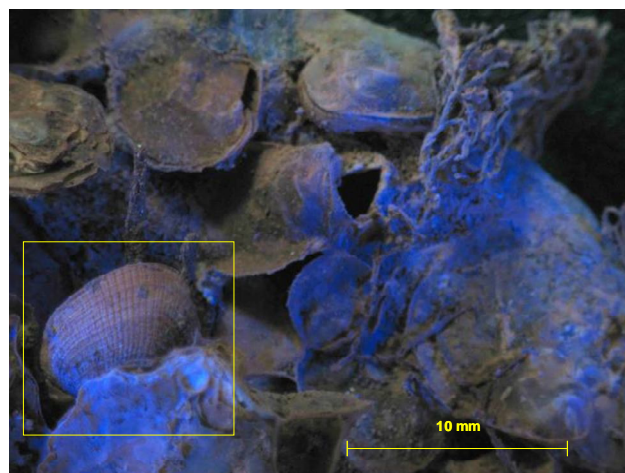
Crassostrea virginica
Muestreo 1
Colector 1D1Fe_inferior
Imagen ID 4-11



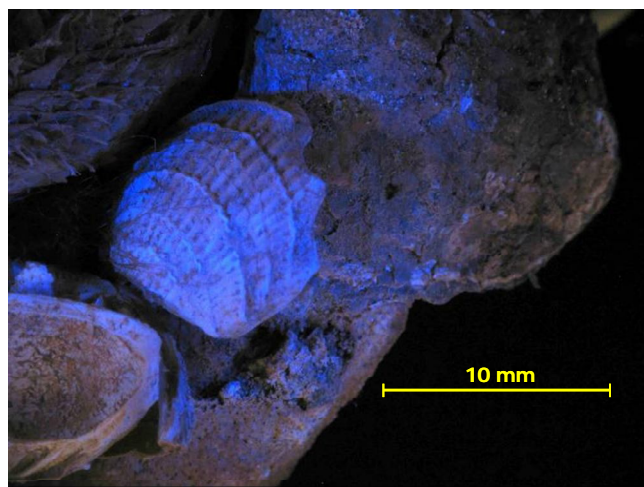
sp1 (Ostreidae)
Muestreo 1
Colector 1D2Fe_superior
Imagen ID 5-4



sp2 (Ostreidae)
 Muestreo 1
 Colector 1D1Fe_superior
 Imagen ID 2-6



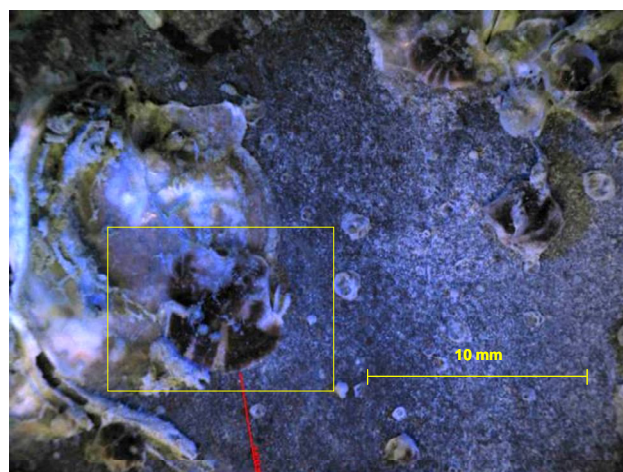
Codakia costata
 Muestreo 1
 Colector 3D1Fe_inferior
 Imagen ID 6-2



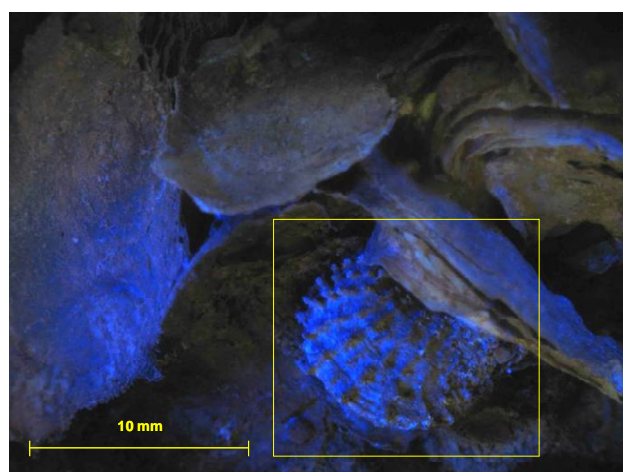
Chione cancellata
 Muestreo 2
 Colector 1D2Fe_inferior
 Imagen ID 7-1



Periglypta listeri
 Muestreo 2
 Colector 1D1Fe_inferior
 Imagen ID 6-14



spp (Veneridae)
 Muestreo 1
 Colector 2D1Brass_superior
 Imagen ID 2-9



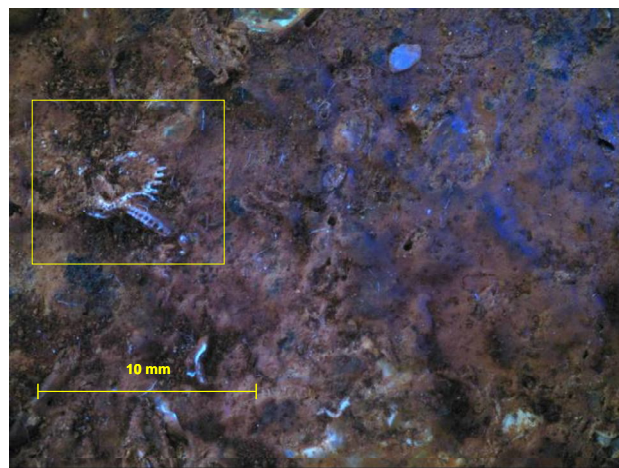
Atrina rigida
 Muestreo 1
 Colector 2D1Fe_inferior
 Imagen ID 5-8



Mytilus edulis
 Muestreo 2
 Colector 1D2Fe_inferior
 Imagen ID 6-12



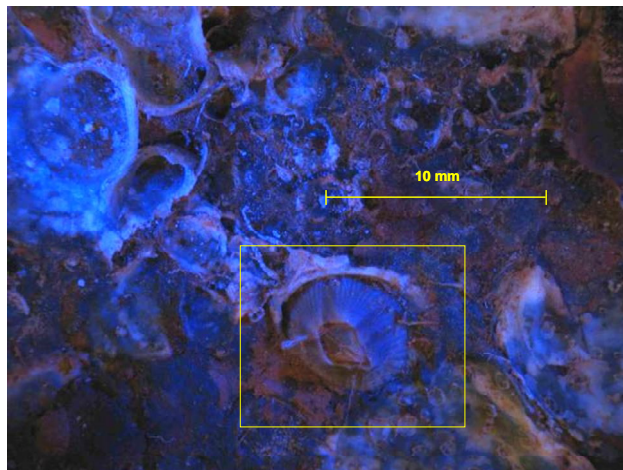
Pteria colymbus
 Muestreo 2
 Colector 1D1Fe_inferior
 Imagen ID 3-15



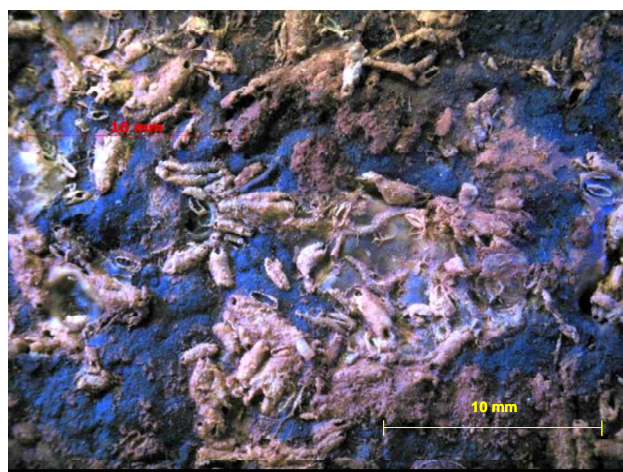
spp (Chamidae)
 Muestreo 1
 Colector 1D1Fe_superior
 Imagen ID 4-14

Phylum Arthropoda

Crustáceos



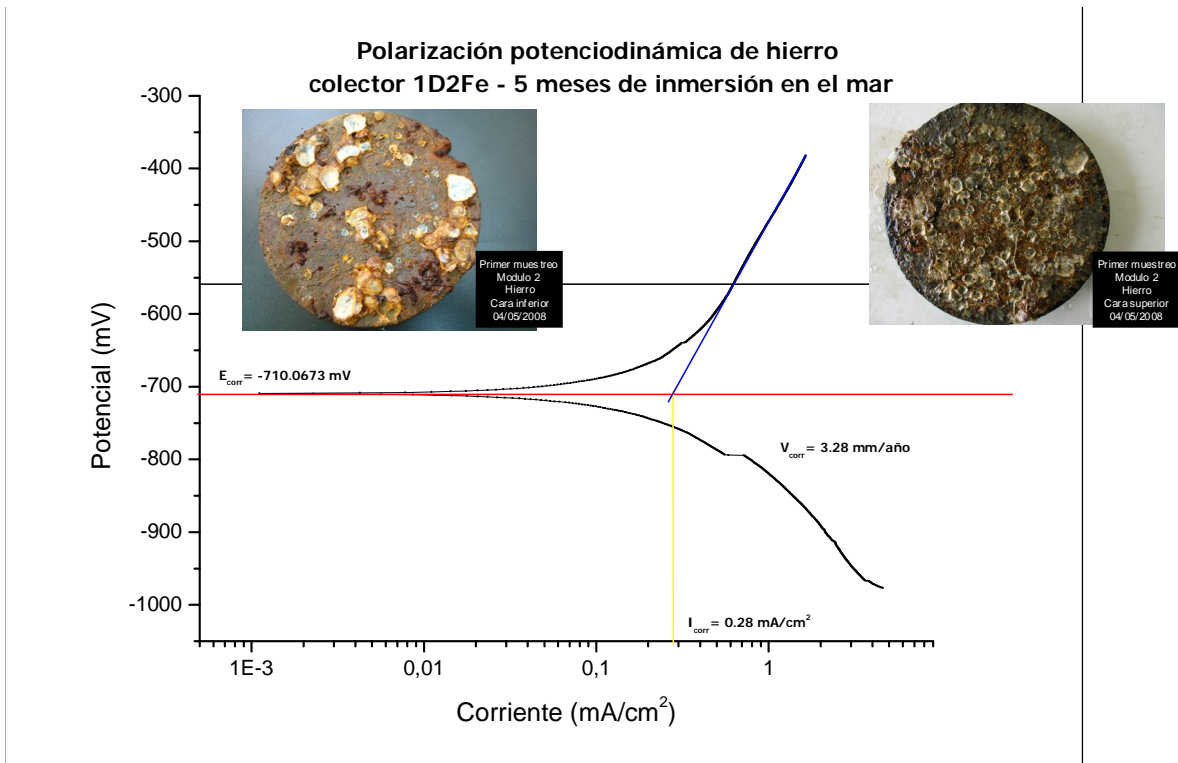
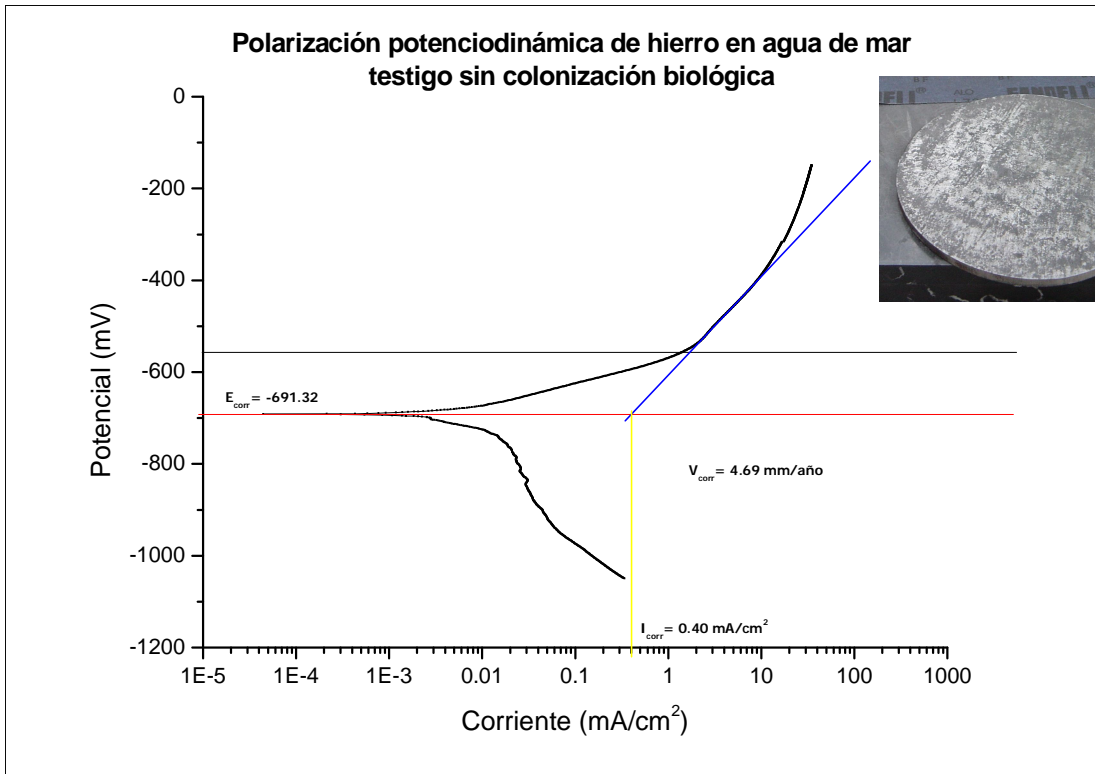
Amphibalanus amphitrite
Muestreo 1
Colector 2D2Fe_superior
Imagen ID 3-9

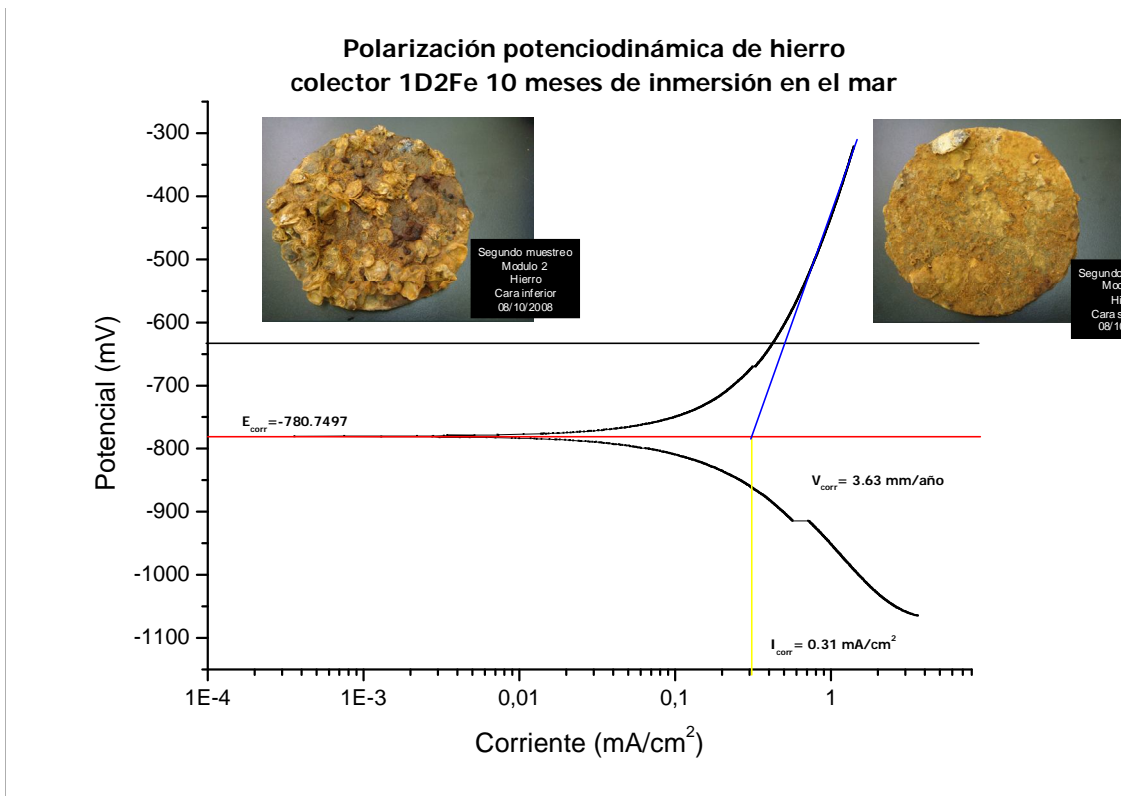
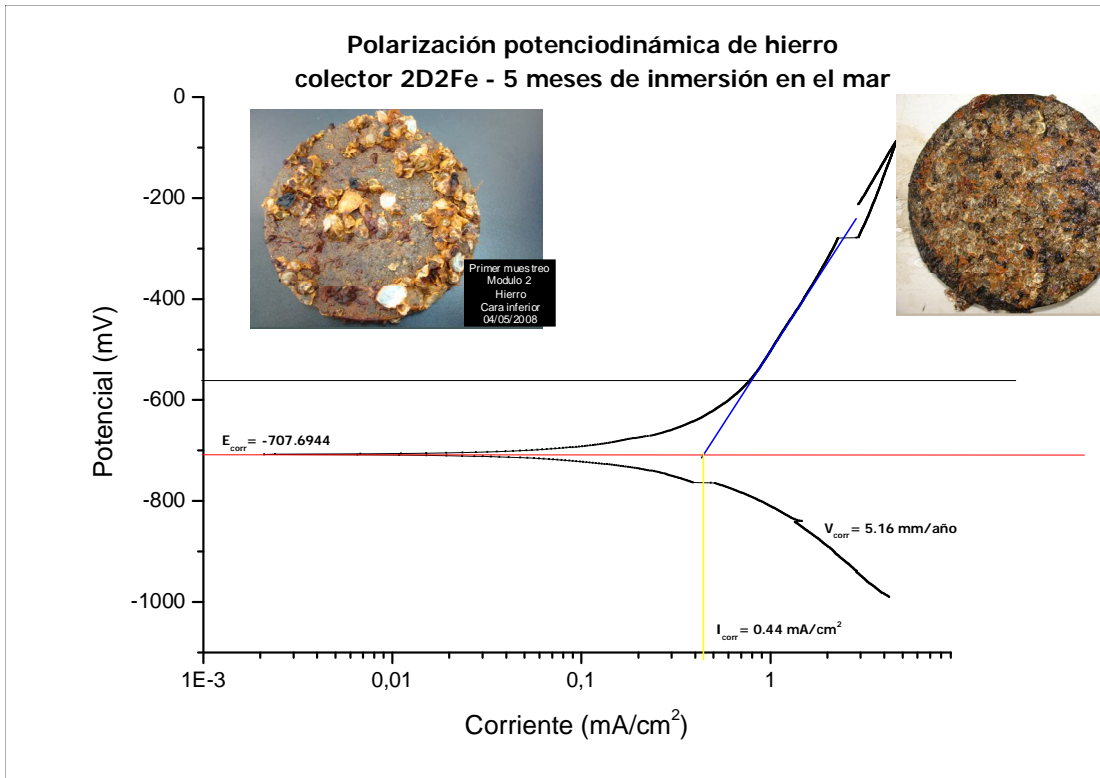


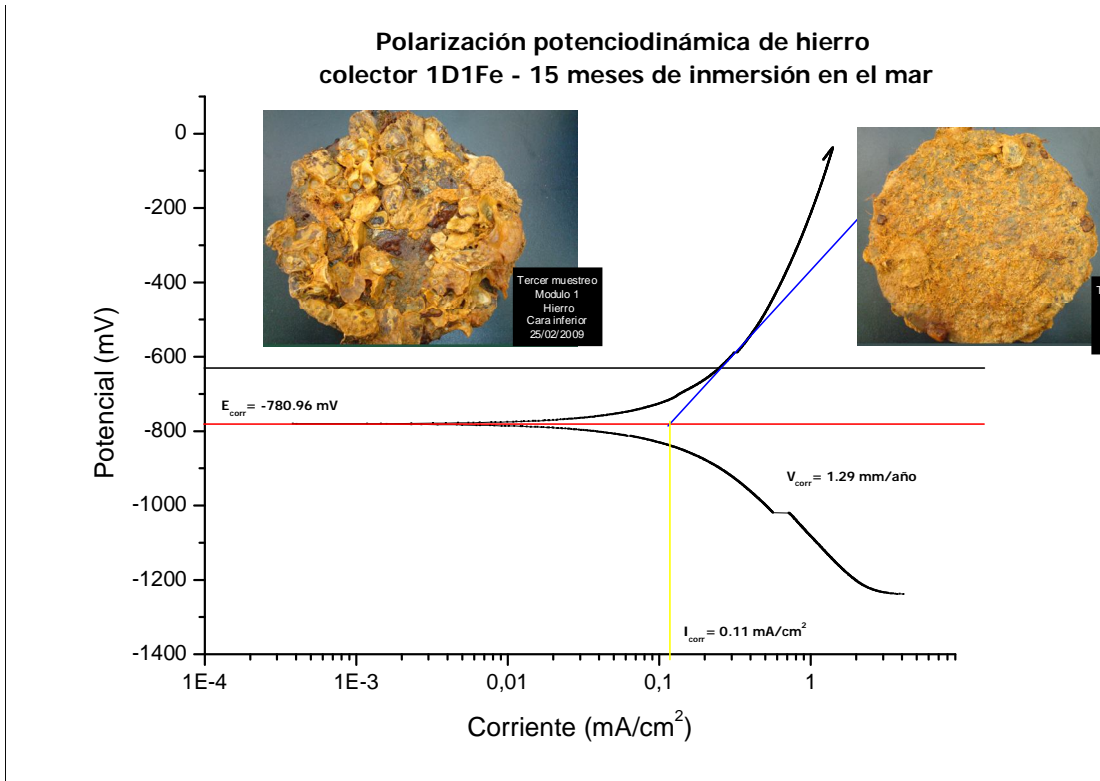
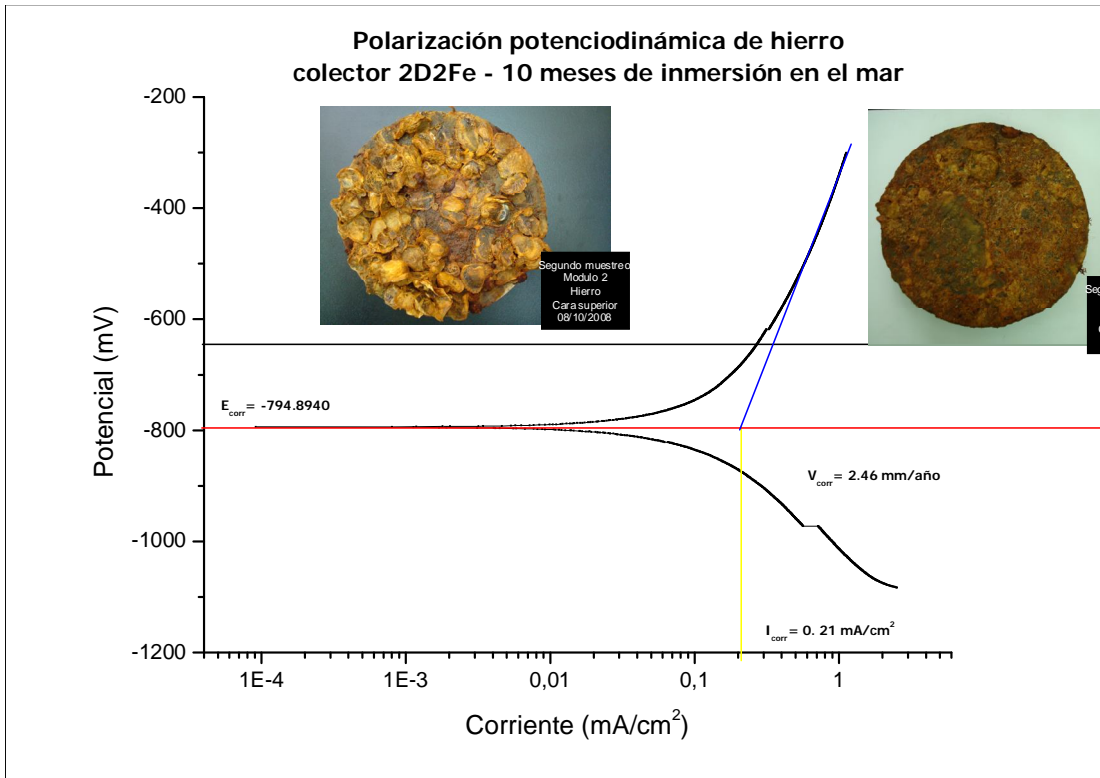
spp (Ischyroceridae)
Muestreo 1
Colector 3D1Fe_superior
Imagen ID 3-2

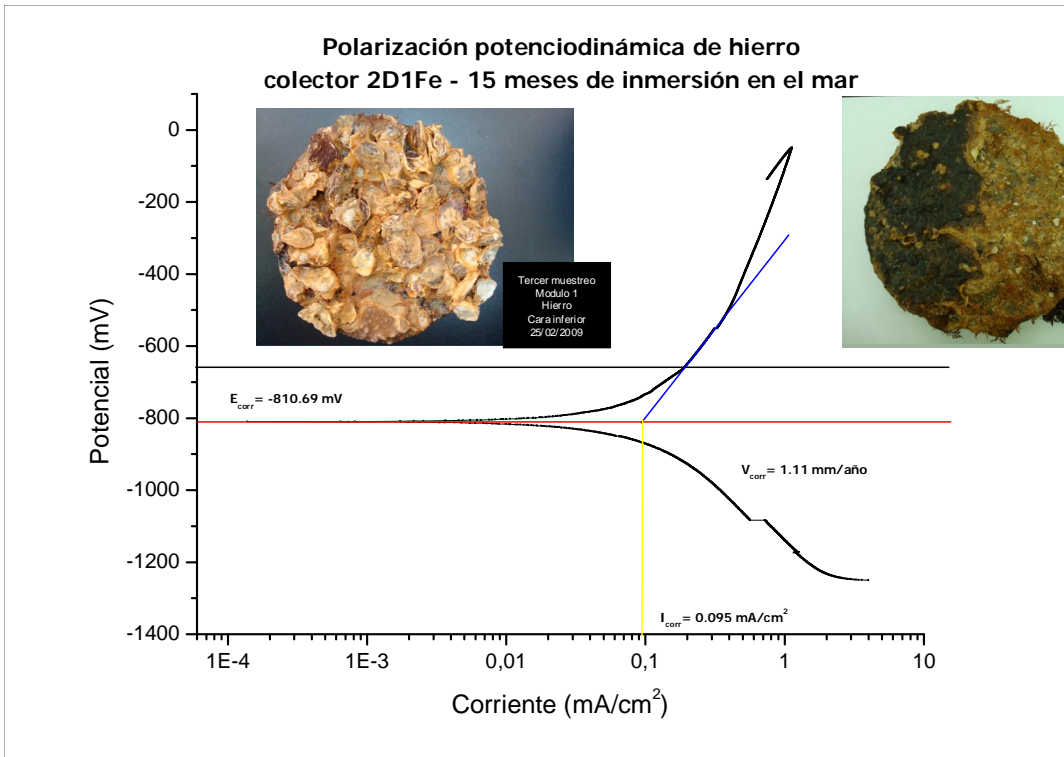
ANEXO II
CURVAS DE POLARIZACIÓN POTENCIODINAMICA

HIERRO









BRONCE

