

00586
3



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

CORROSIÓN MICROBIANA AEROBIA EN EL
INTERIOR DE ACUEDUCTOS DE LA INDUSTRIA
PETROLERA

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN INGENIERÍA
(MATERIALES - CORROSIÓN)

P R E S E N T A

Biol. Juan Manuel Romero Domínguez

DIRECTOR DE TESIS
Dr. Lorenzo Martínez Gómez



MÉXICO, D. F.

2003.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

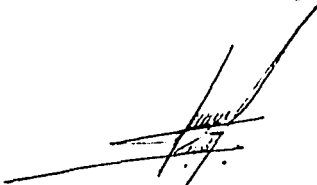
Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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.

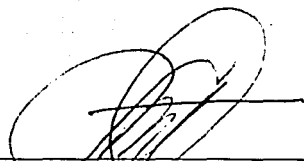
PAGINACIÓN DISCONTINUA

JURADO ASIGNADO

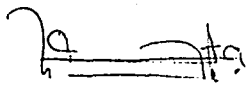
Presidente:	Dr. Rodolfo Quintero y Ramírez	(IMP)
Primer Vocal:	Dr. Ramiro Pérez Campos	(IMP)
Segundo Vocal:	Dr. Rafael Vázquez Duhalt	(IBT)
Tercer Vocal:	Dr. Eduardo Bárzana García	(FQ)
Secretario:	Dr. José Gonzalo González Rodríguez	(UAEM)
Primer Suplente:	Dr. Joan Genescá Llongueras	(FQ)
Segundo Suplente:	Dr. Gerardo Antonio Rosas Trejo	(UMSNH)


Biol. Juan Manuel Romero Domínguez

Sustentante


Dr. Lorenzo Martínez Gómez

Director de tesis


Dr. Manuel G. Amaya Malpica

Codirector de tesis

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: JUAN MANUEL

ROMERO DOMÍNGUEZ

FECHA: 18/11/2003

FIRMA: 

México, D. F.

Noviembre, 2003.

J.M. Romero

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2

DEDICATORIAS

Dedico este esfuerzo a mi familia:

A ti Mary por que representas el único y gran amor que he tenido en la vida
"Esforzarse a veces es tan difícil, pero vale la pena"
"Lo logramos"

María de Jesús Escobedo Ruiz

A mi princesita Mónica que es el mejor regalo que Dios me ha dado y que me
impulsa día con día para seguir adelante.

"Tu serás lo único de mi, que perdurará cuando termine mi tiempo"

Mónica Romero Escobedo

Una dedicatoria muy especial para mis queridísimos padres que me dieron la vida y
por quienes soy lo que soy, gracias por darme todo su amor en forma incondicional.

"Los llevo siempre en mi corazón"

"Esto también es de ustedes"

Matías Romero
Gloria Domínguez

A mis hermanos y sus familias: Edith, Araceli, Vicente, Mauricio y Matías por todo el
apoyo que siempre me brindan y por las innumerables horas felices que hemos
compartido juntos.

A la familia Escobedo Ruiz, en especial al Sr. Rafael Escobedo Rojas que se nos
adelanto en el camino y la Sra. Lucina Ruiz Espejel, gracias por sus buenos deseos
para que concluyera con éxito esta parte de mi formación y por el cariño que
siempre me brindaron.

**"El tesoro máspreciado del hombre es el amor que profesa a los seres que
ama y por quienes es lo que es, en la vida"**

J.M. Romero

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente al:

Instituto Mexicano del Petróleo

Institución donde me desarrollo profesionalmente y que me brindo todo el apoyo necesario para la culminación exitosa de este proyecto doctoral.

Centro de Ciencias Físicas (UNAM)

Por el soporte que me brindó para hacer de este trabajo algo que valiera la pena.

Facultad de Química (UNAM)

Donde retomé el camino de la academia, que tanta falta me hacia para seguir avanzando profesionalmente.

Activo de Explotación Pol-Chuc (PEP)

Por permitirme estudiar en sus instalaciones de la Región Marina Suroeste, un fenómeno que les atañe y que tienen que controlar día con día. Espero que este trabajo doctoral colabore en algo con el entendimiento del fenómeno de corrosión microbiológica de sus acueductos.

Jurado Asignado

Gracias por la revisión de este documento y por todos su valiosos y amables comentarios y críticas, que contribuyeron de forma muy importante para la presentación final de esta tesis.

Dr. Lorenzo Martínez Gómez

Por la dirección de este trabajo y por el apoyó e impulsó para concluir esta meta profesional de forma inmejorable, pero sobre todo por la amistad que me ha brindado. Gracias por animarme y darme confianza para mi ingreso al SNI.

Dr. Joan Genescá Llongueras

De quien he recibido apoyo incondicional durante el desarrollo y conclusión de este trabajo doctoral. Gracias por la gran calidad humana que hizo patente conmigo.

M. en C. José Luis García Villalobos

Por el soporte ofrecido desde todos los puntos de vista, pero principalmente por confiarme su amistad en toda la extensión de la palabra.

Dr. Manuel Amaya Malpica

Por la codirección de esta tesis y por su orientación para encontrar el camino hacia la publicación internacional de los hallazgos científicos y técnicos, producto de este trabajo doctoral, pero sobretudo por su amistad incondicional y la confianza que siempre me ha mostrado.

A mis amigos de PEMEX Exploración y Producción en especial a los ingenieros **Mario Osornio Vargas y Gildardo San Martín Reboloso** por su valiosa ayuda, palabras de superación y apoyo incondicional para la consecución de esta tesis.

A mis amigos del IMP y en especial al **Dr. Carlos Ángeles Chávez**

Por su soporte en el ámbito de la microscopia electrónica y por su valiosa amistad.

A mis amigos de la UNAM con quienes conviví en esta parte tan importante de mi vida, especialmente al

Ing. Carlos A. González Rodríguez

por su amistad y cooperación en los diferentes proyectos académicos que hemos iniciado.

A mis entrañables amigos

José Fidel Guadarrama Muñoz y Víctor Manuel García Arriaga

Con quienes compartí gran parte del trabajo de campo, en ese equipo tan sólido que formamos y que sigue vigente hasta ahora.

•
•
•
•
•
•

"Mil Gracias"

A todos los que de una u otra forma me apoyaron y contribuyeron en mayor o menor grado durante el desarrollo y conclusión de este proyecto doctoral.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5

ÍNDICE

CONTENIDO	i
RESUMEN	iv
ABSTRACT	vii
Relación de Figuras.	x
Relación de Tablas.	xiv
CAPÍTULO 1.0 INTRODUCCIÓN	
1.1 Retrospectiva de la corrosión inducida por microorganismos en el interior de acueductos de sistemas de recuperación secundaria.	1
CAPÍTULO 2.0 GENERALIDADES	
2.1 Recuperación secundaria.	6
2.2 Historia general y desarrollo de la inyección de agua.	8
2.3 Complejo de inyección de agua.	11
2.4 Estado del arte de la corrosión inducida por microorganismos.	15
2.5 Fundamentos de la corrosión inducida por microorganismos.	19
2.6 Biopelículas.	24
2.7 Ruido Electroquímico.	28
2.7.1 Interpretación de ruido electroquímico.	32

2.7.2 Ruido electroquímico para detectar corrosión localizada.	38
2.7.3 Ventajas de la técnica de ruido electroquímico.	39
2.8 Biología molecular para la identificación de microorganismos.	40
2.8.1 Análisis de los genes del 16S rRNA.	41
2.8.2 Técnicas moleculares basadas en el gen 16S rRNA.	42
CAPÍTULO 3.0 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	45
CAPÍTULO 4.0 MATERIAL Y MÉTODOS	
4.1 Trabajo de campo.	
4.1.1 Muestreo y análisis del agua de inyección.	47
4.1.2 Muestreo de biopelículas e implementación de bioprobetas.	51
4.2 Trabajo de laboratorio.	
4.2.1 Aislamiento y propagación de bacterias aerobias.	55
4.2.2 Determinación de curvas de crecimiento.	55
4.2.3 Identificación bacteriana, 16S rDNA ribosomal.	56
4.2.4 Caracterización de biopelículas (SEM).	56
4.2.5 Evaluaciones electroquímicas (ENA).	56
CAPÍTULO 5.0 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
5.1 Evaluaciones de campo.	62
5.1.1 Comportamiento bacteriológico y de corrosión 1999.	63
5.1.2 Comportamiento bacteriológico y de corrosión 2000.	69
5.1.3 Impacto de la actividad bacteriana en bioelementos instalados en el interior de acueductos.	73

5.2 Evaluaciones de laboratorio.	83
5.2.1 Aislamiento y propagación de bacterias aerobias.	83
5.2.2 Determinación de curvas de crecimiento.	85
5.2.3 Identificación bacteriológica 16S rRNA ribosomal.	89
5.2.4 Caracterización morfológica de bacterias.	92
5.2.5 Pruebas de Ruido Electroquímico.	93
5.3 Representación esquemática del mecanismo de acción de bacterias aerobias.	107
CAPÍTULO 6.0 CONCLUSIONES	111
CAPÍTULO 7.0 PERSPECTIVAS FUTURAS	113
CAPÍTULO 8.0 BIBLIOGRAFÍA	115
CAPÍTULO 9.0 APÉNDICE	126
9.1 Tablas de resultados.	127

RESUMEN

La importancia que la industria petrolera tiene para nuestro país ha sido uno de los principales detonantes que han impulsado el estudio de la corrosión inducida por microorganismos que afecta sus equipos e instalaciones.

El agotamiento paulatino de los yacimientos petroleros ha requerido la aplicación de técnicas de recuperación secundaria para incrementar las cuotas de producción de petróleo.

Los sistemas de recuperación secundaria basados en la inyección de agua a los yacimientos son utilizados por Petróleos Mexicanos (PEMEX) y son también extremadamente susceptibles al impacto nocivo de microorganismos aerobios y anaerobios, los cuales generan biopelículas sobre las superficies metálicas que quedan expuestas a su actividad metabólica causando fenómenos de biocorrosión.

A través de actividades de campo y laboratorio, en el presente trabajo de investigación se evidenció la importancia que tienen las bacterias aerobias que se desarrollan en el interior de acueductos de un sistema de recuperación secundaria basado en la inyección de agua de mar al yacimiento petrolero, para la corrosión microbiológica.

El monitoreo bacteriológico aerobio realizado a la salida de una planta de tratamiento y bombeo, indicó una alta proliferación de bacterias aerobias, aún después de los tratamientos con biocidas que se adicionan al agua de inyección y de la dosificación de productos químicos secuestrantes de oxígeno. El análisis de los resultados

obtenidos en el trabajo de campo no mostró una correlación entre la población bacteriana aerobia y las velocidades de corrosión determinadas en la planta, utilizando la técnica de resistencia a la polarización que previo a este trabajo doctoral, se encontraba implementada en el complejo de inyección de agua. De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, se demostró que la técnica de resistencia a la polarización no es la técnica idónea para determinar el impacto de la corrosión microbiológica en la superficie interna de los acueductos del sistema.

La identificación de los microorganismos aislados del agua de inyección se realizó a través de la secuenciación del gene 16S rDNA. Los resultados obtenidos fueron comparados con la bases de datos GenBank, RDP (Ribosomal Database Project) y MicroSeq. Los resultados indican que las bacterias aerobias aisladas del sistema de inyección de agua son especies aún no reportadas en las bases de datos mencionadas anteriormente. Los vecinos filogenéticos más cercanos con las especies encontradas fueron: MBA-1B2 con *Vibrio hollisae*, MBA-5B1 con *Alteromonas macleodii*, esto en las tres bases de datos. La bacteria MBA-6A2 tuvo como vecino más cercano a *Ferrimonas balearica* al compararse con GenBank y RDP, mientras que con MicroSeq el vecino más cercano reportado fue *Aeromonas enteropelógenes*. La cepa MBA-9B1 reportó como vecinos más cercanos a: GenBank: *Agrobacterium stellulatum*, : *Rhizobium leguminosarum* y MicroSeq: *Dichotomicrobium thermohalophilum*.

Utilizando en laboratorio las técnicas de ruido electroquímico y cuenta total en placa, se estudió el impacto que en el fenómeno de corrosión tienen, las poblaciones de las 4 cepas de bacterias aerobias aisladas a la salida de planta y en los acueductos del sistema de inyección de agua estudiado. El comportamiento electroquímico mostró que la bacteria MBA-6A2 fue la más agresiva. Su tendencia a 1.0 con respecto al índice de localización determinado, sugiere que dicha bacteria está asociada con el inicio de problemas de corrosión localizada (picaduras) en el interior de los acueductos. Con la misma bacteria se obtuvieron también las velocidades de

corrosión más altas, sobre todo cuando ésta se encontraba en su fase *Lag* de crecimiento.

En orden descendente, la agresividad de las bacterias estudiadas fue como sigue: MBA-6A2, MBA-1B2, MBA-9B1 y MBA-5B1.

La evidencia del efecto de las bacterias estudiadas en el fenómeno de corrosión, se sustentó mediante el uso de la técnica de microscopía electrónica de barrido. Así mismo, se determinó la influencia que tienen en el fenómeno de corrosión microbiológica, los consorcios bacterianos que se desarrollan en el sistema de inyección de agua.

Desde el punto de vista de corrosión, el comportamiento observado en las evaluaciones de laboratorio con las poblaciones de las cuatro bacterias aisladas del sistema de recuperación secundaria, sugiere que la presencia de éstas en ambientes como el estudiado, incrementarán significativamente la incidencia del fenómeno de corrosión localizada en la superficie interna de los acueductos.

ABSTRACT

The importance of the oil industry for the Mexican economy and the high microbiological diversity in the areas of production have impulsed the study of the microbiologically induced corrosion (MIC) phenomena that affect the Mexican oil industry facilities.

The pressure declination in the oil wells induced the use of techniques such as the secondary oil recovery in order to maintain the oil production.

The Mexican oil industry has been using secondary recovery systems (SRS) based on the injection of seawater into the wells. These systems are extremely susceptible to the negative influence of aerobic and anaerobic microorganisms that can form biofilms on metallic surfaces. The presence and metabolic activity of biofilms on metallic surfaces change the physical and chemical properties at the metal-biofilm interface and promote biocorrosive conditions.

In the present research work, the role of aerobic bacteria on MIC phenomena in the inner surface of seawater pipelines used in offshore SRS was investigated, both in the field and in laboratory conditions.

The monitoring of aerobic bacteria performed after the treatment of the seawater, indicated that the aerobic bacterial population was high in the seawater, besides biocides and oxygen scavengers had been previously added to the water. No correlation was found between the aerobic bacterial population and the corrosion rates obtained in field conditions. These values were determined by using the

infrastructure implemented and used by the technical personal that operates the SRS under study.

The resistance polarization (Rp) technique used in field conditions to monitor the corrosion rate in the inner surface of the seawater pipelines was not adequate to determine the impact of MIC phenomena. The microorganisms typically induced localized corrosion while the Rp technique is used to measure uniform corrosion.

The identification of the microorganisms isolated from the seawater of the SRS was realized by 16S r DNA gene sequencing . The genetic sequences obtained were compared with the GenBank, RDP (Ribosomal Database Project), and MicroSeq databases. The obtained gene sequences matches suggested that the aerobic bacterial strains isolated in the SRS are new species not reported previously.

The closest phylogenetic neighbors to the principal species found in the seawater were: *Vibrio hollisae* to the MBA-1B2 strain and *Alteromonas macleodii* to the MBA-5B1 strain in all the three consulted gene databases. For strain MBA-6A2, the nearest match was *Ferrimonas balearica* in GenBank and RDP, and *Aeromonas enteropelógenes* in MicroSeq. Finally, for strain MBA-9B1, the nearest match were *Agrobacterium stellulatum*, *Rhizobium leguminosarum*, and *Dichotomicrobium thermohalophilum* in GenBank, RDP and MicroSeq, respectively.

The role of the bacterial population growth phases on the corrosion of pipeline steel API 5L X52 coupons, obtained from a pipeline steel, was studied using the total plate count and electrochemical noise techniques in laboratory conditions.

The electrochemical noise measurements recorded for the MBA-6A2 strain indicated that the pitting index tended to 1. This indicates the capacity of this bacteria to promote localized corrosion events (pitting). During its the Lag growth phase, this strain showed high corrosion rates compared to the other three strains under study.

After the MBA-6A2 strain, the corrosiveness of the isolated bacteria decreased in the following order MBA-1B2, MBA-9B1, and MBA-5B1, respectively.

The bacterial corrosive effect on the metallic surface was supported with micrographs obtained by environmental scanning electron microscopy (ESEM).

The laboratory corrosion studies results suggest that the presence of these bacteria in the SRS studied can promote or increase significantly the localized corrosion in the inner surface of the seawater pipelines in this system.

RELACIÓN DE FIGURAS

- Figura 1.** Localización de la Región Marina Suroeste de Pemex Exploración y Producción.
- Figura 2.** Complejo de Inyección de Agua Abkatún-Pol-Chuc.
- Figura 3.** Etapas propuestas para el desarrollo de la biopelícula.
- Figura 4.** Estratos que se presentan en una biopelícula típica.
- Figura 5.** Diagrama general para el conteo de bacterias.
Técnica de cuenta total en placa.
- Figura 6.** Diagrama general para el conteo de bacterias.
Técnica de ampoviales (dilución seriada).
- Figura 7.** Arreglo típico para monitoreo de corrosión y biocorrosión en acueductos.
- Figura 8.** Bioprobetas utilizadas en campo para el monitoreo de biopelículas.
- Figura 9.** Esquema de la condición de la bioprobeta en el niple de acceso.
- Figura 10.** Localización final de la bioprobeta en el acueducto.
- Figura 11.** Muestreo de biopelícula formada sobre la superficie de bioelementos.
- Figura 12.** Probeta de tres electrodos nominalmente idénticos.
- Figura 13.** Dispositivo experimental para las mediciones electroquímicas y microbiológicas.
- Figura 14.** Contaminación bacteriana aerobia del agua de inyección, 1999.
- Figura 15.** Población bacteriana promedio, 1999.
- Figura 16.** Control bacteriológico, 1999.
- Figura 17.** Dosificación del secuestrante vs. Población bacteriana.
- Figura 18.** Velocidad de corrosión, 1999.
- Figura 19.** Contaminación bacteriana aerobia del agua de inyección, 2000.
- Figura 20.** Población bacteriana promedio, 2000.

- Figura 21.** Control bacteriológico, 2000.
- Figura 22.** Velocidad de corrosión, 2000.
- Figura 23.** (1) Localización en el interior del acueducto de bioprobeta rasante. (2) Localización en el interior del acueducto de probeta de corrosión. Técnica resistencia a la polarización (R_p).
- Figura 24.** Aspecto de la bioprobeta, antes de su instalación en el interior del acueducto.
- Figura 25.** Aspecto de la bioprobeta, después del periodo de prueba (60 días). Se observó formación de biofilm y presencia de productos de corrosión.
- Figura 26.** Superficie de uno de los bioelementos después del periodo de prueba. Biofilm en apariencia compacto y continuo.
- Figura 27.** Morfología típica del biofilm encontrado en cada una de los bioelementos que tenía la bioprobeta. La presencia de discontinuidades en el biofilm es evidente como se muestra en la marca.
- Figura 28.** Evidencia de la presencia de consorcios microbianos en el interior del biofilm. Los consorcios fueron cultivados en condiciones aerobias, obteniéndose crecimiento positivo.
- Figura 29.** Superficie metálica después de retirarse mecánicamente el biofilm. Se observó un ataque severo en la superficie de los bioelementos. La presencia de picaduras fue evidente.
- Figura 30.** Magnificación de una de las picaduras, se observó la presencia de materia orgánica en su interior.
- Figura 31.** Superficie después de ser lavada con ácido inhibido. Se observó una región con un ataque corrosivo mucho menos agresivo que el resto del elemento. Esta región sirvió de referencia para determinar la pérdida del material metálico.
- Figura 32.** Profundidad en la pérdida del material metálico. La longitud promedio de la profundidad fue de 0.32 mm.
- Figura 33.** Magnificación de las picaduras después de la limpieza ácida del bioelemento. Características morfológicas del ataque corrosivo.

- Figura 34.** Corte perpendicular con respecto de la superficie corroída, de uno de los bioelementos. Morfología de la superficie interna de las picaduras. Se determinaron picaduras de 0.128, 0.178 y 0.065 mm de profundidad.
- Figura 35.** La picadura de mayor longitud encontrada en los bioelementos examinados fue de: 0.34 mm.
- Figura 36.** Placas de aislamiento y caracterización con microscopía óptica de la cepa bacteriana MBA-1B2.
- Figura 37.** Placas de aislamiento y caracterización con microscopía óptica de la cepa bacteriana MBA-5B1.
- Figura 38.** Placas de aislamiento y caracterización con microscopía óptica de la cepa bacteriana MBA-6A2.
- Figura 39.** Placas de aislamiento y caracterización con microscopía óptica de la cepa bacteriana MBA-9B1.
- Figura 40.** Curva de crecimiento de la cepa bacteriana aerobia MBA-1B2.
- Figura 41.** Curva de crecimiento de la cepa bacteriana aerobia MBA-5B1.
- Figura 42.** Curva de crecimiento de la cepa bacteriana aerobia MBA-6A2.
- Figura 43.** Curva de crecimiento de la cepa bacteriana aerobia MBA-9B1.
- Figura 44.** Concentrado de las curvas de crecimiento de las cepas: MBA-1B2, MBA-5B1, MBA-6A2 y MBA-9B1
- Figura 45.** Respuesta de ruido electroquímico en corriente vs Curva de crecimiento cepa MBA-1B2.
- Figura 46.** Respuesta de ruido electroquímico en potencial vs Curva de crecimiento cepa MBA-1B2.
- Figura 47.** Respuesta de ruido electroquímico en corriente vs Curva de crecimiento cepa MBA-5B1.
- Figura 48.** Respuesta de ruido electroquímico en potencial vs Curva de crecimiento cepa MBA-5B1.
- Figura 49.** Respuesta de ruido electroquímico en corriente vs Curva de crecimiento cepa MBA-6A2.

- Figura 50.** Respuesta de ruido electroquímico en potencial vs Curva de crecimiento cepa MBA-6A2.
- Figura 51.** Respuesta de ruido electroquímico en corriente vs Curva de crecimiento cepa MBA-9B1.
- Figura 52.** Respuesta de ruido electroquímico en potencial vs Curva de crecimiento cepa MBA-9B1.
- Figura 53.** Índice de localización vs tiempo para las cepas: MBA-1B2, MBA-5B1, MBA-6A2 y MBA-9B1.
- Figura 54.** R_n vs tiempo para las cepas: MBA-1B2, MBA-5B1, MBA-6A2 y MBA-9B1.
- Figura 55.** Velocidad de corrosión vs tiempo para las cepas: MBA-1B2, MBA-5B1, MBA-6A2 y MBA-9B1.
- Figura 56.** Estratificación de microorganismos dentro de una biopelícula con base en el gradiente de oxígeno
- Figura 57.** Mecanismo de corrosión por la presencia de un biofilm aerobio sobre la superficie metálica.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

RELACIÓN DE TABLAS

- Tabla 3.** Monitoreo bacteriológico 1999 (enero - diciembre).
- Tabla 4.** Monitoreo de velocidades de corrosión 1999 (enero - diciembre).
- Tabla 5.** Monitoreo bacteriológico 2000 (enero - diciembre).
- Tabla 6.** Monitoreo de velocidades de corrosión 2000 (enero - diciembre).
- Tabla 7.** Parámetros de corrosión obtenidos a partir de los valores de ruido electroquímico y población bacteriana de la cepa MBA-1B2.
- Tabla 8.** Parámetros de corrosión obtenidos a partir de los valores de ruido electroquímico y población bacteriana de la cepa MBA-5B1.
- Tabla 9.** Parámetros de corrosión obtenidos a partir de los valores de ruido electroquímico y población bacteriana de la cepa MBA-6A2.
- Tabla 10.** Parámetros de corrosión obtenidos a partir de los valores de ruido electroquímico y población bacteriana de la cepa MBA-9B1.

CAPÍTULO

1.0

INTRODUCCIÓN

1.1 **Retrospectiva de la corrosión inducida por microorganismos en el interior de acueductos de sistemas de recuperación secundaria.**

La industria petrolera de México es sin lugar a dudas uno de los principales pilares que sustentan su economía. Del petróleo se obtienen una gran cantidad de productos derivados que a través del tiempo han transformado la economía de las naciones y el devenir de las personas⁽¹⁾. El petróleo es un recurso natural que tiende a agotarse, por lo que cuando la energía propia de los yacimientos petroleros disminuye, se hace necesaria la aplicación de metodologías de recuperación secundaria o mejorada. En este sentido, la utilización de sistemas de recuperación secundaria basados en la inyección de agua (dulce o de mar), ha sido una práctica que Petróleos Mexicanos puso en marcha desde hace casi 50 años. En la actualidad operan un total de 23 sistemas de inyección⁽²⁾ donde, mediante la aplicación de productos químicos tales como: biocidas e inhibidores de corrosión entre otros, dan tratamiento al agua y la inyectan a los yacimientos para incrementar su presión y en consecuencia, la producción del aceite crudo.

El sistema de recuperación secundaria de mayor impacto y por lo tanto más importante que actualmente opera Petróleos Mexicanos, es el complejo de inyección de agua Abkatún Pol Chuc, el cual es un sistema costa afuera (Región Marina) a

cargo de Pemex Exploración y Producción. La operación de dicho complejo, en la actualidad garantiza la inyección al yacimiento de aproximadamente 250,000 barriles por día (BPD) de agua de mar tratada.

Los problemas de corrosión asociados a la operación de los sistemas de recuperación secundaria son de vital importancia. El control de la corrosión prevee entre otros, contratiempos tales como: paros de planta, mantenimientos mayores como cambios de tramos de tubería, continuidad en las cuotas de producción y contaminación ambiental como resultado de fallas que pueden ser catastróficas.

Entre los problemas de corrosión que se presentan en los sistemas de inyección de agua, los asociados a microorganismos son especialmente relevantes. La intensa actividad microbiológica producto de condiciones óptimas generadas por el medio, trae consigo en mayor o menor grado problemas de corrosión localizada en la superficie interna de los acueductos, equipos y estructuras en general. La formación de biopelículas, las cuales están integradas por consorcios microbianos que interactúan en forma sinérgica, aceleran los problemas de corrosión localizada que pueden dar lugar a picaduras con una alta velocidad de penetración.

La formación y adherencia de biopelículas microbianas en la superficie interna de los acueductos que transportan el agua de mar tratada de la planta de tratamiento hacia las plataformas satélites de inyección, es común en los campos de recuperación secundaria basados en la inyección de agua.^(3, 4) Es bien conocido que la adherencia de dichas poblaciones microbianas en la superficie del metal, constituye un serio problema de corrosión en las diversas operaciones que se realizan para la producción del petróleo.⁽⁵⁾

En México, desde su origen, el tratamiento microbiológico del agua de inyección había sido utilizado y llevado a cabo en una forma un tanto empírica, tanto por los operadores de los complejos como por las compañías de servicios a quienes se les

ha asignado el tratamiento integral del agua de inyección. No es sino hasta la puesta en marcha (1990) del Complejo de Inyección de Agua costa afuera a cargo de Pemex Exploración y Producción, que el tratamiento microbiológico es atendido desde un punto de vista más biológico que inorgánico. No obstante, el entendimiento de los fenómenos de corrosión inducida por microorganismos en esos sistemas, reclama una atención más científica que genere los conocimientos que aplicados a campo, contribuyan con el abatimiento de los fenómenos de corrosión localizada que se presenta en la superficie interna de los acueductos, equipos e instalaciones de los complejos de inyección de agua.

Una de las grandes controversias en el campo de la corrosión microbiológica es la importancia que se le atribuye tanto a las bacterias aerobias como a las anaerobias en este tipo de sistemas. La mayor parte de la literatura está dedicada al estudio de la corrosión inducida por microorganismos anaerobios. Sin embargo, como se verá mas adelante en este proyecto de investigación, la contribución al fenómeno de corrosión de las bacterias aerobias es también considerable.

Por lo anterior, es importante y prioritaria la realización de proyectos de investigación, orientados al entendimiento de los mecanismos a través de los cuales, los microorganismos aerobios actúan en sistemas como el estudiado en este trabajo doctoral. Tal es el caso específico de la determinación de la interacción de bacterias aerobias en el fenómeno de corrosión microbiológica, de la superficie interna de acueductos de sistemas de inyección de agua de mar.

La identificación de los microorganismos relacionados con los procesos corrosivos es rutinariamente realizada utilizando metodologías microbiológicas tradicionales basadas en las características fisiológicas y morfológicas de los microorganismos. Esta identificación, que ha sido desarrollada y optimizada principalmente para bacterias patógenas, tiene serias limitaciones cuando se aplica a microorganismos

aislados de ambientes poco estudiados, dada la alta probabilidad de que en esos ambientes se desarrollen especies hasta ahora desconocidas.

La identificación tradicional basada en el fenotipo con frecuencia es difícil de llevarse a la práctica, debido a que exige pruebas tales como asociaciones DNA-DNA, perfiles lipídicos, caracterización del tipo de peptidoglicana, pruebas con sustratos raros y requiere cepas tipo para comparar los resultados obtenidos. Además de lo anterior, en ocasiones se requieren laboratorios especializados para llevar a cabo la identificación de un microorganismo y en algunos casos no puede llevarse a cabo una identificación completa y con certeza del microorganismo de interés.

Ante la situación anterior, la identificación molecular basada en la secuencia del gen que codifica para la subunidad 16S del RNA ribosomal de las bacterias y arqueas se ha convertido en una opción rápida, relativamente sencilla y económica para la identificación de microorganismos. No tiene la desventaja de las técnicas fisiológicas que con frecuencia exigen pruebas particulares para cada grupo de organismos, y además tiene la ventaja adicional de que los microorganismos de difícil cultivo y crecimiento lento que viven en simbiosis estricta o que no son cultivables, pueden ser identificados a partir de muestras del ambiente en estudio.

Por lo que respecta al monitoreo de la corrosión inducida por microorganismos, los conceptos básicos de la corrosión electroquímica son totalmente válidos. Dichos conceptos se utilizan para interpretar la aceleración de los procesos corrosivos debidos a microorganismos, en diferentes medios acuosos. Se deben tomar en cuenta condiciones aerobias y anaerobias, donde los microorganismos son capaces de adherirse al metal, formar biopelículas y cambiar drásticamente las condiciones electroquímicas de la superficie metálica. Estos cambios pueden inducir corrosión localizada, cambiar la velocidad de la corrosión uniforme o disminuirla.⁽⁶⁾

Entre las técnicas electroquímicas que más recientemente han sido aplicadas en estudios de campo y laboratorio relacionados con el fenómeno de corrosión inducida por microorganismos, se encuentra la de ruido electroquímico.

La técnica de ruido electroquímico es una técnica no perturbativa basada en el monitoreo de las fluctuaciones espontáneas en potencial y corriente sin la aplicación de ninguna señal externa. Esta técnica tiene ciertas ventajas, particularmente en el monitoreo de la evolución espontánea de los procesos de corrosión.⁽⁷⁾ Está considerada como apropiada para el estudio de fenómenos de corrosión localizada, por lo que juega un papel importante para determinar los efectos microbianos en el fenómeno de la biocorrosión.

Sin temor a equivocarnos podemos decir que en la actualidad, los avances en el campo del conocimiento de la corrosión microbiológica han sido debidos al desarrollo y/o adecuación de diversas metodologías como las comentadas en los párrafos anteriores. Aún y cuando, el entendimiento de los mecanismos aerobios y anaerobios a través de los cuales los microorganismos interactúan con la interfase metal/solución, no están hasta el momento totalmente entendidos.⁽⁸⁾

Por lo antes expuesto, los resultados obtenidos en este proyecto doctoral contribuyen en forma significativa con el conocimiento necesario para la optimización de los sistemas de monitoreo y control bacteriológico, tan necesarios para los sistemas de recuperación secundaria basados en la inyección de agua de mar a los yacimientos petroleros. Además de contribuir también con el conocimiento teórico y el desarrollo tecnológico, que en nuestro país, se tiene en el campo multidisciplinario de la corrosión inducida por microorganismos.

CAPÍTULO

2.0

GENERALIDADES

En su devenir tecnológico, Petróleos Mexicanos ha dedicado gran parte de sus esfuerzos en la construcción de sus diferentes redes de ductos. A través de ellas se transportan aceite crudo, productos destilados, gas natural, petroquímicos y agua dulce o marina de acuerdo a sus necesidades operacionales y de transporte, y a lo largo y ancho del territorio nacional.

Con el paso del tiempo y después de muchos años de operación, Petróleos Mexicanos ha confirmado que los ductos son el medio mas confiable, eficiente y económico para el traslado masivo de los fluidos que requiere transportar; lo justifica, la importancia de operar y dar mantenimiento preventivo y/o correctivo en forma eficiente, a los 53 492 Km.⁽²⁾ de ductos que actualmente se encuentran operando en las instalaciones de Petróleos Mexicanos.

2.1 Recuperación secundaria.

En el ámbito de la industria petrolera, cuando se agota la energía propia de los yacimientos petrolíferos, disminuye consecuentemente la producción de los hidrocarburos hasta ser económicamente incosteable y poco atractiva. Bajo estas circunstancias es necesario inyectar al yacimiento un fluido como el agua, gas natural o nitrógeno entre otros, a fin de proporcionarle energía adicional aumentando la producción y la recuperación final de hidrocarburos. A esta forma de explotar los

yacimientos, proporcionándoles energía después de agotarse la propia, se le llama recuperación secundaria.

El Instituto Americano del Petróleo (API), definió el concepto de recuperación secundaria como la actividad encaminada a la obtención de hidrocarburos a través de dos o mas pozos, con la característica de que se adiciona energía externa a la propia del yacimiento. Esta energía se obtiene mediante la inyección de fluidos que pueden ser líquidos o gaseosos y poseen o no un alto nivel de temperatura.⁽⁹⁾

Comúnmente, la energía que se imparte al yacimiento se hace en forma mecánica o calorífica.⁽¹⁰⁾ La energía en forma mecánica se suministra al yacimiento por medio de la inyección de fluidos líquidos o gaseosos, los cuales desplazan el aceite remanente.

El trabajo realizado por el fluido inyectado es igual al producto de la presión de inyección por el volumen. La energía en forma calorífica se refiere a la inyección de vapor de agua o al desarrollo de combustión en el seno de la roca; este tipo de energía es aplicada con la finalidad de disminuir la viscosidad del aceite y por ende aumentar su movilidad.

La recuperación secundaria se lleva a cabo utilizando varios métodos, los cuales han sido experimentados, probados y en su mayoría, aplicados en varios países productores de petróleo.

Entre los métodos más comunes se tienen los siguientes:⁽¹⁰⁾

1. Inyección de agua.
2. Inyección de gas natural.
3. Métodos térmicos.
4. Inyección de miscibles.

5. Inyección de agua con polímeros.
6. Uso de reductores de tensión interfacial.
7. Inyección de micelares.
8. Inyección de micro emulsiones.
9. Inyección de gas inerte.
10. Inyección de espumas.

Tanto la inyección de agua como de gas seco a los yacimientos, son los métodos de recuperación secundaria más utilizados en México. El primer caso, aún y cuando no proporciona la máxima recuperación de hidrocarburos, es el método que desde el punto de vista económico se ha aplicado con mayor éxito en gran parte de las zonas petroleras del mundo.

2.2 Historia general y desarrollo de la inyección de agua.

La inyección de agua es el método dominante entre los de inyección de fluidos a yacimientos e indudablemente a este método se debe el elevado nivel actual de los ritmos de producción y de reserva en los Estados Unidos y Canadá.⁽¹¹⁾ Su popularidad se debe principalmente a cuatro factores: (1) la disponibilidad general del agua, (2) la relativa facilidad con la que se inyecta debido a la carga hidrostática que se logra en el pozo de inyección, (3) la facilidad con que el agua se extiende a través de una formación petrolífera, y (4) la eficiencia que tiene el agua para el desplazamiento del aceite.

En términos generales se reconoce que la primera inyección de agua fue accidental y ocurrió en 1865, en el área de la ciudad de Pithole, Pennsylvania.⁽¹¹⁾ En 1880, John F. Carll llegó a la conclusión de que el agua, al abrirse camino en el pozo desde arenas poco profundas, se movería a través de las arenas petrolíferas y sería benéfica para incrementar la recuperación de aceite.⁽¹²⁾

En el método más antiguo de inyección de agua, primero se inyectaba en un solo pozo; a medida que aumentaba la zona invadida y que en los pozos adyacentes se producía agua, éstos se usaban como pozos de inyección para ampliar el área invadida. Esto se conocía como "invasión en círculo".⁽¹¹⁾

Como modificación de la técnica anterior, Forest Oil Corporation convirtió simultáneamente una serie de pozos a la inyección de agua, formando un empuje lineal.

La primera inyección con un patrón de cinco pozos fue intentada en la parte Sur del campo Bradford en 1924.⁽¹²⁾ En 1931 se inició un proceso de inyección de agua en la arena Bartlesville de poca profundidad del Condado Nowata, Oklahoma.

La primera inyección de agua en Texas se inició en el yacimiento Fry del condado Brown en 1936 y en el curso de 10 años este sistema de recuperación secundaria estaba en operación en la mayoría de las áreas productoras de aceite.

No obstante, fue a principios de la década de los años 50's, cuando se aceptó la aplicación generalizada del proceso de inyección de agua para la recuperación de hidrocarburos.⁽¹¹⁾

En esa misma década en México, Petróleos Mexicanos, en febrero de 1951 iniciaba operaciones de recuperación secundaria en el área de la ciudad de Poza Rica, Ver., campo que aún se encuentra en operación.

A partir de entonces y hasta la fecha, PEMEX Exploración y Producción (PEP) opera un total de 23 sistemas de inyección de agua que se presentan en la tabla 1, la cual muestra los sistemas de inyección que actualmente son operados por PEP durante sus actividades de recuperación secundaria de hidrocarburos.⁽²⁾

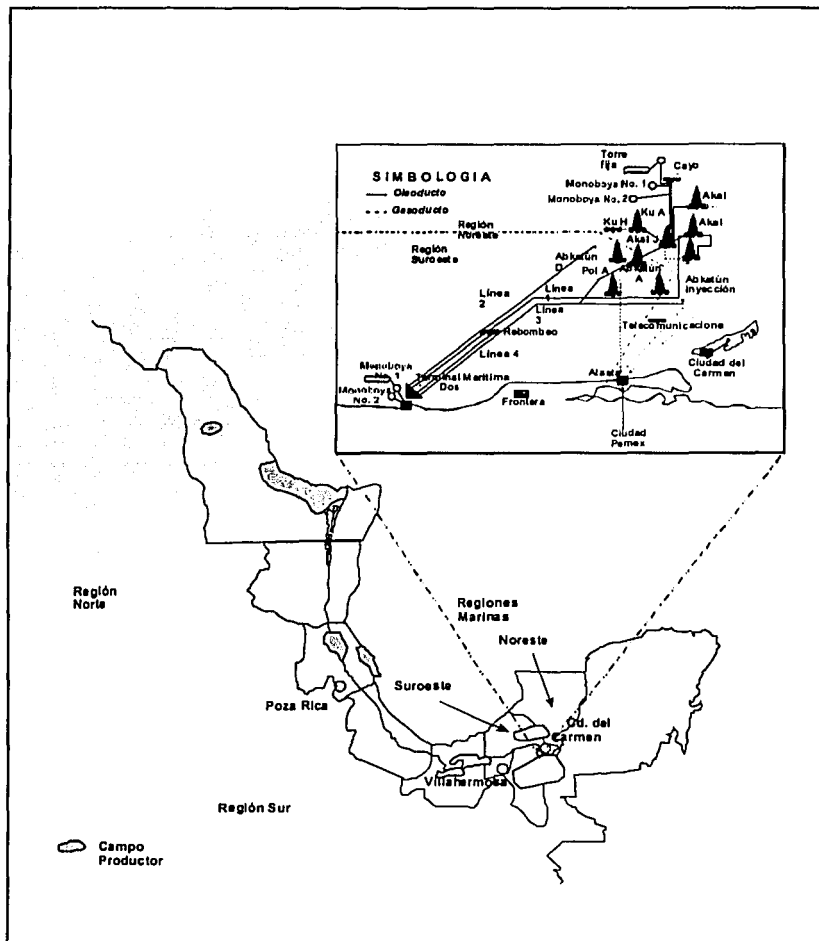
Tabla 1. Sistemas de inyección de agua en operación
PEMEX Exploración y Producción

Localización	Inicio de operación
Poza Rica	02-1951
San Andrés (Jurásico)	07-1961
San Andrés (Cretácico)	11-1968
Hallazgo	11-1978
Tamaulipas - Constituciones (Jurásico)	05-1968
Tamaulipas - Constituciones (Cretácico Inferior "B")	03-1975
Tamaulipas - Constituciones (Cretácico Inferior "A")	06-1975
Tamaulipas - Constituciones (Cretácico Superior)	07-1975
Tamaulipas - Constituciones (Jurásico Tepexi)	08-1975
Arenque	06-1980
Cinco Presidentes (flanco norte)	12-1976
Rodador	08-1978
San Ramón	08-1978
Cinco Presidentes (flanco Sur)	02-1981
Magallanes (flanco norte)	07-1978
Magallanes (este - sureste)	11-1982
Ogarrio ^a	11-1983
Otates	03-1981
Cuichapa	07-1977
Moloacán	01-1991
Bacal	03-1980
Samaria	09-1977
Abkatún-Pol-Chuc	03-1991

2.3 Complejo de inyección de agua.

Desde el punto de vista económico, el proceso de inyección de agua se ha aplicado con bastante éxito en diferentes zonas petroleras de México. Dentro de éstas, destaca por su importancia la Región Marina Suroeste de PEP. (Figura 1)

Figura 1. Localización de la Región Marina Suroeste de PEMEX Exploración y Producción



En la figura anterior y de manera general, se muestra una representación esquemática de las instalaciones petroleras pertenecientes a la Región Marina Suroeste de PEMEX Exploración y Producción, la cual tiene 10 campos productores de aceite: cuatro corresponden al Activo Abkatún, tres al Activo Litoral de Tabasco y tres más al Activo Pol-Chuc. Asimismo, en dicha Región se tienen 123 pozos en producción: 72 corresponden al Activo Abkatún, 14 al Activo Litoral de Tabasco y 37 al Activo de Explotación Pol-Chuc.⁽²⁾

El complejo de inyección de agua en estudio (Abkatún-Pol-Chuc) se ubica en el Activo de Explotación Pol-Chuc (figura 1), el cual se encuentra localizado en la sonda de Campeche a 19° 15' 42" latitud norte y a 92° 12' 24" de longitud oeste y está ubicado a 43.65 millas náuticas de Ciudad del Carmen, Camp., y a 74 millas náuticas del puerto marítimo de Dos Bocas, Tab., México.

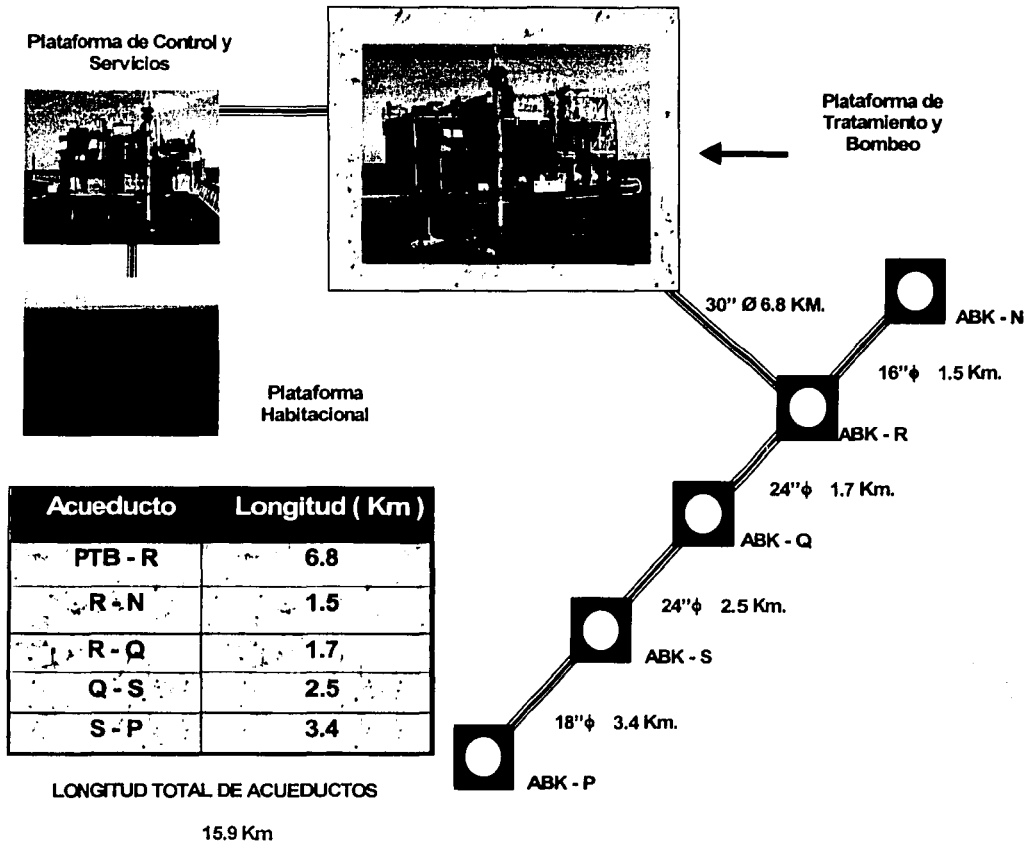
Dicho complejo, está constituido actualmente por ocho plataformas marinas de las cuales cinco son propiamente las de inyección (plataformas satélites de inyección) ABK-N, ABK-R, ABK-Q, ABK-S y ABK-P, además de una de Tratamiento y Bombeo (PTB), una de Control y Servicios (PCS) y finalmente una plataforma Habitacional (H).

Cabe hacer notar que en la actualidad la plataforma de inyección ABK-N, está fuera de servicio, debido a los requerimientos operacionales del Activo y a las cuotas de inyección requeridas por el yacimiento.

En la figura 2 que se presenta a continuación, se muestra un diagrama esquemático tanto del complejo de inyección de agua, como de las plataformas satélites de inyección las cuales están interconectadas por acueductos que transportan el agua de mar tratada hacia los pozos inyectoros.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 2. Complejo de inyección de agua Abkatún - Pol - Chuc



Los acueductos (tuberías de acero) tienen diferentes diámetros y suman una longitud total de 15.9 Km. Estos acueductos llevan un fluido a presión (agua de mar tratada), el cual varía de acuerdo al tipo de operación que se esté realizando.

La operación puede ser a baja presión (18 Kg. con la operación de dos bombas reforzadoras) con lo cual se alcanza un máximo de inyección de 250 000 barriles por

día (BPD) y a alta presión (180 Kg. con la operación de 2 turbo bombas) con lo cual se alcanza un máximo de inyección de hasta 500 000 BPD. Las temperaturas promedio en ambos casos son de 28 y 33 °C respectivamente.

Las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas que se generan en el interior de éstos acueductos, incrementan la posibilidad de que el fenómeno de corrosión y/o incrustación se lleve a cabo. Una de las causas de corrosión interior en este tipo de tuberías es la fijación, crecimiento de microorganismos y generación de biopelículas microbianas integradas por consorcios de poblaciones que coexisten en una matriz de exopolisacáridos.⁽¹³⁾

En la biopelícula muchas bacterias pueden adherirse y coexistir en forma eficiente, cuando son viables y se encuentran en un estado metabólico activo.⁽¹⁴⁾ Entre las poblaciones de microorganismos que integran la biopelícula se pueden mencionar a las bacterias sulfato-reductoras, bacterias del hierro, bacterias del limo, algas, hongos, etc. Por esta razón, en los sistemas de inyección de agua se han creado programas de control que contrarresten el crecimiento microbiológico y por tanto el fenómeno de corrosión microbiana o biocorrosión.

Dichos programas se basan únicamente en la dosificación de productos químicos (biocidas) para controlar el desarrollo microbiano. Sin embargo, se carece de los fundamentos teóricos suficientes, a fin de entender la problemática real ocasionada por el desarrollo de los diferentes tipos de microorganismos ya mencionados, además de los mecanismos de acción de los mismos y su influencia en las velocidades de corrosión que se tienen en el interior de los acueductos de los sistemas de inyección de agua.

Por lo antes expuesto, el estudio y entendimiento del fenómeno de corrosión microbiológica aerobia asociada a estos sistemas petroleros es fundamental para controlar la corrosión y en consecuencia abatir las erogaciones económicas por

concepto de mantenimiento y/o reemplazo de equipos, así como para la prevención de accidentes catastróficos que dañen en forma irreversible el entorno ecológico.

2.4 Estado del arte de la corrosión inducida por microorganismos.

La evaluación del costo de los problemas derivados de la corrosión metálica ha sido un tópico de interés en los países del primer mundo. Así por ejemplo en los Estados Unidos de Norteamérica, Battelle Foundation y el Specialty Steel Industry of North America, establecieron en 1995, que dicho costo representa aproximadamente unos 300,000.00 millones de dólares al año, equivalente al 4.2% de su producto interno bruto (PBI).

Si se considera que de esas cifras, los problemas derivados de la corrosión microbiológica y el biofouling representan aproximadamente un 20%, con base a un estudio realizado en el Reino Unido hacia fines de la década de los 70's, el costo sería del orden de los 60,000.00 millones de dólares al año o un equivalente de aproximadamente el 1% del PBI.⁽¹⁵⁾

Los problemas de corrosión inducida por microorganismos afectan a un gran número de industrias y entre ellas la petrolera, exigiendo una complementación muy amplia de diversas disciplinas por la gran complejidad que adquiere el sistema metal / solución cuando en él se encuentran presentes los microorganismos.^(16, 17)

La corrosión microbiológica no es un problema reciente y registra los antecedentes bibliográficos que a continuación se mencionan:

En 1891, Garret reportó la acción corrosiva sobre el plomo; del amoníaco, nitratos y nitritos producidos por bacterias.

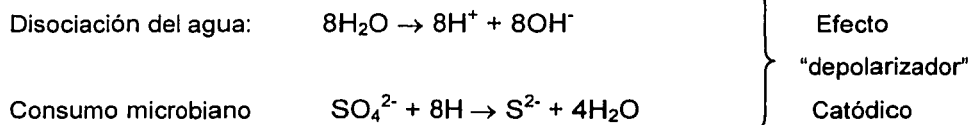
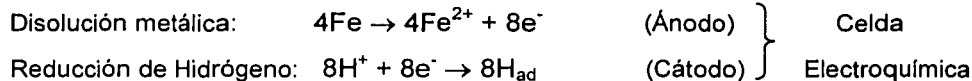
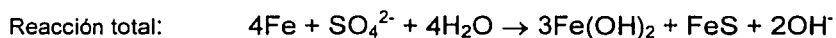
En 1895, Beijerinck reportó la existencia de bacterias que reducen sulfato a sulfuro.⁽¹⁸⁾

En 1910, Gaines⁽¹⁹⁾ estableció que la corrosión del hierro en suelos era debida a la asociación de diversos tipos de bacterias, en especial aquellas vinculadas al ciclo del azufre y ferro bacterias.

En 1919, Ellis y Harder reportaron la formación de depósitos en tuberías de agua por ferro bacterias.⁽²⁰⁾

En 1934, Von Wolzogen Kuhr y Van der Vlugt^(21, 22) propusieron un mecanismo para explicar la acción de las bacterias reductoras del azufre en ausencia de oxígeno, sobre tuberías de hierro enterradas en suelos anegados. Propusieron también, la teoría de la depolarización catódica (TDC), con lo cual se da inicio a los estudios sistemáticos de la corrosión microbiológica.

Las ecuaciones que a continuación se presentan son las originalmente propuestas por Von Wolzogen Kuhr y Van der Vlugt.^(18, 21, 23)



En el campo de la corrosión microbiológica, los microorganismos más estudiados son las bacterias sulfato reductoras (BSR). El genero Desulfovibrio fue descubierto por Beijerinck en 1895 y relacionado con la corrosión anaerobia de metales en 1934.⁽¹⁷⁾

Hasta los años 40's las principales investigaciones giraban alrededor de la ecología y fisiología de las bacterias sulfato reductoras y su efecto en la corrosión de ductos y equipos de la industria petrolera.

La puesta en operación de sistemas de recuperación secundaria en los años 50's y 60's renovó en forma significativa el interés en el entendimiento de los fenómenos de corrosión microbiana.

Durante los años 70's y 80's el concepto de "biofouling" tomo gran interés en la comunidad científica. El estudio de la naturaleza física y química de las sustancia exopoliméricas o exopolisacáridos tuvo mayor atención^(24, 25) La importancia que tienen las biopelículas en el fenómeno de corrosión microbiológica fue estudiada a mediados de los años 80's y 90's. La microscopía electrónica como herramienta ofreció precisión e imágenes con una alta resolución de células vivas y biopelículas hidratadas a finales del siglo XX.

Con respecto a las técnicas electroquímicas, en los años 90's, éstas fueron afinándose para ser utilizadas en los estudios de biocorrosión.⁽²⁶⁾ Las técnicas de impedancia electroquímica y ruido electroquímico han sido evaluadas con buenos resultados para ser utilizadas en dichos estudios.

Por su trascendencia, el fenómeno de corrosión microbiológica, ha generado una gran expectativa a nivel mundial. Así por ejemplo, asociaciones internacionales como la National Association of Corrosion Engineers (NACE), USA, dentro de su comité T-3 Corrosion Science and Technology ha creado el Subcomité T-3-J Microbiologically Influenced Corrosion.

De igual forma, la Universidad de Montana, USA., ha creado el "Center for Biofouling Engineering".

Así mismo, la relevancia que este fenómeno representa para la industria en general ha sido el detonante para la formación de diferentes grupos de investigadores e instituciones prestigiadas tales como:

- Gas Research Institute.
- Bioindustrial Technologies Inc.
- University of Calgary.
- Tennessee University., Knoxville.
- India Oil & Natural Gas Corp.
- Universidad de la Plata, Argentina.
- Elf Aquitaine.
- Instituto Mexicano del Petróleo.
- Naval Research Institute.
- National Science Foundation.
- Etc.

Desde cualquier punto de vista en el que se estudie el fenómeno de corrosión, la importancia de determinar los cambios que experimenta la interfase metal solución es obvia. Los avances en el conocimiento sobre la interacción de los microorganismos con la superficie metálica y sobre los procesos de bioensuciamiento, además de su interacción con las biopelículas y la importancia de la producción de exopolisacáridos, marcarán algunas de las líneas sobre las investigaciones futuras de la corrosión microbiológica aerobia y anaerobia.⁽¹⁶⁾

Otro de los aspectos relevantes de las investigaciones futuras será sin duda la explicación de los patrones de colonización de la superficie metálica. La interacción de los microorganismos que integran los consorcios bacterianos y su distribución en la biopelícula también tendrán que ser dilucidados.

Sin duda alguna, las perspectivas futuras en el campo de la corrosión microbiológica estarán sustentadas con el desarrollo de disciplinas como la biología molecular, para la identificación "in situ" de microorganismos y técnicas de microscopía electrónica

aún mas sofisticadas que permitan observar y caracterizar desde un punto de vista morfológico al microcosmos que se relaciona con los procesos corrosivos.

2.5 Fundamentos de la corrosión inducida por microorganismos.

La corrosión inducida por microorganismos (MIC) es también conocida como corrosión biológica, corrosión influenciada biológicamente, corrosión microbiana o biocorrosión.⁽²⁷⁾ Se define como un proceso electroquímico donde la participación de los microorganismos es capaz de iniciar, facilitar o acelerar la reacción de corrosión, sin modificar su naturaleza electroquímica.

Los microorganismos pueden ser clasificados de acuerdo a su capacidad de crecer en presencia o ausencia de oxígeno. Los que requieren oxígeno para su metabolismo son microorganismos aerobios, los que se desarrollan en condiciones libres de oxígeno son anaerobios.⁽²⁸⁾

Si tomamos en cuenta que cada microorganismo involucra uno o más productos metabólicos de posible actividad corrosiva, que el medio circundante a la interfase metal / solución puede ser drásticamente modificado por su metabolismo, pero sobre todo, que generalmente la presencia microbiana es la resultante de asociaciones de diversas especies (consorcios) que actúan sinérgicamente en la producción de estos efectos, resultará fácil entender porqué situaciones de corrosión sumamente frecuentes en la práctica carecen aún de mecanismos que las interpreten o de sistemas de protección o prevención efectivos.

Es claro entonces, que todo proceso de corrosión microbiológica involucra en forma activa tres elementos fundamentales, el metal, la solución y los microorganismos.⁽¹⁶⁾

De acuerdo con lo anterior, la corrosión microbiológica no es, en lo fundamental, diferente de algún otro tipo de corrosión electroquímica, simplemente se debe considerar que las condiciones físicas y químicas que dan lugar al medio agresivo, son la causa de los productos del metabolismo de los microorganismos.⁽²⁹⁾

En las superficies metálicas el crecimiento bacteriológico puede alterar al micro ambiente en forma local, por ejemplo generando gradientes en la concentración de oxígeno y pH, excretando ácidos orgánicos o formando biopelículas de consorcios bacterianos.^(30, 31)

Los procesos metabólicos de los microorganismos son sustentados por reacciones químicas para la generación de energía, a través de la asimilación de nutrientes que se encuentran en el medio circundante. Dichos procesos influyen el comportamiento de la corrosión de los materiales metálicos, introduciendo o incrementando la heterogeneidad de la superficie metálica por las siguientes condiciones:^(6, 32)

- Destruyen las películas protectoras de las superficies metálicas.
- Producen ambientes ácidos localizados.
- Crean depósitos corrosivos.
- Alteran las reacciones anódicas y catódicas, dependiendo del ambiente y el o los microorganismos involucrados.
- Interfieren con los mecanismos de protección contra la corrosión.

No obstante lo anterior, se debe tomar en cuenta que la simple presencia de microorganismos en un sistema, no necesariamente es indicativo de que ellos son causa de problemas ya que las poblaciones de bacterias que son problemáticas en un sistema específico, pueden ser inocuas en otro sistema diferente.⁽³³⁾

Diferentes tipos de microorganismos en agua o suelos pueden potencialmente participar en la biocorrosión de algunos tipos de metales y aleaciones.^(32, 35)

La corrosión microbiológica de la superficie interna de ductos ocurre con un alto porcentaje de probabilidad en las zonas del ducto que contienen agua, sales inorgánicas, microorganismos y diversas fuentes de nutrientes (hidrocarburos y detritus) que están en contacto con el acero por períodos prolongados de tiempo.⁽³⁴⁾

Bajo las condiciones anteriores puede ocurrir la colonización microbiana con la consecuente formación de biopelículas que en última instancia, serán iniciadoras del fenómeno corrosivo de tipo localizado.

La corrosión microbiológica de ductos ha sido documentada e involucra bacterias aerobias, anaerobias, formadoras de limo, productoras de ácidos, sulfato reductoras, reductoras de nitratos y oxidantes y reductoras del hierro. De cada uno de esos grupos fisiológicos puede haber un gran número de especies individuales.⁽³⁴⁾ Con base en lo anterior, es de esperarse que en sistemas industriales como el estudiado, las poblaciones microbianas muestren una gran variabilidad en períodos cortos de tiempo.

Las biopelículas que se forman en condiciones de aireación, generalmente originan un tipo de corrosión llamado celdas de aireación o concentración diferencial.⁽²⁷⁾ La corrosión aeróbica ocurre cuando por alguna razón, la película de óxido es dañada o el oxígeno es atrapado por los microorganismos adheridos a la superficie metálica. La condición antes descrita originará rápidamente picaduras por debajo de la biopelícula.⁽³⁶⁾

En términos generales algunos de los grupos de microorganismos que la literatura reporta como comúnmente relacionados con los procesos de corrosión

microbiológica son los que se enumeran en la tabla 2 que se presenta a continuación:^(37, 38)

Tabla 2. Microorganismos comúnmente implicados en biocorrosión

Género o Especie	Rango de PH	Temperatura (°C)	Requerimiento de oxígeno
<u><i>Desulfovibrio desulfuricans</i></u>	4 – 8	10 – 40	Anaerobia
<u><i>Clostridium sp</i></u>	6 – 8	10- 40	Anaerobia
		algunas de 45 – 75	
<u><i>Desulfomonas</i></u>		10 - 40	Anaerobia
<u><i>Thiobacillus thiooxidans</i></u>	0.5 – 8	10 – 40	Aerobia
<u><i>Thiobacillus ferrooxidans</i></u>	1 - 7	10 - 40	Aerobia
<u><i>Gallionella</i></u>	7 – 10	20 - 40	Aerobia
<u><i>Sphaerotillus</i></u>	7 – 10	20 - 40	Aerobia
<u><i>Pseudomonas</i></u>	4 - 9	20 - 40	Aerobia
<u><i>P. aeruginosa</i></u>	4 - 8	20 – 40	Aerobia
<u><i>Cladosporium resinae</i></u>	3 - 7	10 – 45 30 - 35	...

Dentro de los microorganismos enumerados en la tabla anterior las bacterias sulfato-reductoras han sido motivo de numerosos estudios, para determinar su influencia directa o indirecta en los fenómenos de corrosión de instalaciones expuestas a medios que las contengan. No obstante lo anterior, diversas publicaciones científicas también han mostrado el interés que la comunidad tiene con respecto a las bacterias aerobias que se desarrollan en diversos procesos industriales.

Generalmente, los microorganismos son estudiados como poblaciones y no como células individuales.

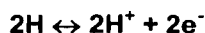
Los efectos sinérgicos de algunas de las propiedades de los microorganismos tales como su metabolismo y velocidad de crecimiento, pueden explicar porqué la interfase o intercara metal / solución cambia grandemente cuando los microorganismos se encuentran presentes y porqué su presencia puede incrementar significativamente las velocidades de corrosión.⁽³⁹⁾

Por lo que respecta a los mecanismos involucrados en el fenómeno de corrosión inducida por microorganismos, la influencia de bacterias sulfato-reductoras⁽²²⁾ es el fenómeno que está mas documentado en la literatura, donde artículos como la revisión de Iverson⁽⁴⁰⁾, Miller and Tiller⁽⁴¹⁾ y el trabajo de Postgate⁽⁴²⁾ orientado al entendimiento de la ecología, fisiología y bioquímica de las bacterias sulfato reductoras, son un pilar fundamental en el campo de la corrosión microbiológica.

El punto de mayor discusión es el que se refiere a los mecanismos a través de los cuales el fenómeno ocurre, y principalmente dicha discusión está relacionada con los siguientes aspectos:

- Las limitaciones que los experimentos de laboratorio tienen para reproducir las velocidades de corrosión observadas en el campo.

- El papel de la enzima hidrogenasa en el proceso, la cual produce la siguiente reacción:



- El papel de las bacterias y otros microorganismos en la depolarización catódica.
- La influencia de las concentraciones de hierro en la solución en la velocidad de corrosión y el papel que los microorganismos tienen en la formación y producción de una película protectora de sulfuro.

2.6 Biopelículas

La biopelícula (biofilm) puede ser definida como un conglomerado microbiano compuesto por bacterias, algas y otros microorganismos.⁽²⁷⁾ También se define como una matriz gelatinosa de material polimérico extracelular (MPE) de naturaleza polisacárida, con un elevado contenido de agua (aproximadamente 95% de la masa), células microbianas y detritus inorgánicos.⁽⁴³⁾

Diversas especies de microorganismos forman biopelículas sobre la superficie de diferentes materiales metálicos.⁽⁴⁴⁾ Las biopelículas se generan instantáneamente cuando una superficie metálica es sumergida en agua⁽⁴⁵⁾ y en consecuencia se incrementa la velocidad de corrosión del sistema.^(46, 47)

Investigaciones recientes han revelado que muchas biopelículas tienen una estructura heterogénea y que los microorganismos se agrupan en "clusters", formando micro ambientes donde las características químicas son claramente distintas al medio circundante.⁽⁴⁸⁾

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

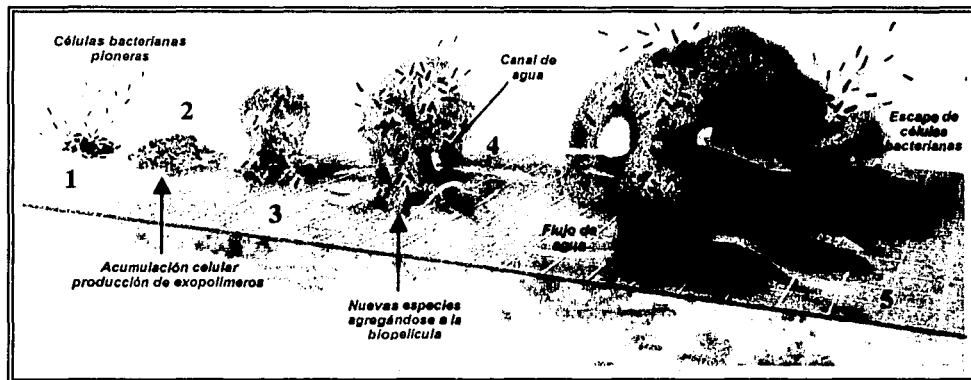
La corrosión ocurre como consecuencia de la formación no uniforme de la biopelícula y el desarrollo de micro colonias sobre la superficie metálica, que generan gradientes de concentración de oxígeno y celdas de aireación diferencial.⁽⁴⁹⁾

No obstante lo anterior, algunas bacterias aerobias de los géneros *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Serratia* han sido reportadas como inhibidoras de corrosión.^(50, 51, 52)

Las bacterias aerobias pueden crear micro ambientes anaeróbicos en la biopelícula, coadyuvando al establecimiento y colonización de bacterias anaerobias como las sulfato reductoras que promueven o incrementan el fenómeno corrosivo.⁽⁵³⁾

Diferentes autores han abordado el tema de las etapas involucradas en la formación de la biopelícula, en términos generales coinciden en que en un principio se lleva a cabo el transporte y adsorción de moléculas orgánicas e inorgánicas del seno del líquido al sustrato, además existe el consenso de que el desarrollo de la biopelícula o "biofilm" ocurre de acuerdo a las etapas que se presentan en la figura 3.^(54, 55, 56)

Figura 3. Etapas propuestas para el desarrollo de la biopelícula.⁽⁵⁶⁾



1. Células bacterianas nadando libremente hacia la superficie metálica, para adherirse a ella (pioneras) y distribuirse en grupos o "clusters".
2. Acumulación de células bacterianas que empiezan a producir una matriz "pegajosa" de material polimérico extracelular.
3. Las células se envían señales unas a otras para multiplicarse y formar las colonias que y en consecuencia generarán la biopelícula.
4. Los gradientes químicos dentro de las colonias incrementan y promueven la coexistencia de diversas especies y estados metabólicos. Se da también la acumulación de material orgánico e inorgánico.
5. Algunas células regresan a su forma de vida libre y escapan, quizá para formar nuevas biopelículas.

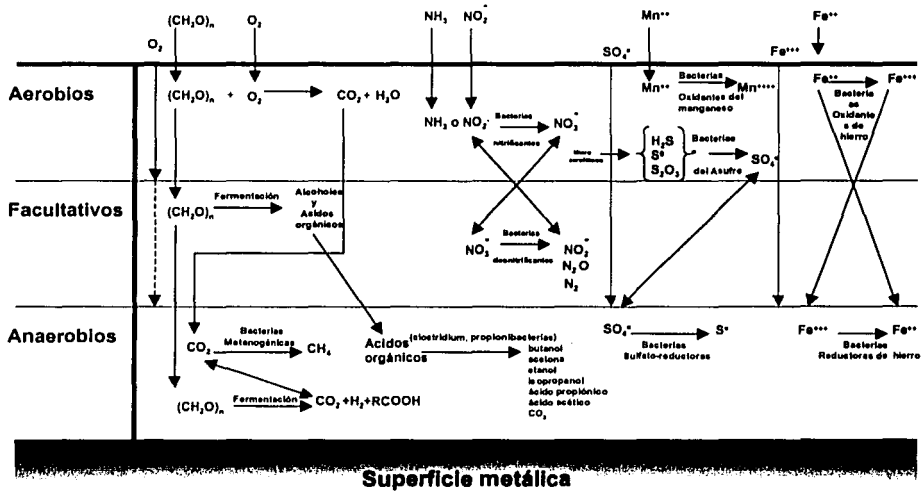
Los procesos biológicos e inorgánicos tienen lugar en un medio acuoso,⁽⁵⁷⁾ de esta forma la biopelícula es generalmente considerada como una acumulación indeseable de depósitos de naturaleza biológica sobre una superficie en particular.⁽⁴³⁾

Las células microbianas pueden ser sésiles (adheridas a la superficie metálica) o planctónicas (que se mueven con el flujo del agua). Estos términos generalizan un sistema de agua en el cual algunos microorganismos se adhieren a las paredes del metal y otros flotan en el fluido.

En suelos y agua, la mayoría de los microorganismos se encuentran más en un estado sésil que en uno planctónico. Los microorganismos sésiles usualmente forman una biopelícula a través de la elaboración de polímeros extracelulares,⁽⁵⁸⁾ esa biopelícula retiene agua, acumula nutrientes y forma una matriz polimérica.

El "biofilm" presenta tres estratos dentro de los cuales los microorganismos que están involucrados realizan diferentes reacciones,⁽⁵⁹⁾ como las propuestas en el modelo de la figura 4 que se muestra a continuación:

Figura 4. Estratos que se presentan en una biopelícula típica.



Cuando las biopelículas se expanden y los microorganismos que las componen se desarrollan, se manifiesta entonces el "biofouling", que es un término general que describe a todas las formas de crecimiento biológico en una superficie en contacto con aguas naturales.⁽⁶⁰⁾

El "biofouling" por ejemplo, puede reducir el flujo de agua en un intercambiador de calor, minimizando con esto las propiedades de transferencia de calor y por lo tanto la pérdida de eficiencia del sistema.⁽⁶¹⁾

Gran parte de los sistemas de agua son localizaciones atractivas para el crecimiento microbiano y la formación de biopelículas, esos sistemas pueden llegar a actuar como verdaderas incubadoras dado que presentan condiciones como las siguientes:

- El agua contiene gran cantidad de nutrientes.
- En ocasiones está altamente oxigenada.
- Son procesos abiertos o cerrados que tienen diversas fuentes de contaminación.
- Mantienen una temperatura de 27 a 60°C
- El pH esta entre 6 y 9.
- Etc.

Las condiciones anteriores promueven el desarrollo microbiano y la consecuente formación de "biofouling" en la superficie de los materiales metálicos en contacto con el agua.⁽⁵⁵⁾

Cuando una biopelícula induce un fenómeno de corrosión en las superficies metálicas, entonces se puede decir que se está llevando a cabo un proceso de biocorrosión,⁽⁶²⁾ donde el factor clave para la alteración de las condiciones de la superficie metálica y con esto el incremento o retardo de la velocidad de corrosión, es precisamente la biopelícula.⁽⁶³⁾

2.7 Ruido electroquímico.

El concepto de ruido electroquímico tiene como antecedente principal el trabajo realizado por Iverson en 1968⁽⁶⁴⁾, quién observó las variaciones de voltaje producidas de varias muestras metálicas sumergidas en soluciones corrosivas sin la aplicación de fuentes externas de energía (corriente o voltaje).

Desde entonces se han publicado una serie de trabajos que basan su experimentación en la medición de las variaciones en corriente y potencial.

En los últimos años, el ruido electroquímico se ha constituido como una poderosa técnica alternativa para el análisis de la corrosión, no solamente por el hecho de ser una técnica no perturbativa (no se requiere introducir alguna variable al sistema electroquímico, como corriente o voltaje), sino porque a partir del análisis de la información obtenida con ella, es posible inferir acerca del tipo de mecanismo que gobierna la corrosión, ya sea general⁽⁶⁶⁾ u homogéneo o del tipo localizado.^(65, 66, 67, 68, 69, 70)

Es por lo anterior, que la técnica de ruido electroquímico ha surgido como una excelente herramienta para el seguimiento continuo en línea de la velocidad de corrosión.^(71, 72, 73)

El ruido electroquímico es un término general que describe las fluctuaciones espontáneas, las cuales son de baja frecuencia (< 10 Hz) y de baja amplitud, tanto del potencial como de la corriente en los sistemas electroquímicos.⁽⁷⁴⁾

El ruido electroquímico se origina, en parte, de las variaciones naturales en la cinética electroquímica durante un proceso de corrosión. Este es frecuentemente visto, como fenómeno aleatorio (estocástico) acoplado a una cinética determinística.

Existen esencialmente dos métodos para medir el ruido en potencial:

- El potencial de un electrodo de trabajo con respecto a un electrodo de referencia de bajo ruido (por ejemplo, electrodo saturado de calomel).
- El potencial entre dos electrodos de trabajo equivalentes (nominalmente idénticos). En este caso ambos electrodos producirán cantidades iguales de

ruido,⁽⁸¹⁾ sobre todo al inicio de la evaluación cuando se considera que existe simetría en la cinética de ambos.^(75, 76, 77)

El método utilizado tiene una influencia directa en las mediciones de ruido en potencial. Cuando se emplea un electrodo de referencia, la diferencia de potencial es relativamente grande, en el intervalo de 100 mV a 1 V;⁽⁷⁸⁾ por lo cual es realmente difícil medir las pequeñas fluctuaciones derivadas del fenómeno electroquímico.

Por otra parte, el uso de dos electrodos nominalmente idénticos tenderá a perder algún cambio transitorio inicial en potencial, por ejemplo, como consecuencia de la generación de productos de corrosión, debido a que los dos electrodos producirán el mismo cambio en potencial.

Como con el potencial, también existen dos formas de medir el ruido en corriente:

- La corriente que fluye a través del electrodo de trabajo en un nivel de potencial establecido (potenciostáticamente controlado).^(79, 80) Este método se utiliza cuando se estudian transitorios de corriente, como en el "nacimiento y muerte" de picaduras.
- La corriente que fluye entre dos electrodos de trabajo nominalmente idénticos. Este método es útil cuando se requiere medir simultáneamente el ruido tanto en corriente como en potencial.

Una vez que se mide el ruido en corriente y potencial, es posible después de un análisis estadístico, dividir la desviación estándar del potencial entre la desviación estándar de la corriente para obtener un valor con unidades de resistencia, conocido como resistencia electroquímica de ruido, R_n (ENR por su denominación en inglés: *Electrochemical Noise Resistance*).^(81, 82, 83, 84)

$$R_n = \frac{\sigma_v}{\sigma_i}$$

Bajo ciertas condiciones,^(75, 76, 77) esta resistencia es análoga a la resistencia a la polarización, R_p , obtenida a partir de la técnica de corriente directa de polarización lineal (LPR: por su denominación en inglés: *Linear Polarization Resistance*); por lo que la velocidad de corrosión puede estimarse con el uso de la ecuación de Stern y Geary⁽⁸⁵⁾, como se verá mas adelante en el punto 2.7.1.

De la misma manera, si se divide el espectro de energía del potencial en cada frecuencia entre el espectro de energía de la corriente en la misma frecuencia, se obtiene la impedancia electroquímica de ruido, Z_n .^(84, 86, 87)

Las fuentes del ruido electroquímico pueden clasificarse en tres categorías.⁽⁸⁸⁾

1. Efectos de los transportadores de carga eléctrica. Esta categoría contempla el ruido que se origina como consecuencia de la agitación térmica de los transportadores de carga y el ruido ocasionado cuando se transfiere la carga (electrones) en cantidades discretas. Las características principales de esta fuente de ruido son que su densidad espectral, es decir la cantidad de ruido presente en un ancho de banda, es esencialmente constante sobre un amplio intervalo de frecuencias; además, este tipo de ruido es de baja amplitud.
2. Esta fuente de ruido se relaciona con los procesos superficiales que ocurren en los electrodos y específicamente debido a sus heterogeneidades. Este ruido se manifiesta en fluctuaciones en frecuencias de aproximadamente 1 Hz y menores. La densidad espectral observada en general varía con la frecuencia y la amplitud puede ser mayor que la causada por la transferencia de carga.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3. En este tipo de ruido se contemplan las fluctuaciones producto de las variaciones de los parámetros físicos y químicos del sistema bajo estudio, es decir cambios en el ambiente que rodea los electrodos. Estas variaciones frecuentemente tienen la apariencia de un cambio en el potencial de electrodo y se producen a muy bajas frecuencias.

2.7.1. Interpretación de ruido electroquímico.

Es aceptado que el ruido electroquímico contiene información útil acerca del proceso electroquímico, pero no existe un consenso acerca de la mejor aproximación para extraer la información. Una vez obtenidas las series de tiempo, esto es, los datos de ruido en corriente y/o potencial, se pueden utilizar varios métodos para extraer información valiosa del fenómeno electroquímico.

A continuación se presentan las técnicas de análisis que han sido aplicadas a los datos de ruido electroquímico.

- **Inspección visual de las series de tiempo.**

El método más básico del análisis de los datos de ruido es reconocer un patrón o una tendencia en las señales de corriente o potencial.

En el caso de corrosión general, la señal de ruido es moderadamente aleatoria. Puede haber una buena correlación entre el ruido de la corriente ($I_{coupling}$) y el ruido en el potencial de corrosión ($E_{coupling}$).⁽⁷⁴⁾

En el caso de sistemas pasivos, se observa que el ruido tanto en potencial como en corriente, debido a la presencia de películas pasivas es de pequeña amplitud^(70, 89, 90) y se observa un cambio lento en el potencial de corrosión. Aunque la corriente y el

potencial se correlacionan, la corriente pasiva característica del sistema presenta una señal de ruido de bajo nivel. La forma regular de las series de tiempo sugiere que la corriente que fluye es aleatoria debido a la difusión iónica dentro de la película.

- **Filtros electrónicos.**

La mayoría de los instrumentos de medición de alta resolución involucran filtros electrónicos para evitar problemas tales como "aliasing".⁽⁷⁴⁾ Más allá del uso de los filtros para mejorar la resolución, se puede utilizar como una técnica para el procesamiento de datos en línea. La señal puede filtrarse con un sistema centrado en $50 \text{ MHz} \pm 10 \text{ MHz}$, y después calcular la RMS (*por su denominación en inglés: root mean square*) de la señal filtrada.⁽⁸¹⁾ Finalmente los valores RMS del ruido en potencial y en corriente pueden utilizarse directamente para medir la corrosión.

- **Análisis de transientes.**

Es posible obtener información mecánica de los transientes individuales que producen la señal de ruido, debido a que estos son influenciados por los parámetros electroquímicos que controlan la disolución metálica y las reacciones de reducción.

La forma de los transientes es el resultado de eventos específicos asociados con corrosión localizada.⁽⁹¹⁾ Algunos autores han aplicado la teoría del caos^(92,93,94,95) y el análisis fractal⁽⁹⁶⁾ a los datos de ruido electroquímico.

El análisis del caos intenta caracterizar el comportamiento electroquímico, el cual es determinístico pero altamente inestable; los resultados son de interés teórico, sin embargo todavía no es clara la posibilidad de proporcionar una aproximación general para la interpretación de los datos de ruido electroquímico.

Existe otra herramienta para el análisis de los transientes: la transformada Wavelet, Debido a que la inspección visual de las series de tiempo consumen demasiado tiempo y además es solo cualitativa, es posible aplicar la técnica matemática llamada análisis Wavelet a las señales de ruido electroquímico.^(97, 98) El método consiste en definir un transiente "modelo" y después realizar un barrido a los datos de ruido para detectar la ocurrencia de dicho transiente. Sin embargo, el método presenta la gran desventaja de que solo contabilizará los transientes que correspondan al modelo, además de que produce resultados complejos y difíciles de interpretar.

- **Análisis estadístico.**

Este tipo de análisis se lleva a cabo en el dominio del tiempo y considera que la señal es estacionaria, esto implica que su media y desviación estándar no cambian con el tiempo y consiste en determinar los diferentes parámetros estadísticos que caracterizan los datos de ruido.

La media de los valores de potencial es el potencial de corrosión promedio; las variaciones en la media en un intervalo largo de tiempo pueden relacionarse con los cambios en el proceso de corrosión. La media de la corriente es usualmente cero cuando se mide la corriente entre dos electrodos nominalmente idénticos.

La desviación estándar es el parámetro natural para describir la amplitud de una señal de ruido. Con la obtención de la desviación estándar de las series de tiempo para la corriente y el potencial, como se mencionó con anterioridad, es posible obtener la resistencia de ruido (Ω)

$$R_n = \frac{\sigma_v}{\sigma_i}$$

con la cual, se puede determinar la velocidad de corrosión⁽⁸⁵⁾, de acuerdo a:

$$I_{corr} = \frac{B}{R_n}$$

$$\text{donde: } B = \frac{b_a b_c}{2.303(b_a + b_c)}$$

y b_a , b_c son las pendientes de Tafel anódica y catódica, respectivamente.

Si se considera que $b_a = b_c = 120 \text{ mV/dec}$, entonces $B = 26 \text{ mV} = 0.026 \text{ V}$, por lo que la velocidad de corrosión se puede calcular con:

$$V_{corr} (\text{mpy}) = K \frac{B}{R_n}$$

Existen otros parámetros estadísticos, como la curtosis (kurtosis) y el sesgo (skewness), los cuales proporcionan información acerca de la forma de la distribución de los datos obtenidos tanto de corriente como de potencial, lo cual es el punto de partida para determinar si efectivamente el sistema bajo estudio se ajusta al fundamento del análisis.

Así, se tiene que un valor de curtosis igual a tres⁽⁹⁸⁾ implica que la distribución de los valores tiene una forma similar a la distribución normal. Un valor de cero para el sesgo implica que la distribución es simétrica alrededor de la media.⁽⁷⁸⁾

Finalmente, el valor RMS, el cual se obtiene extrayendo la raíz cuadrada del valor promedio del cuadrado del potencial o corriente (sin sustracción de la media). En términos prácticos es una medida de la energía disponible en la señal.

- **Análisis espectral.**

Incluyen los métodos que consideran la secuencia de los datos en la serie de tiempo. Los dos métodos principales de este tipo de análisis son: La función de

autocorrelación (ACF: *Autocorrelation function*) y los espectros de energía (FFT: *Fast Fourier Transform* y MEM: *Maximum Entropy Method*).

1. Función de auto correlación.

Probablemente es el más simple de los métodos de análisis que depende de la secuencia de los datos. En esencia, la ACF es el valor del producto de las series de tiempo en algún tiempo determinado y en algún tiempo posterior. Como consecuencia, la ACF es una función del tiempo "lag", es decir la diferencia en tiempo de las dos muestras.

Algunos autores han utilizado recientemente la ACF para interpretar los datos de ruido electroquímico,⁽⁹⁹⁾ sin embargo ha sido sustituido por el análisis de los espectros de energía, los cuales presentan la información en una forma ligeramente más intuitiva.

2. Espectros de energía.

En estos métodos se estima la cantidad de energía contenida en la señal de ruido, contenida en varias frecuencias. Los espectros obtenidos son gráficos de PSD (*Power Spectral Density*), la energía por unidad de frecuencia, en función de la frecuencia. Las unidades de la PSD son V^2/Hz o A^2/Hz , para el potencial y la corriente, respectivamente. Hasta el momento existen dos métodos para estimar la PSD:

- **Transformada rápida de Fourier (FFT).**

Es el método más directo para estimar la PSD a través del cálculo de una serie de ondas senoidales las cuales necesitarían ser combinadas para obtener la señal observada.

Para el caso de una muestra de datos (series de tiempo), lo anterior se realiza utilizando la transformada discreta de Fourier (DTF), usualmente con el algoritmo de la transformada rápida de Fourier. La PSD es entonces determinada elevando al cuadrado la amplitud de las ondas senoidales y dividiendo entre la separación de frecuencia.

Con el fin de minimizar artefactos en el espectro, se aplica generalmente la remoción de la tendencia⁽¹⁰⁰⁾ y el proceso de "*windowing*" (proceso que reduce la amplitud de la serie de tiempo en el inicio y final de ésta, a fin de minimizar los errores asociados con los cambios agudos en los valores). Es importante que primero se realice la remoción de la tendencia; si primero se aplica el proceso de *windowing*, la subsecuente remoción de la tendencia destruirá los beneficios del proceso de *windowing*.

- **Método de Máxima Entropía (MEM).**

Varios métodos de estimación de los espectros de energía tienen la ventaja de que el espectro puede calcularse con la transformada de Fourier de la ACF.

Si se utiliza solamente la ACF, el resultado es exactamente el mismo que el obtenido a partir de la transformada de Fourier de la serie de tiempo original. Sin embargo, algunas funciones pueden ser ajustadas a la ACF, y posteriormente transformadas en un espectro de energía. Esto tiene el efecto de hacer menos ruidoso (*smooth*) el espectro de energía. (el MEM⁽¹⁰¹⁾ tiene ésta característica).

El MEM calcula un número de coeficientes que describen la ACF y de aquí, indirectamente, el espectro de energía. El número de coeficientes es conocido como el orden del MEM y es definido por el usuario.⁽¹⁰²⁾

Al igual que el método de la transformada rápida de Fourier, el método de máxima entropía genera gráficos de energía contra la frecuencia; de lo cual se puede esperar una comparación con los datos de impedancia.

2.7.2 Ruido Electroquímico para detectar corrosión localizada.

La corrosión localizada genera una respuesta de ruido electroquímico particularmente intensa, y se han desarrollado ciertos criterios para determinar si el proceso es o no localizado.^(65, 66, 67, 68, 69)

Uno de los métodos consiste en determinar el coeficiente de variación para la señal de ruido en corriente. Dicho coeficiente es la desviación estándar dividida entre la media; no obstante presenta el problema de que la corriente media tiene un valor esperado de cero para ondas periódicas como las senoidales.

Este criterio ha sido revisado y en cambio se ha utilizado el valor *RMS* de la corriente, y así se obtiene el índice de localización (*IL*) o índice de picado:

$$IL = \frac{\sqrt{I_n^2}}{I_{rms}}$$

donde I_{rms} = Corriente *rms*, incluyendo la corriente d. c.

σ = Desviación estándar de la corriente.

De acuerdo con Eden⁽⁶⁵⁾, existe la siguiente relación entre los valores del índice de localización y el tipo de corrosión prevaleciente en el sistema electroquímico:

Índice de localización	Tipo de corrosión
$0.001 < IL < 0.01$	General
$0.01 < IL < 0.1$	Mixta
$0.1 < IL < 1.0$	Localizada
$1.0 < IL$	Inicio del picado

2.7.3. Ventajas de la técnica de ruido electroquímico.

- La medición no involucra a alguna perturbación externa sobre el sistema que se está corroyendo, y por lo tanto puede ser aplicada en estructuras reales.
- Del punto anterior se deduce que es una técnica no destructiva.
- Los instrumentos requeridos para llevar a cabo las mediciones son razonablemente simples, particularmente con las técnicas modernas computarizadas de adquisición y manejo de datos.
- Se puede monitorear el proceso de corrosión localizada.
- Esta es la mayor ventaja que presenta la técnica con respecto a otras como Rp e Impedancia.

2.8 Biología molecular para la identificación de microorganismos.

El avance científico y tecnológico que en los últimos años ha tenido el campo de la ecología microbiana, se ha sustentado en parte, en los logros que en forma significativa se han tenido en la implementación y estandarización de las metodologías de biología molecular. Así por ejemplo, en la actualidad se pueden identificar microorganismos de ambientes poco estudiados, sin la necesidad imperiosa de tener que cultivarlos como se requería con las técnicas microbiológicas tradicionales.

Hasta hace algunos años, el estudio de la diversidad microbiana estaba limitado entre otras cosas, por la falta de medios específicos o condiciones adecuadas para cultivar todas las bacterias presentes en los diversos ambientes naturales o industriales. Se considera que más del 99% de los microorganismos presentes en la naturaleza no podían cultivarse a través de las técnicas microbiológicas estándares.^(103,104,105,107) En contraste, las metodologías de biología molecular ofrecen alternativas potenciales para realizar estudios de ecología microbiana, permitiendo la detección y el monitoreo de bacterias del ambiente sin necesidad de cultivarlas o aislarlas.

Estas técnicas han desplazado a los métodos microbiológicos tradicionales, permitiendo realizar clasificaciones filogenéticas de manera más rápida y exacta.^(106, 107)

Las técnicas de biología molecular están basadas en el análisis de los ácidos nucleicos que se extraen directamente de muestras ambientales o bien de cultivos microbianos. Posteriormente a través del análisis de las secuencias de marcadores moleculares es posible identificar y realizar clasificaciones filogenéticas de los microorganismos así como inferir su presencia dentro de una comunidad. Los

marcadores moleculares se pueden obtener mediante amplificación por PCR (reacción de polimerización en cadena).⁽¹⁰⁶⁾

2.8.1 Análisis de los genes del 16s rRNA

Entre los marcadores moleculares que más se utilizan en estudios de diversidad microbiana, se tiene la secuencia del gen ribosomal 16S (16S rRNA)⁽¹⁰⁸⁾. Esta molécula se encuentra presente en todos los microorganismos, está altamente conservada, pero tiene la variabilidad suficiente para hacer distinciones entre géneros y especies. El gen 16S rRNA es fácilmente accesible por PCR. El análisis de su secuencia, el análisis de polimorfismos así como experimentos de hibridación con sondas derivadas de sus secuencias son de utilidad para la identificación y la clasificación de microorganismos.⁽¹⁰⁶⁾

En muestras tomadas directamente del ambiente, la amplificación del gen 16S rRNA mediante PCR, permite en forma precisa dar estimaciones de la diversidad microbiana presente. Además se tiene la posibilidad de que los microorganismos no cultivables o difíciles de cultivar, pueden ser identificados sin necesidad de realizar los cultivos requeridos en las técnicas de microbiología clásica. Los fragmentos son posteriormente "separados" por clonación o por técnicas de electroforesis.

La identificación de regiones altamente conservadas dentro de la secuencia del gen 16S rRNA ha permitido desarrollar un conjunto de oligonucleótidos para la amplificación completa de este gen. Estos oligonucleótidos se han desarrollado dentro de un rango amplio (universales), desde el nivel de dominio (bacterias, archaea o eucariotes), grupos (bacterias metanogénicas, bacterias sulfato reductoras, bacterias lácticas, etc.) hasta géneros individuales (*Escherichia*).^(109, 110, 111, 112) El desarrollo de nuevos oligonucleótidos y sondas a partir del gen 16S está sustentado en la base de datos del Proyecto Ribosomal (Ribosomal Data Project), que es una colección de secuencias ribosomales concentradas en la Universidad de

Michigan, disponible en Internet en el sitio: <http://rdpwww.life.uiuc.edu/index2.html> (113). Es relativamente sencillo diseñar oligonucleótidos y sondas utilizando las bases de datos, sin embargo deben probarse utilizando cepas conocidas y relacionadas para verificar su especificidad.

2.8.2 Técnicas moleculares basadas en el gen 16s rRNA.

- Secuenciación del 16S rRNA.

La variabilidad en la secuencia del 16S rRNA ha sido utilizada tanto, para inferir relaciones filogenéticas entre microorganismos, como para el diseño de sondas de DNA específicas usadas para detectar taxones en diversos ambientes naturales. Estas técnicas se utilizan en la determinación de la diversidad genética de comunidades microbianas, así como para la identificación de microorganismos. Implica la clonación de las secuencias 16S rRNA, seguida de la determinación y el análisis de las secuencias de las clonas resultantes.⁽¹⁰⁶⁾

- Electroforesis en Geles con Gradiente Desnaturalizante.

La Electroforesis en Geles con Gradiente Desnaturalizante (DGGE) por su denominación en inglés "Denaturing gradient gel electrophoresis", es un procedimiento basado en la migración de fragmentos amplificados por PCR del gen 16S rRNA en geles de acrilamida. El ambiente desnaturalizante se crea, manteniendo una temperatura uniforme de entre 50 a 65°C y un gradiente desnaturalizante lineal formado por urea y formamida. El incremento de una concentración desnaturalizante separa las cadenas dobles de DNA en dominios distintos. Cuando un dominio alcanza su temperatura de desnaturalización en una posición particular del gel ocurre una transición de hélice doble a parcialmente desnaturalizado, y la migración de la molécula prácticamente se detiene. Las

variaciones en la secuencia de los dominios causa que sus temperaturas de desnaturalización sean diferentes; por lo tanto, migran a posiciones diferentes dentro del gradiente desnaturalizante, lográndose la separación de los dominios de manera efectiva.⁽¹⁰⁶⁾

Las bandas se pueden visualizar con bromuro de etidio o por hibridización después de transferir los ácidos nucleicos del gel a membranas.

Además de la caracterización de las bandas obtenidas, los fragmentos de DNA pueden ser escindidos del gel, reamplificados y secuenciados directamente, sin que el producto de PCR sea clonado.

La condicionante anterior, la hace una prueba rápida y eficiente para el análisis de poblaciones microbianas mezcladas de ambientes naturales; así como, para el monitoreo de la evolución de las comunidades.⁽¹¹⁴⁾

- **Electroforesis en Geles con Gradiente de Temperatura Temporal.**

Esta metodología TGGE (Temperature gradient gel electrophoresis), toma las bases del DGGE, pero no utiliza los geles de gradiente desnaturalizante por lo que se considera una metodología mas sencilla y rápida.

El DNA amplificado se aplica a un gel de poliacrilamida que contiene urea. Durante la electroforesis, se mantiene un gradiente de temperatura lineal.

El ambiente desnaturalizante se forma por una concentración constante de urea en el gel, combinado con el gradiente de temperatura temporal.

Aunque DGGE y TGGE tienen aplicaciones similares; DGGE tiene aplicaciones únicas como los análisis de fidelidad de polimerasas termoestables, análisis de estabilidad térmica de proteínas y los análisis de la estructura secundaria de RNA viroides.⁽¹¹⁵⁾

- Análisis de polimorfismos de fragmentos digeridos.

En esta metodología T-RFLP por su denominación Terminal Restriction Fragment Length Polymorphism, el DNA se extrae de las muestras ambientales, se amplifica el gen 16S por PCR utilizando oligonucleótidos de regiones conservadas del gen. Los productos de amplificación son posteriormente digeridos con endonucleasas de restricción, y los productos de la digestión son evaluados en un gel de secuenciación.

Posteriormente se comparan con perfiles de digestión estándares. Para facilitar los análisis de comunidades microbianas se utiliza la herramienta localizada en el sitio <http://rdpwww.life.uiuc.edu/index2.html> ,permitiendo al usuario realizar digestiones *in silico* de las secuencias compiladas en la base de datos y generar los fragmentos de restricción.⁽¹¹⁶⁾

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO

3.0

HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Hipótesis

Si las condiciones operativas que prevalecen en la planta de tratamiento y los sistemas de bombeo, son en gran medida aerobias, entonces es concebible que la corrosión causada por bacterias aerobias, sea un factor determinante en el daño por corrosión localizada que se presenta en la superficie interna de los acueductos del sistema. En este sentido una estrategia de protección del sistema basado únicamente en el control de bacterias anaerobias será inadecuado.

Objetivos

- Determinar la incidencia que las bacterias aerobias tienen en el interior de los acueductos de un sistema de recuperación secundaria, y establecer la importancia de su control para el abatimiento de problemas de corrosión localizada.
- Identificar, empleando metodologías de biología molecular, diferentes cepas de bacterias aerobias que se desarrollan en la superficie interna de los acueductos de un sistema de recuperación secundaria.

- Determinar en el laboratorio mediante la técnica de ruido electroquímico, la influencia que las bacterias aerobias aisladas tienen en el fenómeno de corrosión microbiológica, de especímenes metálicos de acero API 5L X52 maquinados de una muestra de tubería utilizada en campo.
- Determinar la interacción de bacterias aerobias en el fenómeno de corrosión microbiológica de la superficie interna de acueductos de un sistema de recuperación secundaria, para conocer su influencia en el incremento de problemas de corrosión localizada.
- Proponer o validar el mecanismo de corrosión aerobia que se presenta en la superficie interna de los acueductos del sistema de recuperación secundaria en estudio y generar y/o complementar, un sistema confiable para el monitoreo de poblaciones de bacterias relacionadas con el fenómeno de corrosión.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO

4.0

MATERIAL Y MÉTODOS

El desarrollo experimental de este trabajo doctoral incluyó trabajo de campo y de laboratorio. Las actividades para cada caso se presentan a continuación.

4.1 Trabajo de campo.

Las actividades de campo se realizaron a bordo del complejo de inyección de agua de la Región Marina Suroeste de PEMEX Exploración y Producción, e incluyeron actividades de laboratorio que fueron realizadas en el laboratorio de microbiología localizado en la Plataforma de Tratamiento y Bombeo (PTB) del mismo complejo.

4.1.1 Muestreo y análisis del agua de inyección.

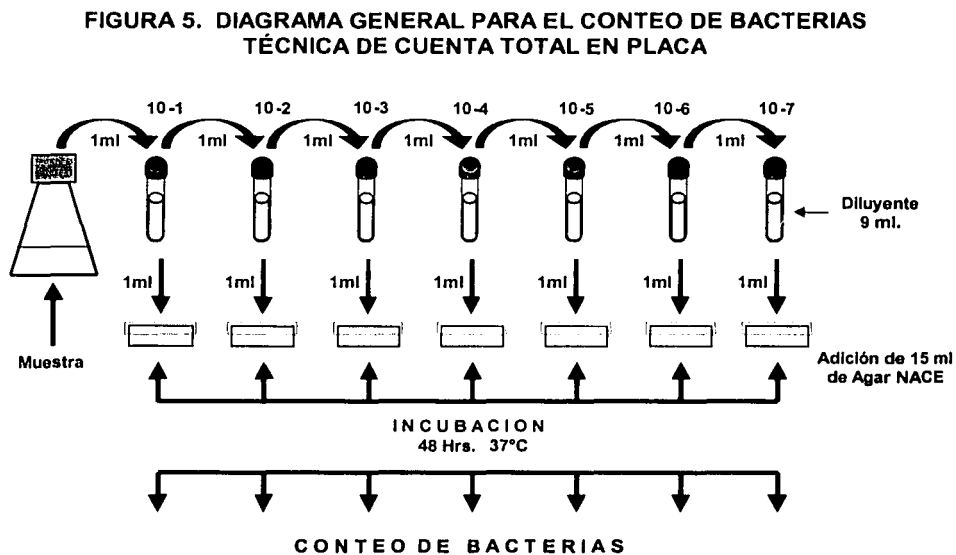
Para el muestreo microbiológico se tomaron las debidas precauciones de asepsia, evitando en lo posible la contaminación externa que pudiera influir en los resultados y siguiendo los protocolos ya establecidos para estudios microbiológicos.

El muestreo se realizó en forma diaria a la salida de PTB, utilizando bolsas de muestreo estériles "Whirl pack" las cuales no fueron llenadas en su totalidad a fin de lograr homogenizar la muestra en el momento del análisis. Se tuvo especial cuidado para no tener contacto entre el punto de drene y la bolsa de muestreo, regulando el flujo para evitar turbulencia excesiva. Así mismo, en forma rutinaria, las muestras colectadas fueron identificadas y trasladadas al laboratorio, en una contenedor que

mantuvo la temperatura a 4°C, cuidando de que entre el tiempo de muestreo y el de análisis no transcurriera mas de 1 hr.

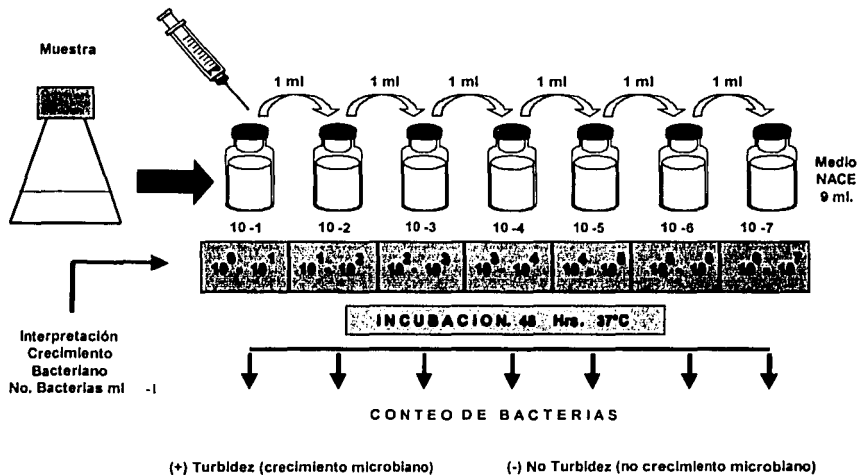
La carga bacteriana aerobia del agua de inyección, se determinó utilizando la técnica microbiológica de cuenta total en placa (Figura 5). El medio de cultivo utilizado fue el recomendado por NACE ⁽¹¹⁷⁾, el cual tenía un pH final de 7.2 y la siguiente composición: Peptona (5g.), Extracto de levadura (1.0g.), Cloruro de sodio (19.5g.), Citrato férrico (0.1g.), Cloruro de magnesio (8.8g.), sulfato de sodio (3.3g.), cloruro de calcio (1.8g.), cloruro de potasio (0.6g.), bicarbonato de sodio (0.16g.) y agar (15g.) en un litro de agua destilada.

El tiempo de incubación de los cultivos bacterianos fue de 48 hrs., a una temperatura constante de 35°C. Concluido el tiempo de incubación, se realizó la cuenta de colonias bacterianas y se graficaron los resultados (UFC/ml vs. Tiempo), los cuales se presentan en el capítulo 5.0 de este trabajo doctoral.



En forma esporádica y con el fin de verificar la presencia de bacterias anaerobias (sulfato reductoras) que estuvieran relacionadas con la corrosión localizada en la superficie interna de los acueductos y que coadyuvaran con el efecto de los consorcios aerobios para el incremento de la velocidad de corrosión, se realizaron análisis bacteriológicos utilizando la técnica de dilución seriada mediante el uso de frascos ampoviales (Figura 6) ⁽¹¹⁸⁾.

FIGURA 6. DIAGRAMA GENERAL PARA EL CONTEO DE BACTERIAS TÉCNICA DE AMPOVIALES (DILUCIÓN SERIADA)



El medio de cultivo utilizado estuvo de acuerdo a la recomendación API RP 38-75 ⁽¹¹⁸⁾, el cual tuvo la siguiente composición: Lactato de sodio (4.0g.), extracto de levadura (1.0g.), ácido ascórbico (0.1g.), sulfato de magnesio (0.2g.), fosfato de potasio (0.01g.), sulfato ferroso amoniacal (0.2g.), cloruro de sodio 10g.) en un litro de agua destilada. El pH del medio final se ajustó a 7.3 y se utilizó resarsurina como indicador.

El tiempo de incubación de los cultivos bacterianos fue de 7 días, a una temperatura constante de 35°C. Concluido el tiempo de incubación, se observaron los cultivos

tomando en cuenta el siguiente criterio: cultivo positivo (ennegrecimiento del medio), cultivo negativo (sin ennegrecimiento del medio).

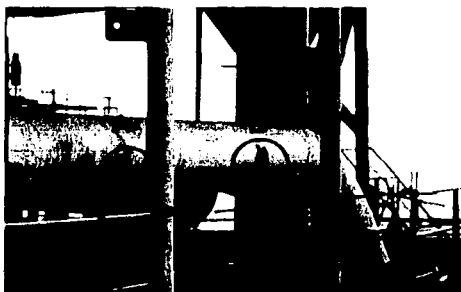
En forma complementaria al análisis bacteriológico del agua, se dio seguimiento al comportamiento diario de la velocidad de corrosión mediante el uso de un equipo CORRDATA™ (Remote Data Collection System) instalado para el monitoreo continuo de la velocidad de corrosión, los datos capturados en el equipo anterior, fueron recolectados a través de la interfase de un equipo MATE II marca COSASCO y fueron graficados para su discusión e interpretación.

En la figura 7 se muestra la disposición típica de los sitios para el monitoreo de corrosión y biofilm, en los acueductos del sistema de inyección de agua.

FIGURA 7. ARREGLOS TÍPICOS PARA EL MONITOREO DE CORROSIÓN Y BIOPELÍCULA EN ACUEDUCTOS.



(A). Niple de acceso para instalación de bioprobeta.
(B) Niple de acceso para la instalación de probeta corrosimétrica



(A). Niple de acceso para instalación de bioprobeta.
(B) Niple de acceso para la instalación de probeta corrosimétrica

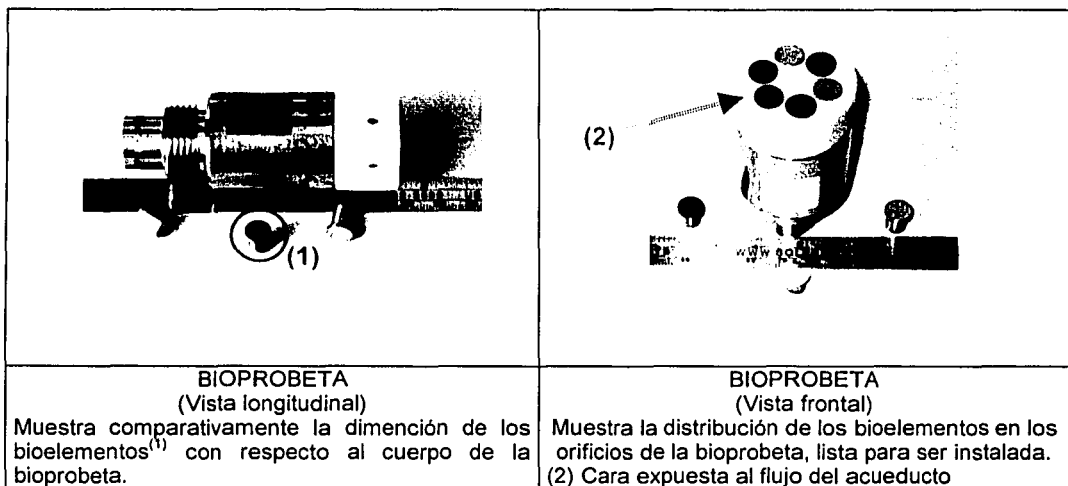
El arreglo garantiza en forma significativa la misma condición microambiental para el monitoreo de corrosión abiótica y biótica, en el interior de los acueductos del sistema de inyección.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.1.2 Muestreo de biopelículas e implementación de bioprobetas.

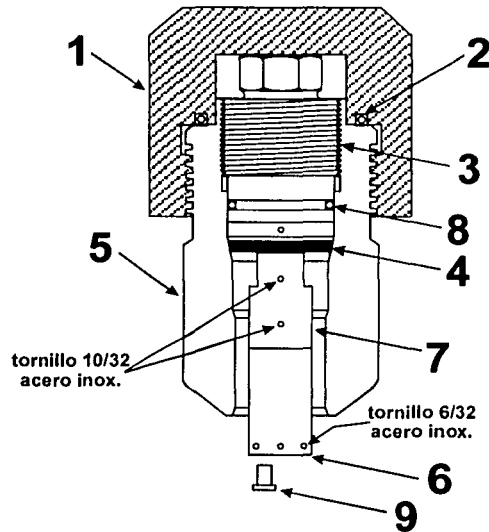
Para cumplir con los objetivos planteados en este trabajo doctoral, se implemento el uso de bioprobetas a fin de monitorear los consorcios microbianos que se forman sobre la superficie interna de los acueductos del sistema. En la Figura 8 se muestran bioprobetas típicas, utilizadas en esta investigación.

FIGURA 8. BIOPROBETAS UTILIZADAS EN CAMPO PARA EL MONITOREO EL DE BIOPELÍCULAS



Las bioprobetas que se muestran en la figura anterior, se instalaron en los acueductos del sistema de inyección, utilizando un equipo llamado retriwer y previo a la colocación de un niple de acceso. La figura 9 muestra un diagrama de la localización de la bioprobeta en el niple antes referido, una vez que ha sido instalada en el interior del acueducto, conviene aclarar que el uso del retriwer es una operación considerada como de alto riesgo, debido a que el acueducto continúa operando en forma normal, aún y cuando se esté en el proceso de instalación de la bioprobeta o probeta corrosimétrica según sea el caso.

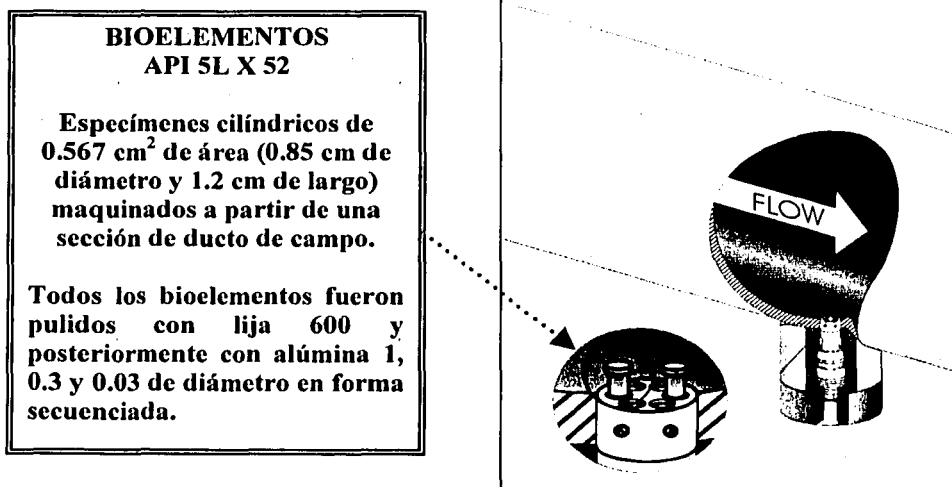
FIGURA 9. ESQUEMA DE LA CONDICIÓN DE LA BIOPROBETA EN EL NIPLE DE ACCESO.



Parte	Descripción	Material
1	Tapón de niple	Acero al carbono 1022
2	O-ring	VIT 70 D
3	Cuerpo del niple	Acero inoxidable 316L
4	Primary packing	Teflón 25% G.F.
5	Acces fitting	Acero al carbono 1022
6	Sujetador del elemento para muestra	Delrin
7	Accesorio bioprobeta	Acero inoxidable 304
8	O-ring	VIT 70 D
9	Bioelemento para muestra (1 o 6)	Latón o acero

El uso de bioprobetas para el monitoreo de la biopelícula formada en la superficie interior de los acueductos, garantiza que la muestra es representativa de la superficie metálica ya que su localización final en el acueducto es "rasante", como se muestra en la figura 10.

FIGURA 10. LOCALIZACIÓN FINAL DE LA BIOPROBETA EN EL INTERIOR DEL ACUEDUCTO



La composición química de los bioelementos utilizados fue la siguiente:

Composición química del acero API 5L X52 (% en peso)												
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Nb	Cu	Fe
0.06	1.05	0.27	0.006	0.002	0.02	0.02	0.008	0.05	0.02	0.05	0.24	bal

Las bioprobetas estuvieron expuestas en el flujo de los acueductos durante un tiempo promedio de 30 días. Después del tiempo de exposición y utilizando el equipo retrigger, se retiraron de los acueductos y se procedió a coleccionar la biopelícula formada sobre la superficie de cada uno de los seis bioelementos que tenía cada bioprobeta, para lo anterior, se siguió el procedimiento que se muestra en la figura 11.

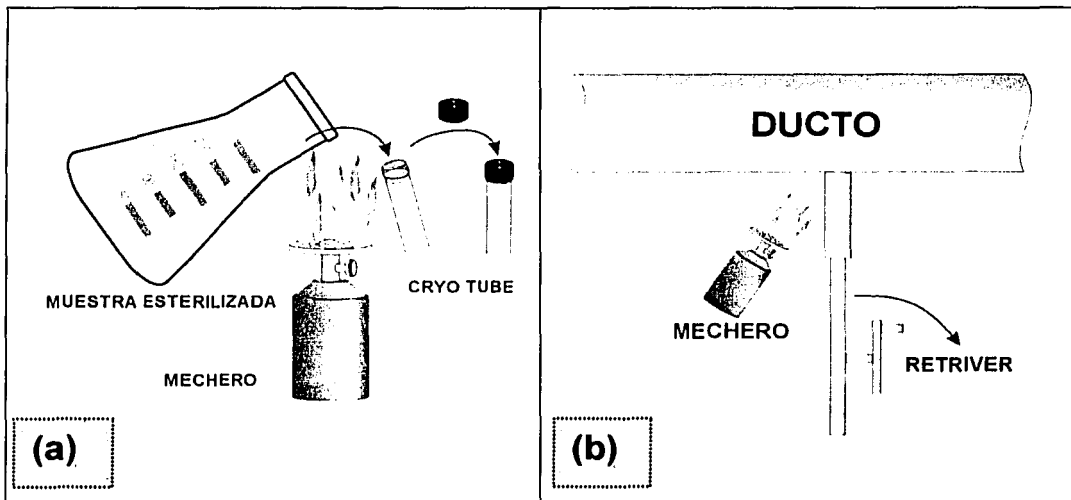
Se prepararon "crío-tubos" estériles, con agua de mar (previamente esterilizada) coleccionada del sistema de inyección, la preparación de los tubos se realizó

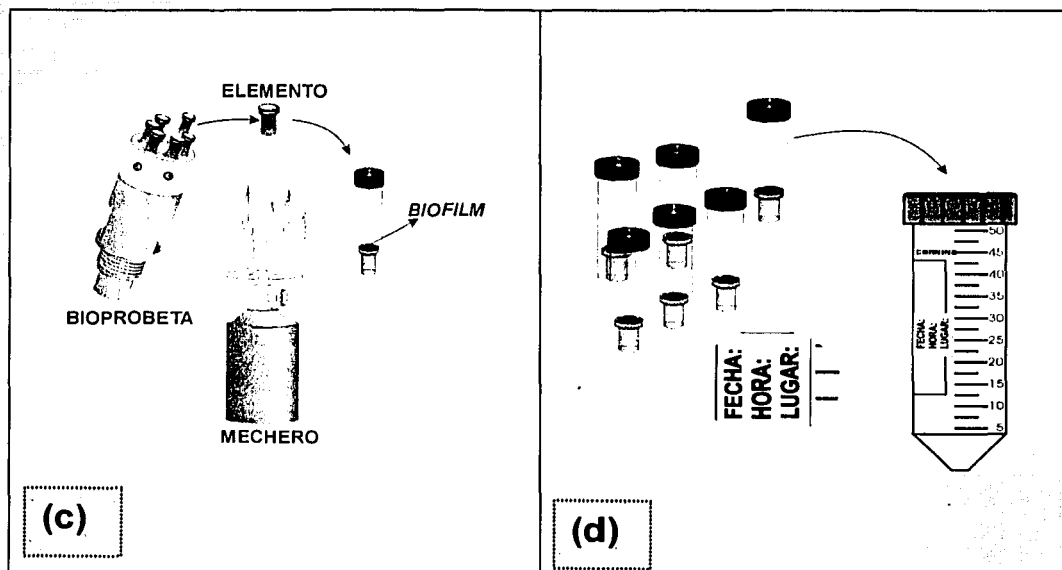
manteniendo condiciones de asepsia y esterilidad como se muestra en la fig. 11(a), en la fig. 11(b) se muestra esquemáticamente, el retiro de las bioprobetas, durante ésta actividad y justo en el momento en que el retrigger extraía la bioprobeta del acueducto, se utilizó un mechero a fin de evitar en lo posible la contaminación externa a la muestra por colectar.

El manipuleo para el retiro de cada bioelemento se realizó con la ayuda de pinzas estériles y próximo a la flama del mechero fig. 11(c).

Los bioelementos fueron colectados por separado en cada crio-tubo, manteniendo la cara con formación de biopelícula hacia arriba para evitar algún tipo de daño mecánico, los tubos que contenían los bioelementos fueron identificados y almacenados para su traslado al laboratorio y su posterior análisis fig. 11(d).

FIGURA 11. MUESTREO DE BIPELÍCULA FORMADA SOBRE LA SUPERFICIE DE BIOELEMENTOS.





4.2 Trabajo de laboratorio.

4.2.1 Aislamiento y propagación de bacterias aerobias.

El aislamiento de bacterias aerobias se llevo a cabo tanto de muestras tomadas directamente del flujo del acueducto, como del agua contenida en los tubos utilizados para el muestreo de la biopelícula. La propagación de las bacterias se realizó utilizando el medio de cultivo NACE⁽¹¹⁷⁾ y la técnica de cuenta total en placa para el crecimiento de las colonias que posteriormente fueron aisladas utilizando la técnica de estría cruzada. Las cepas bacterianas así obtenidas, fueron utilizadas para las evaluaciones electroquímicas programadas en este proyecto doctoral.

4.2.2 Determinación de curvas de crecimiento.

Del total de cepas aisladas, se seleccionaron 4 en base a su velocidad de crecimiento, así como a la morfología colonial que presentaron durante la etapa de propagación. Utilizando la técnica de cuenta total en placa, a cada una de las cepas

se les determinó su curva típica de crecimiento, dichas curvas fueron obtenidas considerando 48 hrs. totales para cada cepa bacteriana.

4.2.3 Identificación bacteriana (16S rDNA ribosomal).

La identificación de las cepas bacterianas se realizó utilizando la metodología de secuenciación del gen 16S rDNA, para lo anterior, se prepararon cultivos puros de las cuatro bacterias en estudio y se enviaron a MIDI LABS Laboratory para su secuenciación. Con los datos reportados por MIDI LABS, se construyeron los árboles filogenéticos para cada bacteria.

4.2.4 Caracterización de biopelículas (SEM).

A partir de los bioelementos colectados en campo, se realizaron observaciones al microscopio electrónico de barrido (SEM), por sus siglas en inglés Scanning Electron Microscopy, con la finalidad de caracterizar la morfología de la biopelícula formada, así como determinar el tipo de daño por corrosión en la superficie del bioelemento expuesta al interior de los acueductos. Las imágenes obtenidas se presentan en el capítulo 5.0 de resultados.

4.2.5 Evaluaciones electroquímicas (ENA).

Para determinar el efecto que las cepas bacterianas en estudio, tienen en la corrosión interna de los acueductos del sistema de inyección de agua, se realizaron pruebas electroquímicas basadas en la técnica de ruido electroquímico (ENA)

El procedimiento utilizado en dichas pruebas se detalla a continuación:

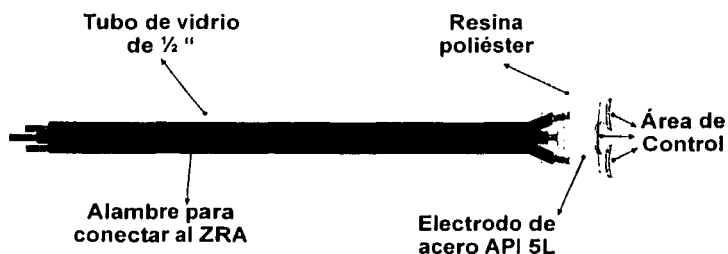
- **Preparación de las probetas para las mediciones de ruido electroquímico.**

Con el fin de establecer un área de control para las mediciones electroquímicas y poder determinar las fluctuaciones en la corriente y en el potencial de la interfase metal/solución, se construyeron probetas de 3 electrodos nominalmente idénticos

(P3ENI) de un acero API 5L X-52. En este tipo de probetas, uno de los electrodos actúa como electrodo de pseudo-referencia (RE), y los otros dos como electrodos de trabajo (WE1 y WE2).

Dichos electrodos consistieron en muestras cilíndricas de 0.85 cm de diámetro y 1.2 cm de longitud, las cuales fueron obtenidas de un tramo de ducto que salió de operación. Posteriormente, dichos electrodos se embebieron en resina poliéster para obtener y garantizar el área de control (0.567 cm^2) como se muestra en la figura 12. El proceso de curado de la resina fue de 24 horas.

FIGURA 12. PROBETA DE 3 ELECTRODOS NOMINALMENTE IDÉNTICOS



La superficie de los electrodos fue pulida aplicando la siguiente secuencia de desbaste mecánico:

- Con la serie de lijas: 240, 320, 400 y 600.
- Pulido sobre paño grueso con alúmina de 1 y de $0.3 \mu\text{m}$; y sobre paño fino con alúmina de $0.05 \mu\text{m}$ de tamaño de partícula.
- Limpieza de la superficie pulida frotando suavemente con una torunda de algodón humedecida con alcohol.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Las probetas fueron protegidas con algodón y almacenadas en un desecador hasta el momento de las evaluaciones, las cuales se realizaron utilizando como medio de prueba, el recomendado por NACE según reporte número 54281⁽¹¹⁷⁾, preparado como en el caso de las evaluaciones microbiológicas.

Previo a las evaluaciones electroquímicas y considerando los requisitos básicos de esterilidad y asepsia requeridos para ensayos microbiológicos, se esterilizaron todas los componentes del dispositivo experimental.

- **Prueba de ruido electroquímico.**

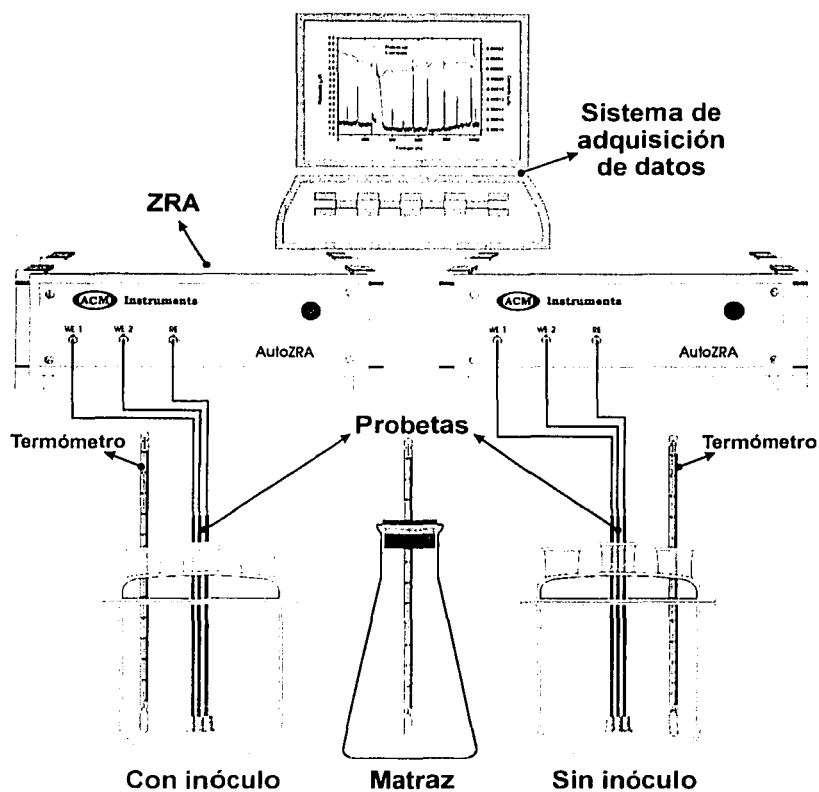
Las probetas de 3 electrodos se sumergieron en una solución desinfectante (*BDD: Bacdown Detergent Desinfectant*) durante 15 min. Se retiraron de la solución y enjuagaron con agua estéril.

Se agregaron 800 ml de medio de cultivo en dos bioreactores y en un matraz elenmeyer de 1 L. Se adicionó un inóculo de cada cepa bacteriana bajo estudio en uno de los bioreactores y en el matraz. El biorreactor sin inóculo sirvió como prueba de control y el matraz se utilizó para determinar la cinética microbiana de cada cepa bacteriana.

Las mediciones se realizaron durante 48 horas, manteniendo una temperatura de entre 24 y 28 °C. El dispositivo experimental utilizado se muestra en la figura 13.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

FIGURA 13. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL PARA LAS MEDICIONES ELECTROQUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS.



Los parámetros considerados para las mediciones de ruido electroquímico fueron los siguientes:

- Datos por cada serie de tiempo (N) = 2048
- Intervalo de lectura de datos (Δt) = 0.5 s

De lo anterior, se estableció que la duración de cada serie de tiempo estuvo dada por la relación:

$$t_{st} = N \cdot \Delta t = (2048)(0.5) = 1024 \text{ s} = 17.03 \text{ min}$$

Como se determinó que el tiempo de las mediciones electroquímicas fuera de 48 horas, el número de las series de tiempo (n_{st}) necesarias para cubrir estas horas se obtuvo de acuerdo con la siguiente expresión:

$$n_{st} = \frac{(48)(3600)}{t_{st}} \approx 169 \text{ series de tiempo}$$

donde: t_{st} [=]s

Considerando las series de tiempo necesarias y el número de datos obtenidos para cada una de ellas se tuvieron un total de 346112 datos para cada evaluación de 48 horas de cada una de las cepas bacterianas estudiadas.

Así mismo con los parámetros de ruido electroquímico se definió el intervalo de frecuencia de las mediciones de acuerdo con:

$$f_{\min} = \frac{1}{N \cdot \Delta t} \approx 1 \text{ mHz} \quad \text{y} \quad f_{\max} = \frac{1}{2\Delta t} = 1 \text{ Hz}$$

$$\therefore 0.001 < f < 1$$

- **Tratamiento de los datos de ruido electroquímico al término de las evaluaciones.**

El análisis de la información de ruido electroquímico se llevó a cabo en dos etapas. La primera de ellas consistió en graficar los datos obtenidos para cada cepa bacteriana en función del tiempo, a fin de observar el efecto que las bacterias bajo estudio tienen sobre la interfase metal/solución. Lo anterior considerando la amplitud de la señal de ruido obtenida y sin remover la tendencia de los datos.

Una segunda etapa consistió en el análisis estadístico de los datos utilizando el software EnAnalyze desarrollado en la University of Manchester (UMIST) por Cottis y

Turgoose⁽⁷⁸⁾. Para ello, fue necesario convertir los archivos generados por el AutoZRA a una extensión de archivo *txt*.

Los parámetros estadísticos que se obtuvieron con el software EnAnalyze son la media (\bar{x}), la desviación estándar (σ), el sesgo y la curtosis, con y sin remoción de la tendencia.

De los parámetros anteriores, la media y la desviación estándar sin remoción de la tendencia, fueron utilizados para obtener el Índice de Localización (IL) y la Resistencia de Ruido (R_n).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO

5.0

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se analizan tanto los resultados obtenidos en las evaluaciones de campo que sustentaron la justificación de esta tesis doctoral, como los resultados que se obtuvieron en las pruebas microbiológicas, de biología molecular y electroquímicas, en los ensayos de laboratorio.

Cabe aclarar que debido a la logística de estancia en plataforma autorizada por PEMEX Exploración y Producción (PEP), aproximadamente el 50% de los datos de campo fueron proporcionados por esa institución, en tanto que la parte restante es una contribución propia de esta tesis doctoral, con lo anterior se garantizó que los resultados obtenidos, contribuyeran en mayor medida con el conocimiento teórico para el mejor entendimiento y control del fenómeno de corrosión microbiana, que se presenta en la superficie interna de los ductos administrados por PEP. En este caso particular, en los acueductos del sistema de inyección de agua.

5.1 Evaluaciones de campo.

Durante los años de 1999 y 2000 se realizaron en el complejo de inyección de agua acciones dirigidas al seguimiento de la contaminación bacteriológica aerobia, a la medición de las velocidades de corrosión y al monitoreo del tratamiento microbiano del agua de mar que se inyecta al yacimiento, lo anterior, tomando en

cuenta en todo momento, las condiciones operativas que imperaban en ese tiempo en la Planta de Tratamiento y Bombeo (PTB).

Los resultados de las cuentas bacterianas (UFC/ml) que se presentan a continuación, representan los promedios aritméticos de los conteos bacteriológicos realizados por duplicado a muestras de agua tomadas a la salida de PTB.

5.1.1 Comportamiento bacteriológico y de corrosión 1999.

En la figura 14 se presentan los resultados de la contaminación bacteriológica aerobia del agua de inyección durante el año de 1999. En ella se puede observar que la población bacteriana se comporta en forma por demás irregular, oscilando por debajo y por arriba del límite máximo permisible que fue de 800 unidades formadoras de colonia por mililitro (UFC/ml), de acuerdo con los estándares del complejo de PEMEX.

Dentro del programa de tratamiento del agua de inyección, se dosifican productos biocidas con la finalidad de cumplir con los estándares bacteriológicos requeridos. Sin embargo, dicha dosificación tiene limitaciones en el control bacteriológico. Por tal razón, diversas especies de bacterias aerobias y anaerobias son capaces de proliferar irregularmente y generar colonias activas que forman biopelículas.⁽¹¹⁹⁾ Las biopelículas aportan al flujo de los ductos, cantidades significativas de bacterias que fueron determinadas durante los muestreos bacteriológicos.

Las máximas poblaciones de bacterias aerobias fueron de 10,200 y 8760 UFC/ml, detectadas en los meses de diciembre y julio de ese año (1999).

Se determinó también, que la mayor variación en la población bacteriana por arriba del límite máximo permitido se dio en términos generales en los periodos de los días 80 a 120, 180 a 240 y 340 a 360. No obstante lo anterior, se presentaron en forma

esporádica días en los que la cantidad de bacterias sobrepasó ligeramente el límite permitido.

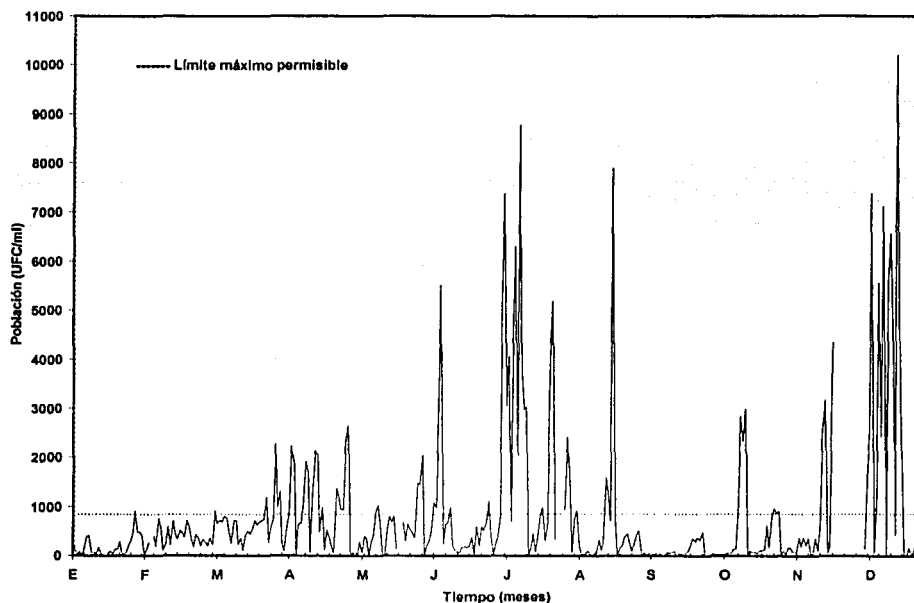


Figura 14. Contaminación bacteriana aerobia del agua de inyección detectada a la salida de la planta de tratamiento y bombeo durante el año de 1999.

En la figura 15 se muestran los valores promedio de la población bacteriana aerobia durante el año 1999. Se puede observar claramente que en los meses de julio y diciembre de ese año, las poblaciones bacterianas sobrepasaron el límite máximo permitido. En tanto que en términos generales, las poblaciones bacterianas durante el resto del año se mantuvieron "controladas".

La condición antes descrita, en ningún momento significa que el fenómeno de corrosión microbiológica se encuentre también "controlado", dado que la interacción

microbiana que se genera cuando se forma una biopelícula sobre la superficie metálica, interfiere con la cinética del fenómeno corrosivo por la modificación en el comportamiento de la interfase metal / solución, producto de la presencia y actividad metabólica de los microorganismos presentes en esos micro ambientes.

Con base en lo anterior, la sola presencia de bacterias aerobias relacionadas con fenómenos de corrosión sería indicativo de problemas potenciales de ese tipo, ya que las bacterias individuales que se agrupan en la biopelícula, con frecuencia presentan un comportamiento heterogéneo con respecto a su actividad metabólica, crecimiento, expresión genética, etc. ⁽¹²⁰⁾

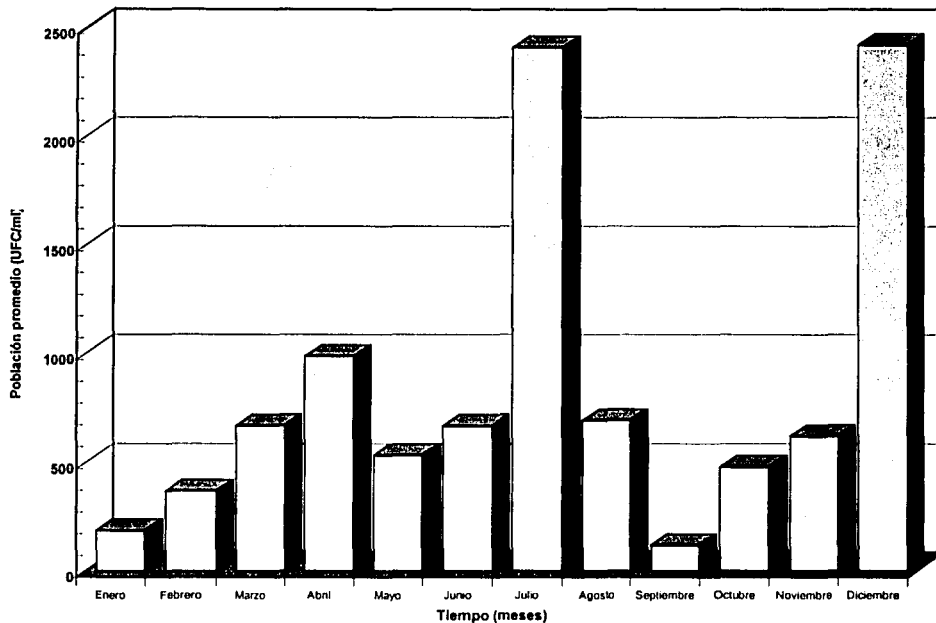


Figura 15. Valores promedio de la contaminación bacteriana aerobia del agua de inyección, detectada a la salida de la planta de tratamiento y bombeo durante el año de 1999.

Los resultados del control bacteriológico aerobio del agua de inyección durante el año de 1999 se muestran en la figura 16, dicho control incluyó la dosificación en forma alterna de tres tipos de biocidas comerciales cuya formulación está basada en: Sales cuaternarias de amonio, glutaraldehído y tetrakis hydroxy methyl phosphonium sulfate (THPS).

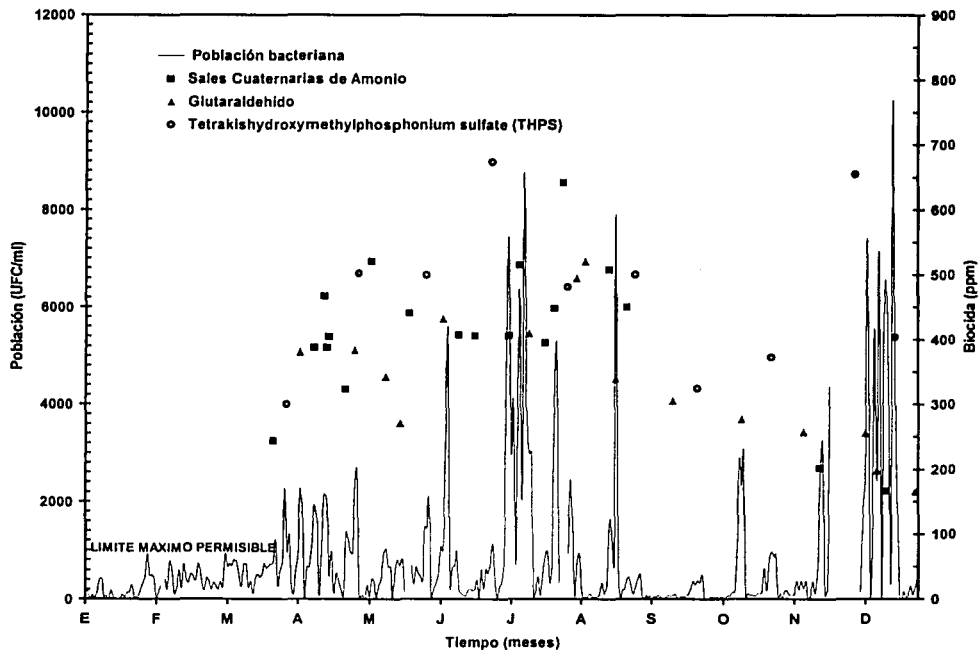


Figura 16. Control bacteriológico aerobio del agua de inyección durante el año de 1999.

En términos globales se determinó que en este periodo, los dos últimos biocidas son más eficientes para el control bacteriano del agua de inyección, ya que después de su dosificación, se detectó un abatimiento en las poblaciones bacterianas aerobias presentes; lo anterior debido a que, como reporta la literatura, en especial el producto

formulado con el componente activo THPS retarda la velocidad de crecimiento de las bacterias, incluidas las sulfato reductoras.⁽¹²¹⁾

No obstante lo anterior, se debe resaltar que el control bacteriológico del agua de inyección, está basado en el seguimiento de la población bacteriana cultivable a través de los métodos microbiológicos tradicionales de cuenta total en placa y cultivo en frascos ampoviales sin tomar en cuenta la fracción bacteriana no cultivable.

En la actualidad utilizando metodologías de biología molecular, es posible determinar la fracción de la población bacteriana que no se puede cultivar bajo las condiciones experimentales de laboratorio, a fin de poder darle el seguimiento, que permita identificar en forma específica, poblaciones de bacterias sin el cultivo directo de las mismas.⁽¹²²⁾

En el sistema de inyección de agua una de las especificaciones técnicas más importantes, refiere que el agua debe estar libre de oxígeno para prevenir problemas potenciales de corrosión.

Como se muestra en la figura 17, aún con la dosificación continua de secuestrante de oxígeno durante el programa de tratamiento del agua, las poblaciones bacterianas aerobias planctónicas y sésiles, sobreviven y se desarrollan tanto en el seno del fluido transportado por todos los acueductos del sistema de recuperación secundaria, como en la superficie interna de dichas tuberías, donde su actividad metabólica puede dar como resultado, la inducción o inhibición del fenómeno corrosivo⁽¹²³⁾

En la misma figura, no se observó una correlación directa entre la población bacteriana y la dosificación del secuestrante de oxígeno, por lo que se infiere que el incremento o disminución de la población bacteriana aerobia está en función básicamente, del tratamiento antimicrobiano basado en la dosificación de los productos biocidas.

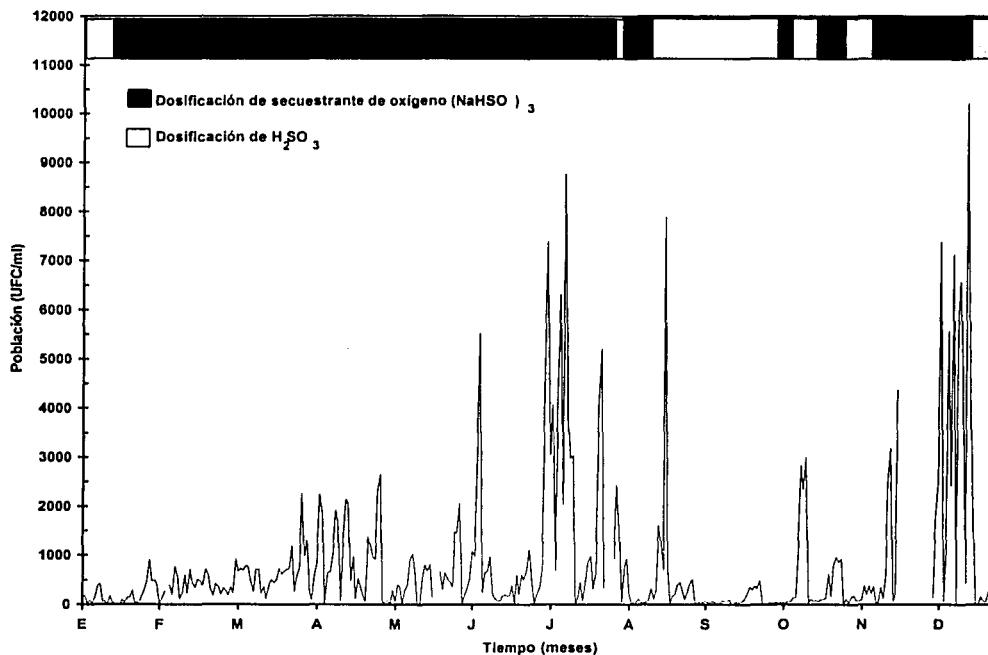


Figura 17. Comportamiento de la población bacteriana aerobia durante la dosificación de secuestrante de oxígeno.

Por lo que respecta al seguimiento de la velocidad de corrosión, se determinó que excepto en gran parte del último mes de ese año, los valores de velocidad de corrosión estuvieron por debajo de 2 mpy (figura 18). En el mes más crítico desde el punto de vista de corrosión, se alcanzaron valores de velocidad de corrosión de hasta 10.4 mpy, los cuales correspondieron a diciembre.

Estos valores de velocidad de corrosión en términos operativos no son del todo alarmantes. No obstante vistos desde una perspectiva científica resultan significativos, sobretodo si se consideran los fenómenos de corrosión localizada

incluidas las picaduras con alta velocidad de penetración que pueden ser generadas por actividad microbiana.

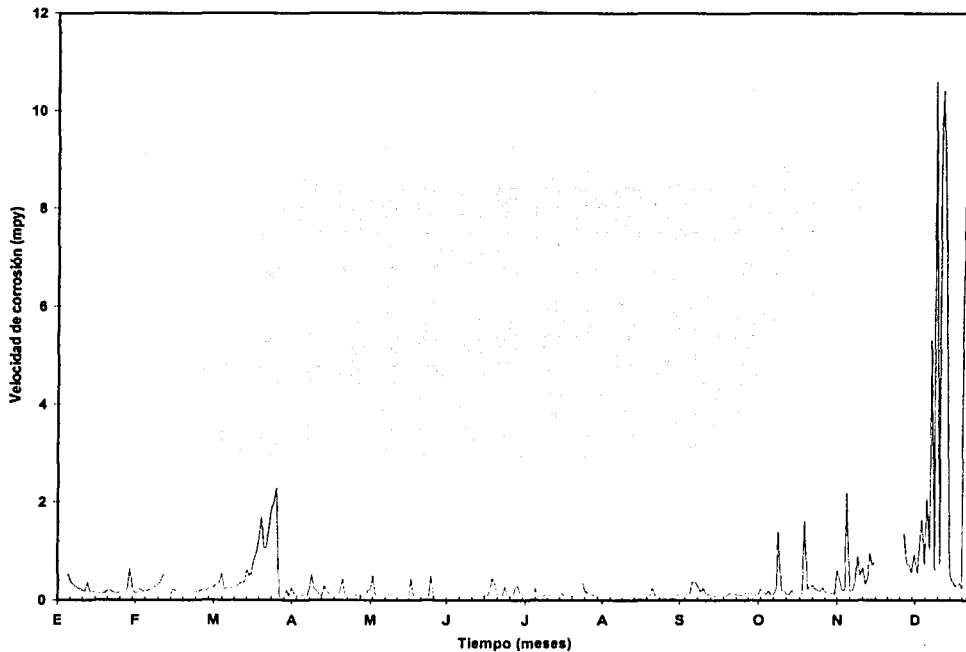


Figura 18. Seguimiento de la velocidad de corrosión en la planta de tratamiento y bombeo durante el año de 1999.

5.1.2 Comportamiento bacteriológico y de corrosión 2000.

El control de la contaminación bacteriana aerobia durante el año 2000, fue más eficiente que para el año 1999. En la figura 19 y tablas 7 y 8, se puede observar que solamente al inicio de ese periodo (enero, febrero y marzo), las poblaciones de bacterias se encontraban por arriba del límite permitido llegando a valores de 17600,

14640 y 11600 UFC/ml en el mes de enero. Este comportamiento se explica debido a que el descontrol en la población bacteriana es continuación del observado en el último mes del año 1999.

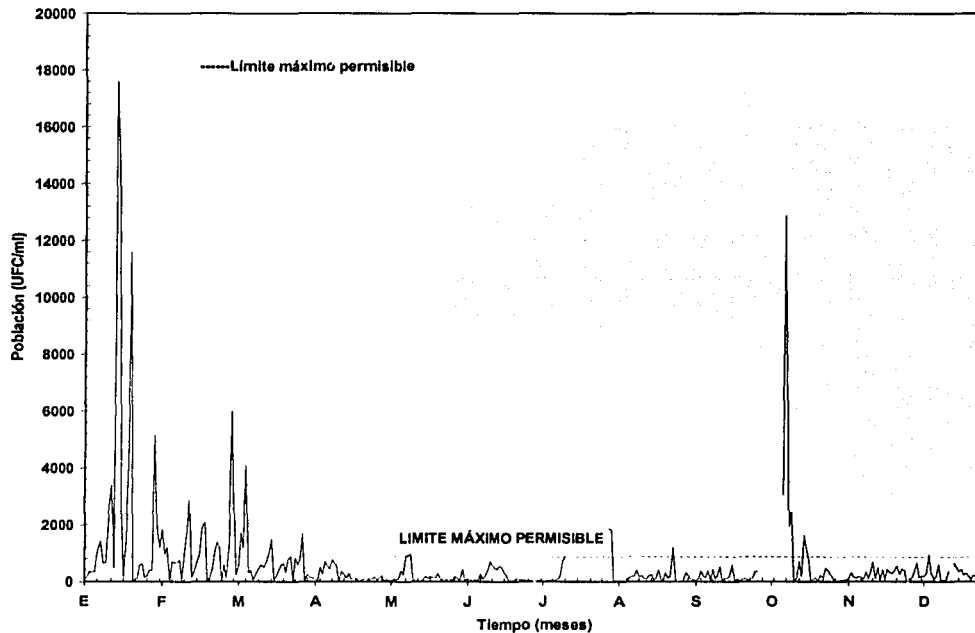


Figura 19. Contaminación bacteriana aerobia del agua de inyección detectada a la salida de la planta de tratamiento y bombeo durante el año de 2000.

En la figura 20 se muestran los valores promedio mensuales de la población bacteriana aerobia detectados en el año 2000, corroborándose que excepto para los meses ya mencionados, el control de las poblaciones aerobias fue más eficiente.

En la figura 21 se presentan los resultados obtenidos para el control bacteriológico del agua de inyección. La dosificación de los biocidas garantizó que el control

bacteriológico estuviese desde el mes de marzo de ese año, dentro del límite máximo requerido para el complejo. Así mismo, dicha dosificación se realizó de acuerdo a: 31.24% con los productos formulado basado en glutaraldehído y sales cuaternarias de amonio y 37.52% con el biocida THPS, lo anterior debido a las condiciones de contaminación bacteriana y a la disponibilidad del producto químico.

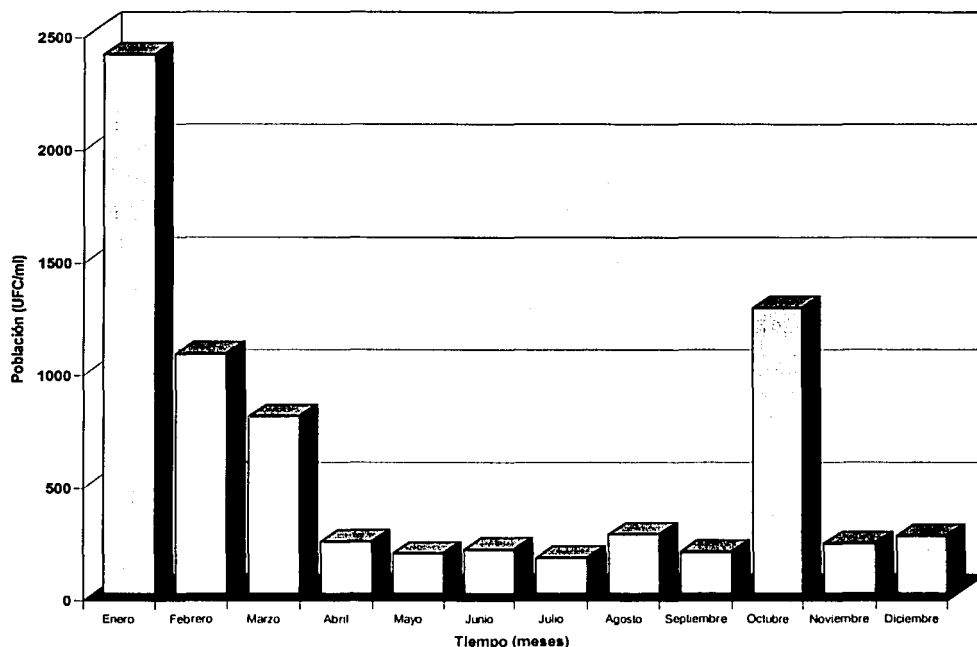


Figura 20. Valores promedio de la contaminación bacteriana aerobia del agua de inyección, detectada a la salida de la planta de tratamiento y bombeo durante el año de 2000.

Aún y cuando en este año se observó una mayor eficiencia en el control bacteriológico, el seguimiento de la velocidad de corrosión figura 22 y tablas 9 y 10, mostró velocidades de corrosión mayores que las detectadas en 1999, llegándose a

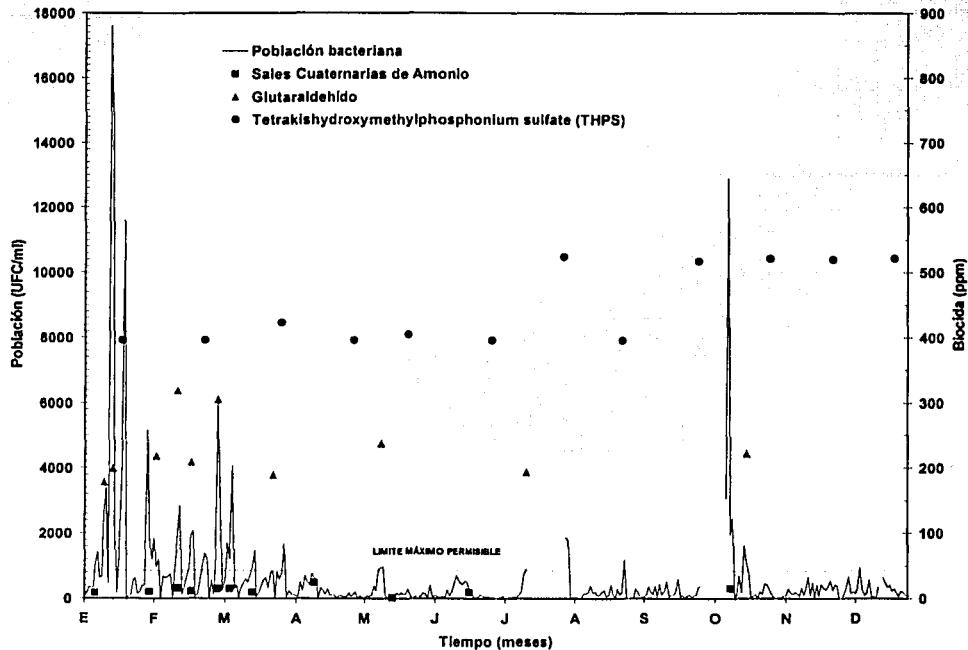


Figura 21. Control bacteriológico aerobio del agua de inyección durante el año 2000.

monitorear velocidades de hasta 6 y 9 mpy en los primeros 5 meses del año. Lo anterior sugiere que el factor abiótico del sistema bajo las condiciones prevalecientes en ese tiempo contribuyó en mayor medida para la generación del fenómeno corrosivo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

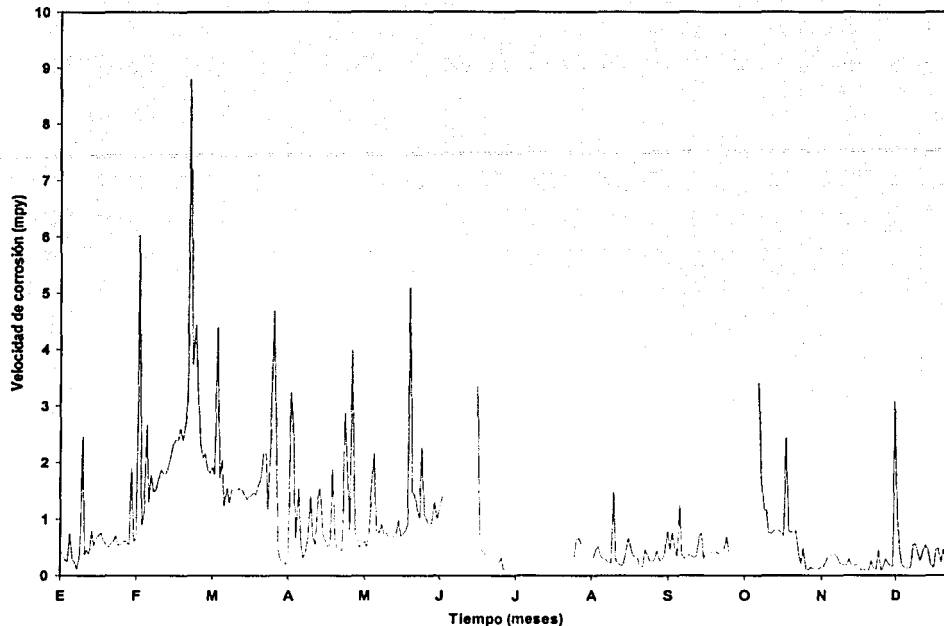


Figura 22. Seguimiento de la velocidad de corrosión en la planta de tratamiento y bombeo durante el año de 1999.

5.1.3 Impacto de la actividad bacteriana en bioelementos instalados en el interior de los acueductos.

El complejo de inyección de agua Abkatún-Pol-Chuc inició sus operaciones en el mes de marzo de 1991 con la operación de dos bombas reforzadoras que garantizaban una inyección de agua al yacimiento de 250 000 BPD, operación a baja presión. Los análisis microbiológicos incluían únicamente el uso de frascos ampoviales con medio de cultivo y la implantación de la técnica de cuenta total en

placa para la determinación de bacterias aerobias y anaerobias totales. Los muestreos se realizaban solamente en el agua del flujo de los acueductos.

Para el año 1999 el monitoreo bacteriológico mediante el uso de bioprobetas ya había sido implementado y los resultados obtenidos en ellas trataban de correlacionarse con los obtenidos de los muestreos del flujo de los acueductos.

A principios del año 2000 y como se mencionó en la metodología, se implementó un estudio en campo para determinar el impacto de la actividad bacteriana en bioelementos de bioprobetas instaladas en forma rasante en el interior de los acueductos.

Los resultados obtenidos después del tiempo de prueba que fue de 60 días, se muestran en las figuras 23 a la 35. En la figura 23 se muestra el sitio donde fue instalada una de las bioprobetas utilizadas en este estudio. Se indican (1) y (2), los puntos exactos en los que se llevo a cabo el monitoreo microbiológico / biofilm y el correspondiente a la velocidad de corrosión, los resultados de esta última variable se presentaron en la sección 5.1.2.

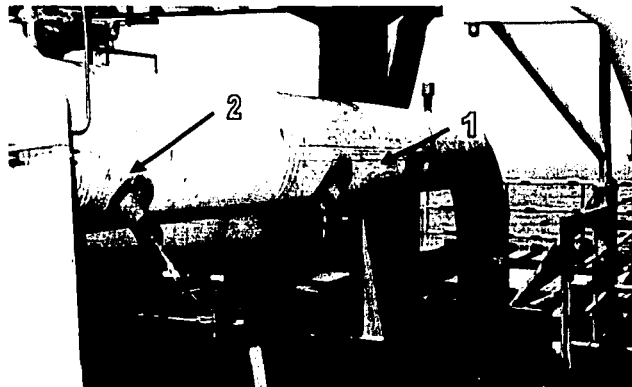


Figura 23. (1) Localización en el interior del acueducto de bioprobeta rasante. (2) Localización en el interior del acueducto de probeta de corrosión. Técnica resistencia a la polarización (Rp).

En las figuras 24 y 25 se muestra la apariencia inicial y final de la bioprobeta que fue expuesta al interior del flujo de agua de mar tratada y que se transporta por el acueducto. Concluido el tiempo de prueba (figura 25), se observó con claridad la formación de un biofilm con apariencia gelatinosa y coloración amarillo-rojiza la presencia de herrumbre producto del fenómeno corrosivo que tuvieron los bioelementos también fue observada.

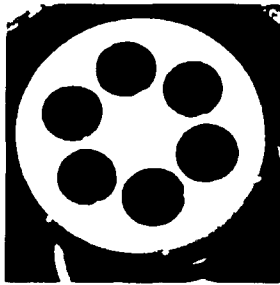
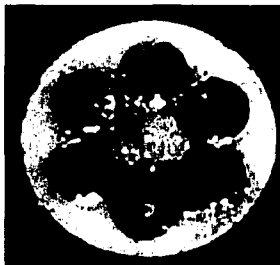


Figura 24. Aspecto de la bioprobeta, antes de su instalación en el interior del acueducto.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 25. Aspecto de la bioprobeta, después del periodo de prueba (60 días). Se observó formación de biofilm y presencia de productos de corrosión.

En la figura 26 se presenta la apariencia típica del biofilm que se formó sobre la superficie de los bioelementos la cual a esa resolución parecía ser compacta y continua en toda la superficie metálica. No obstante en la figura 27, se puede observar que el biofilm no era compacto y por el contrario presentaba diversas discontinuidades. Por debajo de esa primera capa de la biopelícula se detectó la presencia de un consorcio microbiano aerobio. La evidencia de lo anterior se puede observar en la figura 28.

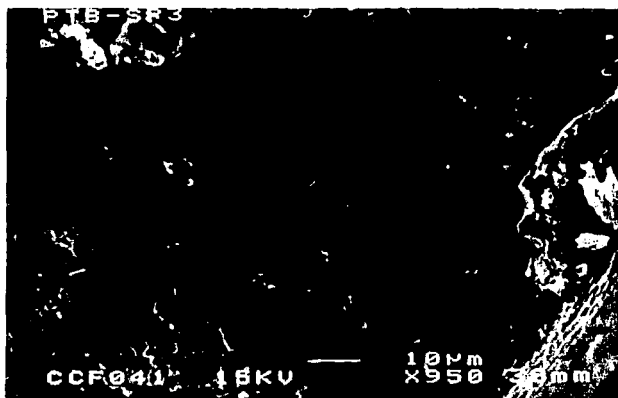


Figura 26. Superficie de uno de los bioelementos después del periodo de prueba. Biofilm en apariencia compacto y continuo.

Cuando la biopelícula fue retirada (mecánicamente) de la superficie del bioelemento, se observó un ataque superficial severo donde se hizo evidente la presencia de una gran cantidad de picaduras las cuales se pueden observar en la figura 29. La magnificación de esas picaduras figura 30, reveló la presencia de materia orgánica en su interior. Los resultados del análisis químico del material orgánico imagen 6, indicó la presencia de C, O, S, Cl, Ca y Fe, el pico del espectro correspondiente al Fe, se asocia en forma directa a las características composicionales del bioelemento.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

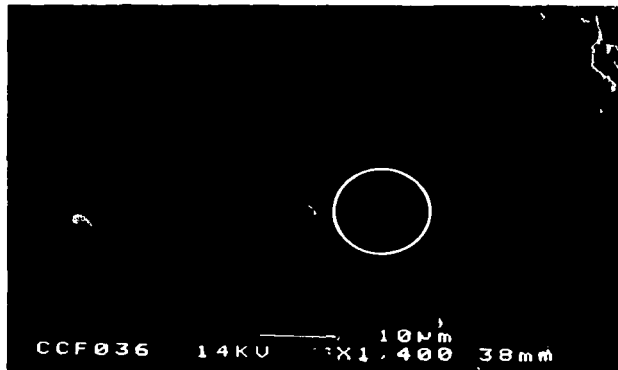


Figura 27. Morfología típica del biofilm encontrado en cada una de los bioelementos que tenía la bioprobeta. La presencia de discontinuidades en el biofilm es evidente como se muestra en la marca.



Figura 28. Evidencia de la presencia de consorcios microbianos en el interior del biofilm. Los consorcios fueron cultivados en condiciones aerobias, obteniéndose crecimiento positivo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

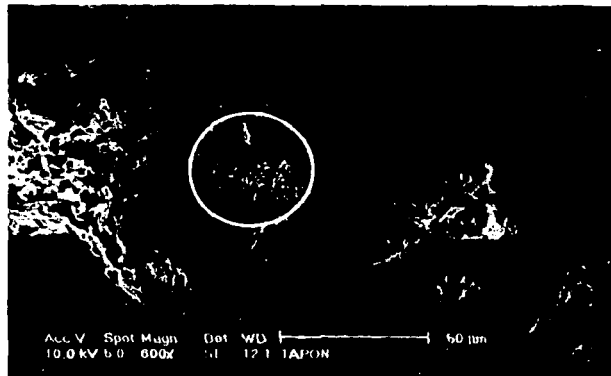


Figura 30. Magnificación de una de las picaduras, se observó la presencia de materia orgánica en su interior.



Figura 31. Superficie después de ser lavada con ácido inhibido. Se observó una región con un ataque corrosivo mucho menos agresivo que el resto del elemento. Esta región sirvió de referencia para determinar la pérdida del material metálico.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

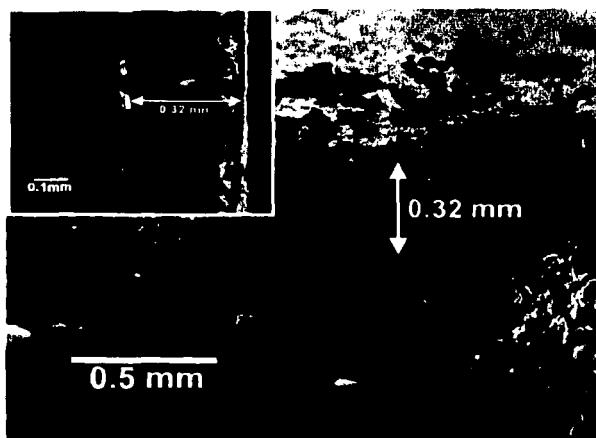


Figura 32. Profundidad en la pérdida del material metálico. La longitud promedio de la profundidad fue de 0.32 mm.



Figura 33. Magnificación de las picaduras después de la limpieza ácida del bioelemento. Características morfológicas del ataque corrosivo.

La figura 34 muestra un corte perpendicular con respecto de la superficie corroída, de uno de los bioelementos. Se pueden apreciar las características morfológicas internas de las picaduras, las cuales tuvieron profundidades de 0.28, 0.178 y 0.065 mm. La picadura que presentó la mayor profundidad se muestra en la figura 35, alcanzando una longitud de 0.34 mm.

Es conveniente puntualizar que aún y cuando se intentó el cultivo de bacterias anaerobias sobre la superficie colonizada de los bioelementos, no se obtuvo crecimiento de este tipo de microorganismos para ninguno de los casos. No obstante lo anterior, no se descarta la posibilidad de que estos microorganismos y en especial las bacterias sulfato reductoras estén contribuyendo activamente en el fenómeno corrosivo. Sobretudo porque el desarrollo de bacterias aerobias genera microambientes anaerobios en diferentes zonas del biofilm.

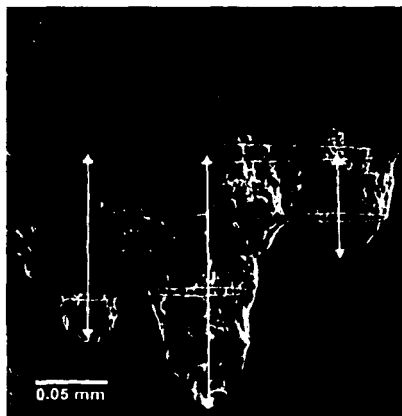


Figura 34. Corte perpendicular con respecto de la superficie corroída, de uno de los bioelementos. Morfología de la superficie interna de las picaduras. Se determinaron picaduras de 0.128, 0.178 y 0.065 mm de profundidad.

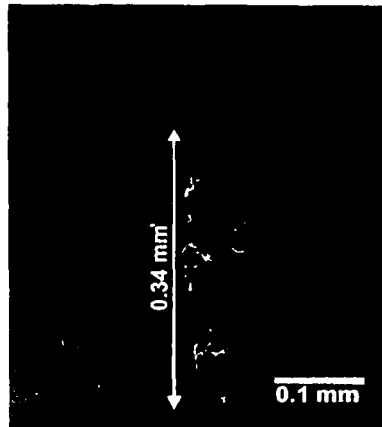


Figura 35. La picadura de mayor longitud encontrada en los bioelementos examinados fue de 0.34 mm.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.2 Evaluaciones de laboratorio.

En esta sección se presentan y analizan los resultados de las evaluaciones microbiológicas, de biología molecular y electroquímicas que se realizaron en esta tesis doctoral. Se incluyen los resultados obtenidos para el cultivo, propagación y aislamiento de las bacterias colectadas a la salida de la planta de tratamiento y bombeo y en los acueductos del sistema de inyección de agua.

5.2.1 Aislamiento y propagación de bacterias aerobias.

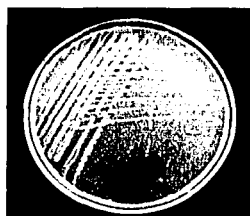
De las muestras colectadas en campo tanto en el flujo de la línea como mediante el uso de bioprobetas, se aislaron un total de 24 colonias bacterianas con apariencia colonial distinta entre ellas. Después de realizadas las actividades de aislamiento, se determinó la existencia solamente de 11 cepas con características coloniales diferentes. Para los propósitos particulares de este trabajo doctoral, se seleccionaron únicamente 4 de las cepas previamente aisladas, las cuales fueron propagadas y mantenidas viables para la realización posterior de las evaluaciones electroquímicas.

La selección de las cepas bacterianas estuvo basada principalmente, en la cinética de crecimiento de las bacterias y en la velocidad de adaptación de las mismas al medio de cultivo que fue utilizado para su propagación y posteriormente para las pruebas electroquímicas. Las cepas seleccionadas fueron: MBA-1B2, MBA-5B1, MBA-6A2 y MBA-9B1, que fueron bacterias aisladas de la superficie de los bioelementos de las bioprobetas instaladas en el interior de los acueductos.

En las figuras 36 a la 39 se presentan fotografías de las cajas de petri conteniendo colonias de las bacterias seleccionadas durante el proceso de aislamiento. De igual forma se presentan fotografías de microscopía óptica 100X de preparaciones en portaobjetos de las bacterias seleccionadas.

La caracterización morfológica a este nivel de microscopía indicó lo siguiente:

Bacteria	Tinción de Gram	Forma	Colonia
MBA-1B2	Negativo	bacilos	Amarilla intensa
MBA-5B1	Negativo	bacilos	Crema
MBA-6A2	Negativo	bacilos	Anaranjada
MBA-9B1	Positivo	bacilos	Blanquesina

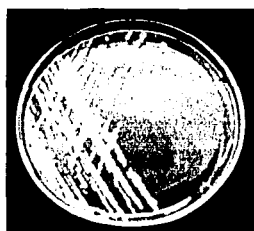


(a)



(b)

Figura 36. Placas de aislamiento y caracterización microscópica para la cepa MBA-1B2. (a) Desarrollo de colonias con coloración amarilla intensa y apariencia seca. A las 48 horas de crecimiento alcanzan un tamaño de 0.6 a 0.9 mm de diámetro. (b) Fotografía con microscopía óptica 100X. Se observó la presencia de bacilos rectos gram negativos.



(a)



(b)

Figura 37. Placas de aislamiento y caracterización microscópica para la cepa MBA-5B1. (a) Desarrollo de colonias con coloración crema, translúcidas en los bordes. A las 48 horas de crecimiento alcanzan un tamaño de 1 a 3 mm de diámetro. (b) Fotografía con microscopía óptica 100X. Se observó la presencia de bacilos gram negativos.



Figura 38. Placas de aislamiento y caracterización microscópica para la cepa MBA-6A2. (a) Desarrollo de colonias con coloración anaranjada intensa y bordes translúcidos. A las 48 horas de crecimiento alcanzan un tamaño de 1 a 4 mm de diámetro. (b) Fotografía con microscopía óptica 100X. Se observó la presencia de bacilos gram negativos.

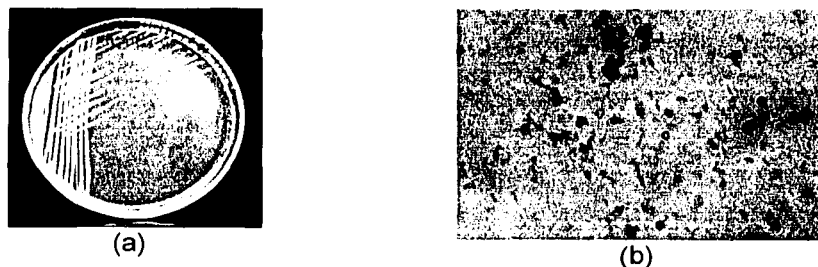


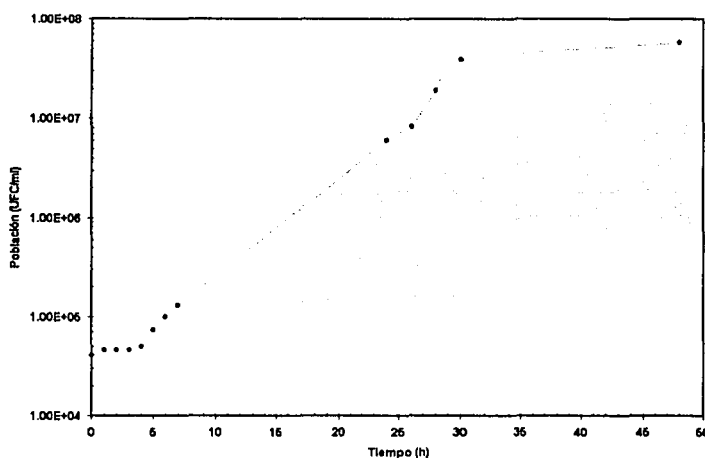
Figura 39. Placas de aislamiento y caracterización microscópica para la cepa MBA-9B1. (a) Desarrollo de colonias con coloración blanquesina y apariencia seca. A las 48 horas de crecimiento alcanzan un tamaño de 3 a 4 mm de diámetro. (b) Fotografía con microscopía óptica 100X. Se observó la presencia de bacilos gram positivos

5.2.2 Determinación de curvas de crecimiento.

A las bacterias seleccionadas se les determinó su curva de crecimiento típica durante los ensayos electroquímicos. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

La figura 40, muestra la curva de crecimiento obtenida para la bacteria MBA-1B2, en ella se aprecian con facilidad tres fases típicas de su crecimiento. La fase Lag que se presenta desde las 0 hasta las 4 horas, la fase Log o exponencial que se presentó desde las 5 hasta las 30 horas y a partir de ese tiempo, se inició la fase estacionaria. La población inicial de bacterias fue de 41×10^3 ufc/ml. y la final de 58×10^6 ufc/ml, con una velocidad de crecimiento fue de 0.2401 h^{-1} y un tiempo de duplicación de 2.88 h.

Para la cepa MBA-5B1, figura 41 y tabla 12, a diferencia de la anterior ésta bacteria presentó una fase Lag muy corta (1h), seguida de una prolongada y muy activa fase Log la cual se mantuvo desde las 2 hasta las 26 h, alcanzando una población máxima de 210×10^6 ufc/ml. A partir de ese tiempo se observó una disminución de la población bacteriana de hasta 64×10^6 ufc/ml. Posteriormente la bacteria alcanzó su fase estacionaria de crecimiento. La población inicial fue de 3.6×10^3 ufc/ml y la final de 48×10^6 ufc/ml, con una velocidad de crecimiento de 0.3247 h^{-1} y un tiempo de duplicación 2.13 h.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 40. Curva de crecimiento de la cepa bacteriana aerobia MBA – 1B2.

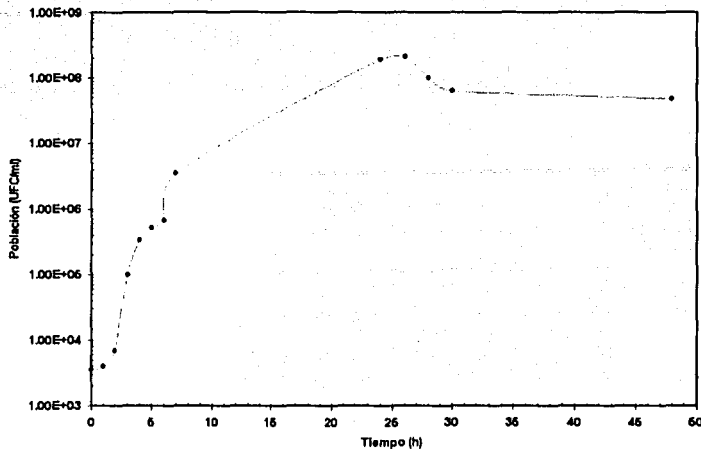


Figura 41. Curva de crecimiento de la cepa bacteriana aerobia MBA – 5B1.

La bacteria MBA-6A2, figura 42 y tabla 13, mostró una fase Lag de 3 horas pasando de una población de 48×10^3 a 52×10^3 ufc/ml, después de ese tiempo y a partir de esa población, se detectó una fase de crecimiento logarítmico acelerado hasta las ocho horas donde la población llegó a 35×10^6 ufc/ml, seguido de ese tiempo se presentó una aparente fase estacionaria hasta la hora 32 donde la población alcanzó 110×10^6 ufc/ml. No obstante después de las 32 horas y hasta las 48, se determinó un incremento de la población hasta 14×10^9 ufc/ml. La población inicial fue de 48×10^3 ufc/ml y la final de 14×10^9 ufc/ml, con una velocidad de crecimiento de 1.4221 h^{-1} y un tiempo de duplicación 0.48 h .

La bacteria MBA-9B1, figura 43 y tabla 14, a diferencia de las otras bacterias, mostró una fase Lag o de adaptación muy prolongada de 19 horas, pasando de una población de 7.1×10^3 a 9.2×10^3 . A partir de esta fase, se determinó una fase logarítmica continua hasta las 47 horas (36×10^6 ufc/ml) observándose en la hora 48, una disminución de la población bacteriana de 2.0×10^6 ufc/ml. Esta bacteria tuvo una velocidad de crecimiento de 0.2188 h^{-1} y un tiempo de duplicación 3.16 h .

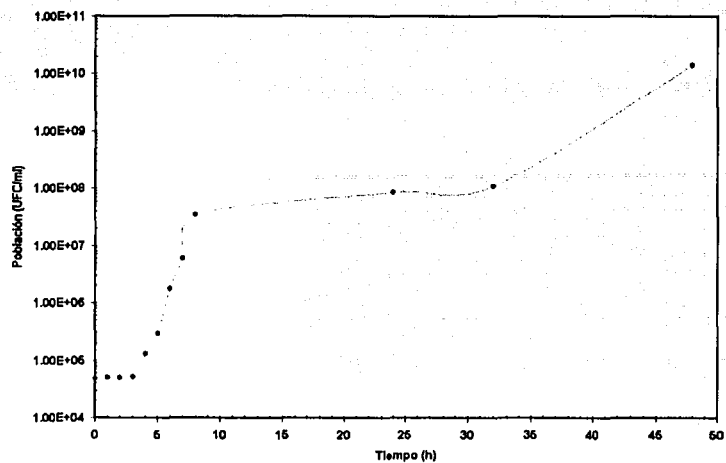


Figura 42. Curva de crecimiento de la cepa bacteriana aerobia MBA – 6A2.

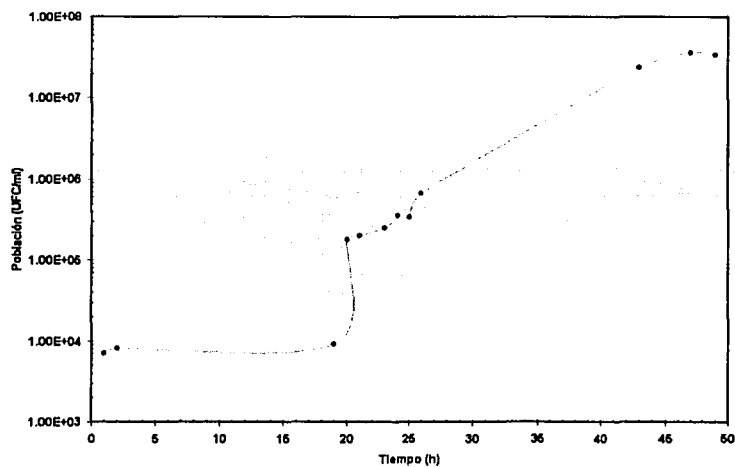


Figura 43. Curva de crecimiento de la cepa bacteriana aerobia MBA – 9B1.

En forma comparativa en la figura 44 se muestran las curvas de crecimiento obtenidas para las cuatro cepas seleccionadas. En términos generales podemos decir que las cepas MBA-1B2 y MBA-5B1 alcanzaron su fase estacionaria de crecimiento a partir de la hora 30 de la prueba. Las cepas MBA-6A2 y MBA-9B1 no mostraron una fase estacionaria típica durante el tiempo de la prueba. Se determinó también que la cepa MBA-9B1 a diferencia de las otras bacterias mostró una fase Lag o de adaptación muy prolongada.

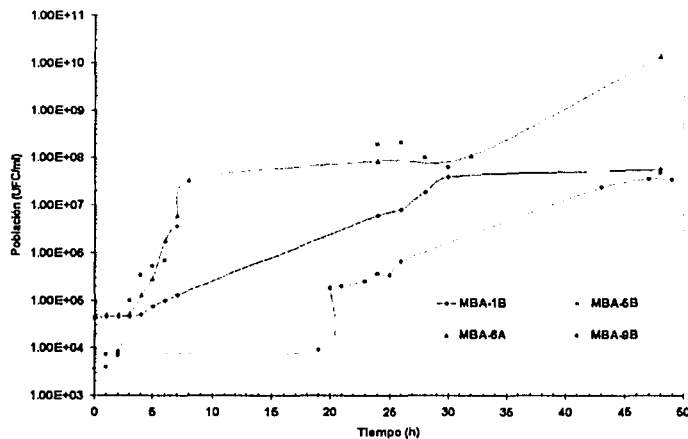


Figura 44. Curva de crecimiento en condiciones de laboratorio de las cepas MBA: 1B2, 5B1, 6A2 y 9B1.

5.2.3 Identificación bacteriológica 16S rRNA ribosomal.

Paralelamente a los ensayos anteriores y a las evaluaciones electroquímicas realizadas, se prepararon cultivos puros de cada una de las cepas bacterianas aerobias y se enviaron para su identificación a los laboratorios MIDI LABS en Newark, USA. La identificación de las bacterias aerobias en estudio, se realizó a través de la secuenciación de 500 pares de bases del gen que codifica para la subunidad 16S del RNA ribosomal.

Los resultados reportados para cada bacteria indicaron lo siguiente:

Bacteria	GenBank	ID (%)	Ribosomal Database Project (RDP)	SR
MBA-1B2	<u><i>Vibrio hollisae</i></u>	93	<u><i>Vibrio hollisae</i></u>	.80
MBA-5B1	<u><i>Alteromonas macleodii</i></u>	97	<u><i>Alteromonas macleodii</i></u>	.92
MBA-6A2	<u><i>Ferrimonas balearica</i></u>	94	<u><i>Ferrimonas balearica</i></u>	.76
MBA-9B1	<u><i>Agrobacterium stellulatum</i></u>	99	<u><i>Rhizobium leguminosarum</i></u>	.71

ID: Porcentaje de identidad: Es esencialmente el porcentaje de similitud.

SR: Rango de similitud: Rango. SR > .95 indica identidad de especie.

Bacteria	Applied Biosystem's Microseq Database	Diferencias (%)	Nivel de Confianza
MBA-1B2	<u><i>Vibrio hollisae</i></u>	5.86	Género
MBA-5B1	<u><i>Alteromonas macleodii</i></u>	1.25	Género
MBA-6A2	<u><i>Aeromonas enteropelógenes</i></u>	9.72	No identificado
MBA-9B1	<u><i>Dichotomicrobium thermohalophilum</i></u>	8.10	No identificado

Diferencias %: Indican las diferencias entre la muestra y el vecino más cercano en la base de datos.

Nivel de confianza: Indica el nivel de identificación.

De los resultados anteriores podemos indicar que las cepas MBA-1B2 y MBA 5B1 tienen como vecinos filogenéticos más cercanos a: *Vibrio hollisae* y *Alteromonas macleodii* respectivamente, en las tres bases de datos consultadas. No obstante, su posición filogenética sugiere que se trata de nuevas especies de bacterias o que su secuencia del gen 16S rRNA no está aún reportada en esas bases de datos.

La bacteria MBA-6A2 tuvo como vecino filogenético más cercano a *Ferrimonas balearica* al compararse con Gen Bank y RDP, mientras que con MicroSeq el vecino

más cercano reportado fue *Aeromonas enteropelógenes*. La cepa MBA-9B2 reporto como vecinos más cercanos en Gen Bank a *Agrobacterium stellulatum*, en RDP *Rhizobium leguminosarum* y en MicroSeq *Dichotomicrobium thermohalophilum*. De igual forma que con las bacterias anteriores, no se encontró una coincidencia exacta entre las bacterias aisladas del sistema de inyección de agua y las reportadas en las bases de datos consultadas. Por lo anterior se puede decir que también se trata de especies nuevas o no reportadas en las bases de datos consultadas.

Se debe puntualizar que MIDI LABS utiliza en forma primaria la base de datos de Applied Biosystem's Microseq y cuando los géneros que se analizan no tienen similitudes o no son del todo idénticos con los almacenados en su base de datos, entonces se busca la correspondencia en otras bases de datos como las ya mencionadas con anterioridad.

Con base en lo anterior, a continuación se presentan los árboles filogenéticos reportados para las bacterias aerobias en estudio:

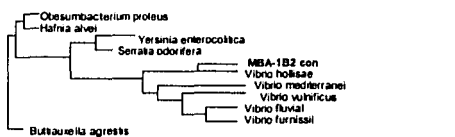
CEPA MBA-1B2

Alignment: MBA-1B2 con

- 5.86 % 538 *Vibrio holisae*
- 8.40 % 538 *Vibrio fluvialis*
- 8.40 % 538 *Vibrio furnissii*
- 8.67 % 538 *Vibrio mediterranei*
- 10.42 % 528 *Obesumbacterium proteus*
- 10.51 % 528 *Yersinia enterocolitica*
- 10.51 % 528 *Serratia odorifera*
- 10.51 % 528 *Halma alvei*
- 10.51 % 528 *Vibrio vulnificus*
- 10.74 % 520 *Butanella agrestis*

Neighbor Joining Tree

N Join: 3.865 %



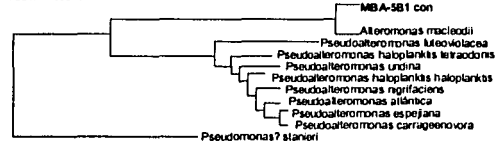
CEPA MBA-5B1

Alignment: MBA-5B1 con

- 1.25 % 520 *Aeromonas macleodii*
- 8.37 % 520 *Pseudoalteromonas haloplanktis tetradonis*
- 8.75 % 522 *Pseudoalteromonas haloplanktis haloplanktis*
- 9.13 % 522 *Pseudoalteromonas nigrifaciens*
- 9.28 % 522 *Pseudoalteromonas atlántica*
- 9.33 % 522 *Pseudoalteromonas undina*
- 9.52 % 522 *Pseudoalteromonas espejana*
- 9.71 % 522 *Pseudoalteromonas carraglenovora*
- 10.67 % 520 *Pseudoalteromonas luteoviolacea*
- 12.98 % 526 *Pseudomonas? staneri*

Neighbor Joining Tree

N Join: 7.950 %



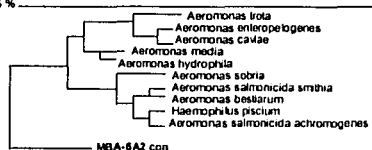
CEPA MBA-6A2

Alignment: MBA-6A2 con

0.72 % 530 *Aeromonas sobria*
 0.72 % 530 *Aeromonas enteropelogenes*
 0.72 % 530 *Aeromonas media*
 0.72 % 530 *Aeromonas caviae*
 0.01 % 530 *Aeromonas salmonicida smitha*
 0.01 % 530 *Aeromonas bestiarum*
 0.01 % 530 *Aeromonas hydrophila*
 0.01 % 530 *Haemophilus piscium*
 0.01 % 530 *Aeromonas trola*
 0.91 % 530 *Aeromonas salmonicida achromogenes*

Neighbor Joining Tree

N Join: 8.245 %



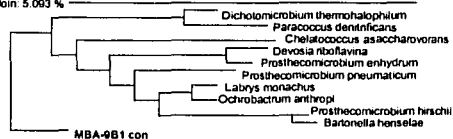
CEPA MBA-9B1

Alignment: MBA-9B1 con

8.10 % 469 *Dichotomicrobium thermohalophilum*
 8.30 % 470 *Devosia riboflavina*
 8.74 % 468 *Labrys monachus*
 8.74 % 469 *Prosthecomicrobium pneumaticum*
 8.98 % 469 *Ochrobactrum anthropi*
 9.13 % 471 *Paracoccus denitrificans*
 9.34 % 471 *Chelatococcus asaccharovorans*
 9.59 % 469 *Prosthecomicrobium hirschii*
 9.59 % 469 *Prosthecomicrobium enthydum*
 9.77 % 472 *Bartonella henselae*

Neighbor Joining Tree

N Join: 5.093 %



Los resultados anteriores son especialmente relevantes aún y cuando la detección de bacterias "nuevas" era muy probable. Sobretudo porque se está trabajando en un ambiente poco estudiado y que posee características fisicoquímicas y microbiológicas especiales como son: la presencia de diferentes productos químicos utilizados en la planta de tratamiento y bombeo, para garantizar la calidad del agua de inyección. Dentro de estos productos se incluyen inhibidores de corrosión e incrustación, secuestrantes de oxígeno, surfactantes, polímeros y biocidas. Estos últimos se dosifican al agua de inyección para controlar la contaminación microbiana del sistema ya que son sustancias químicas tóxicas "veneno" para los microorganismos, al contrario de los biostatos que solamente retardan el crecimiento microbiano. ⁽¹³⁾

5.2.4 Caracterización morfológica de bacterias.

Con la finalidad de caracterizar las bacterias estudiadas y los fenómenos de corrosión microbiológica que ellas generan o aceleran, se utilizó la metodologías de microscopía electrónica de barrido en las diferentes muestras obtenidas de campo y de las evaluaciones electroquímicas de laboratorio.

5.2.5 Pruebas de ruido electroquímico.

La figura 45 muestra los datos de ruido en corriente durante 48 horas de prueba para la cepa MBA -1B2, comparada con la curva de crecimiento bacteriano de la misma cepa y la prueba control. En ella se observa que los valores correspondientes a la prueba con bacterias presentan gran inestabilidad durante las primeras 36 horas del experimento, los cuales están directamente correlacionados con las diferentes fases de la curva de crecimiento bacteriano: fases de adaptación, crecimiento exponencial e inicio de la estacionaria. Estos cambios en corriente se generaron tanto en la dirección positiva como en la negativa con respecto al valor cero de corriente. Lo anterior está asociado con la modificación de la interfase electroquímica debido al metabolismo microbiano, y muestra la falta de simetría cinética en ambos electrodos de trabajo, es decir que estos cambian su condición interfacial en tiempo y forma distintos. Como ejemplo de ello, se observó claramente entre las horas 6 y 11 de la prueba, después de 2 horas de haber iniciado la fase logarítmica, que ambos electrodos contribuyen, en distintos tiempos, con mayor corriente: en el primer caso a la hora 6 y en el segundo en la hora 11.

Después de presentarse el primer máximo en la corriente, ésta comienza a disminuir durante las 6 horas siguientes hasta alcanzar el valor mínimo en la escala negativa. Estos cambios de dirección en la corriente pueden asociarse con la adaptación de las bacterias a las condiciones del medio y el establecimiento posterior de una comunidad microbiana (biofilm) sobre la superficie metálica, la cual se da en forma aleatoria. Además, aunado a su aleatoriedad, podría ser más rápida en alguno de los electrodos.

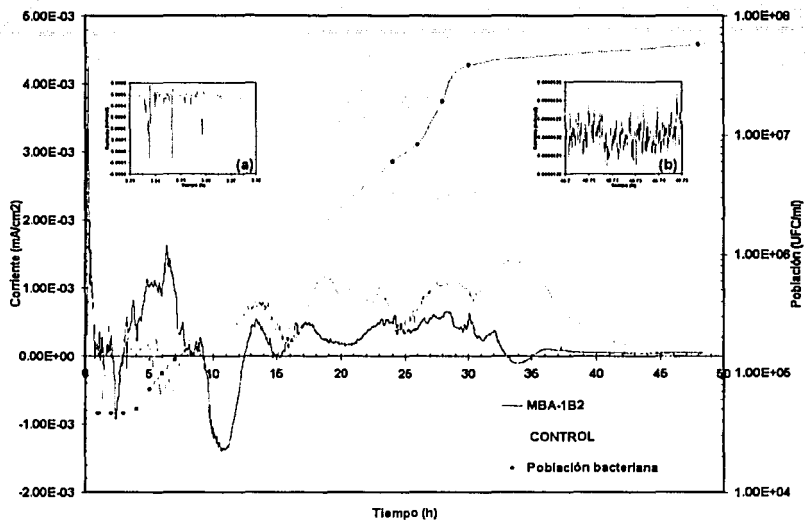


Figura 45. Respuesta de ruido electroquímico en corriente vs Curva de crecimiento cepa MBA-1B2.

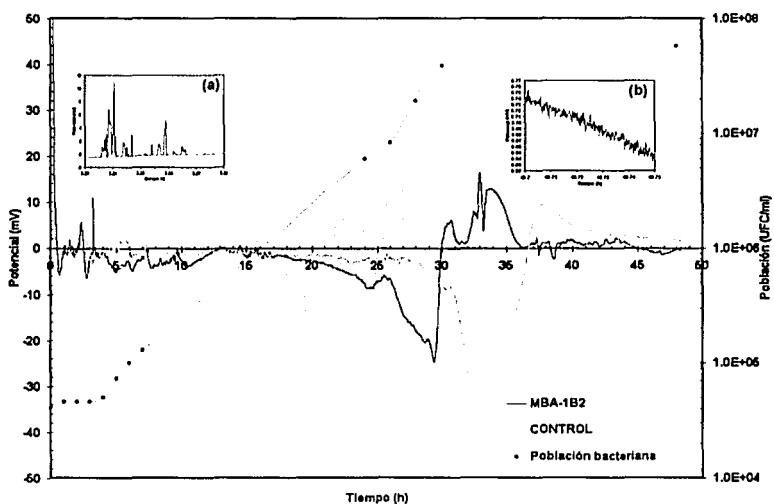


Figura 46. Respuesta de ruido electroquímico en potencial vs Curva de crecimiento cepa MBA-1B2.

Como se observa en la gráfica, a partir de la hora 36 la corriente tiende a estabilizarse alrededor de cero, de lo cual se podría pensar que empieza a establecerse un equilibrio dinámico en el sistema metal/biofilm/electrolito. Un valor muy pequeño en la corriente representa una disminución de la cinética de las reacciones de transferencia de carga, y como consecuencia establecería una disminución en la velocidad de corrosión. Las gráficas interiores (a) y (b) de la figura 30 presentan los valores de corriente para un intervalo de 3 min. En ellas se observa que los transitorios durante las primeras horas (figura 45(a)), cuando las bacterias se encuentran en su fase de adaptación y/o exponencial, son de mayor frecuencia que aquellos del final de la prueba, es decir durante la fase estacionaria (figura 45(b)). No obstante, la amplitud de los transitorios es mayor en las primeras horas que durante las finales, lo cual indicaría que, a pesar de la formación de la biopelícula y de la atenuación de la corrosión (figura 55), existe aún actividad microbiana dentro de la biopelícula capaz de emitir esos pequeños pero frecuentes transitorios.

Cabe señalar que los cambios de corriente en ambas direcciones que se presentan al inicio de la prueba (2 primeras horas), puede deberse a que la interfase electroquímica tiende a alcanzar su estado "estable" característico en el medio iónico de prueba (E_{corr}), observándose variaciones desde 4×10^{-3} hasta -1×10^{-3} mA/cm². En ese mismo tiempo la población bacteriana observó su fase de adaptación la cual se prolongó hasta la hora 5 del experimento.

En el caso de la curva que corresponde a la prueba control también son perceptibles los cambios en la corriente a lo largo del experimento. En la misma manera en que los datos de la corriente para la cepa MBA -1B2 tienden a mantenerse constantes a partir de un determinado tiempo, así también lo hacen los del control. Sin embargo el proceso de estabilización de la corriente (corriente "constante") se ve retardado en apariencia hasta el final de la prueba, entre las horas 46 y 47. Este hecho sugiere que el medio de cultivo utilizado para las pruebas electroquímicas tiene un efecto *per*

se, en favor del fenómeno corrosivo, y que los productos de corrosión en ausencia de bacterias parecen determinar el comportamiento de corriente estable hacia el final del ensayo.

Cabe mencionar que la población bacteriana inicial para esta prueba fue de 41,000 UFC/ml y la población final de 58,000,000 UFC/ml, con lo cual se corrobora que la bacteria estuvo metabólicamente activa a lo largo del experimento.

En la figura 46 se muestran los cambios en potencial que se generaron para la cepa durante la misma prueba. Al inicio se aprecia una disminución del potencial debida a su estabilización en el medio electrolítico, desde 50 hasta -6 mV. A partir de la primera hora de prueba los valores oscilan en el intervalo de ± 8 mV hasta las 15 horas; después de éste tiempo existe una disminución progresiva del potencial hasta un valor -25 mV. Este descenso se explica por el hecho de que el potencial del electrodo que funcionaba como referencia fue mayor que el del electrodo de trabajo, lo cual significa que en este último se ha establecido un fenómeno corrosivo. Cottis³⁰ reporta que este tipo de comportamiento, de cambio sostenido en el potencial, puede ser asociado con el inicio de corrosión localizada, y que usualmente corresponde al inicio de un fenómeno de corrosión en hendidura ("crevice"). Con esto, se demostraría la diferencia en la cinética de los electrodos, es decir, la falta de simetría entre ambos.

Las disminuciones en el potencial antes descritas se correlacionan con el cambio de fase en la curva de crecimiento, de logarítmica a estacionaria.

La curva para la prueba control que se observa en la misma figura muestra un comportamiento similar a aquella con bacterias, pero retardado y de mayor magnitud, alrededor de -35 mV. A partir de la hora 40 el potencial presentó un comportamiento con menos variaciones y tendiente a hacerse asintótico con el eje del tiempo.

La figura 47 muestra la respuesta de ruido electroquímico en corriente obtenida durante la experimentación con la bacteria MBA - 5B2. Se puede observar que esta bacteria se adaptó rápidamente a las condiciones del medio de prueba, por lo cual su fase de adaptación en la curva de crecimiento es de corta duración. Debido a lo anterior la respuesta en los valores de corriente fue significativa, observándose variaciones desde aproximadamente 2×10^{-3} hasta -2×10^{-3} mA/cm² durante las 3 primeras horas. De igual manera la señal de ruido durante las 12 primeras horas coincide con la proliferación bacteriana acelerada observada en este caso, lo cual queda de manifiesto por la mayor pendiente en la curva de crecimiento de la bacteria. A partir de las 12 horas de experimentación tiempo durante el cual la población bacteriana aún se encontraba en su fase logarítmica, la señal de corriente se atenúa hasta valores prácticamente asintóticos con el eje del tiempo por lo que es de esperarse que el fenómeno de corrosión se vea disminuido, y sea corroborado con la obtención de los valores de velocidad de corrosión obtenidos a partir de la relación de Stern y Geary (figura 55).

Los valores obtenidos para el potencial en este ensayo se presentan en la figura 48 en donde se puede observar que durante el período de las 10 primeras horas, las variaciones en voltaje son pequeñas y se encuentran en el intervalo de 3 a -3 mV. A partir de la hora 11 el potencial se mantiene prácticamente constante alrededor de 4 mV, este comportamiento, además del paralelismo de la corriente con el eje del tiempo, puede ser indicativo de que el fenómeno corrosivo es predominantemente uniforme, lo cual se fundamenta con los valores obtenidos para el índice de localización (figura 53). Este hecho, también fue observado para el resto de las cepas, así como la pequeña amplitud de los transitorios tanto en la corriente como en el potencial, siendo estos del orden de decenas de μ A y centenas de μ V, respectivamente.

Para la cepa bacteriana MBA - 6A2 los resultados de ruido en corriente se muestran en la figura 49. En esta figura se puede observar que las mayores variaciones en la

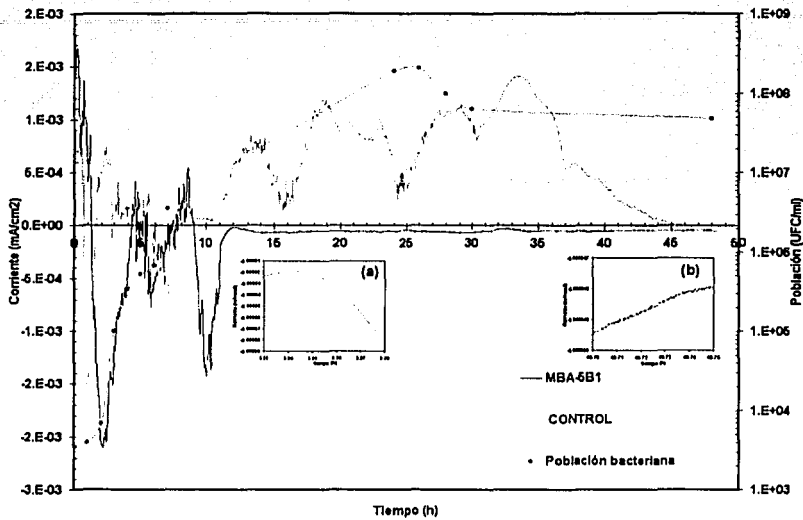


Figura 47. Respuesta de ruido electroquímico en corriente vs Curva de crecimiento cepa MBA-5B1.

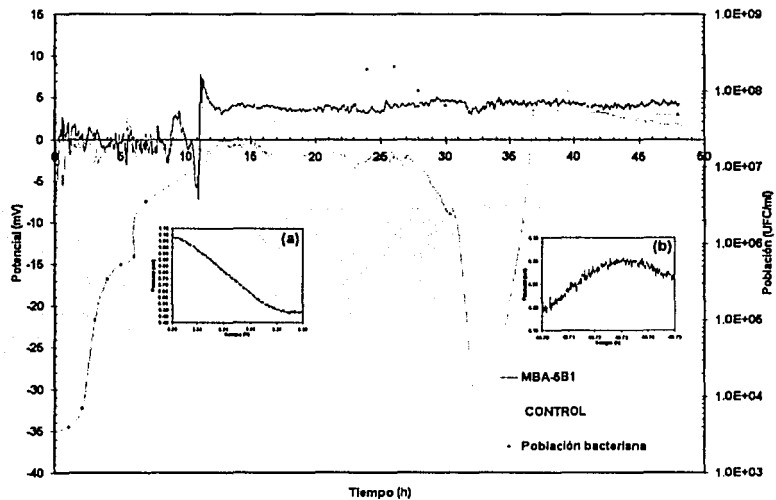


Figura 48. Respuesta de ruido electroquímico en potencial vs Curva de crecimiento cepa MBA-5B1.

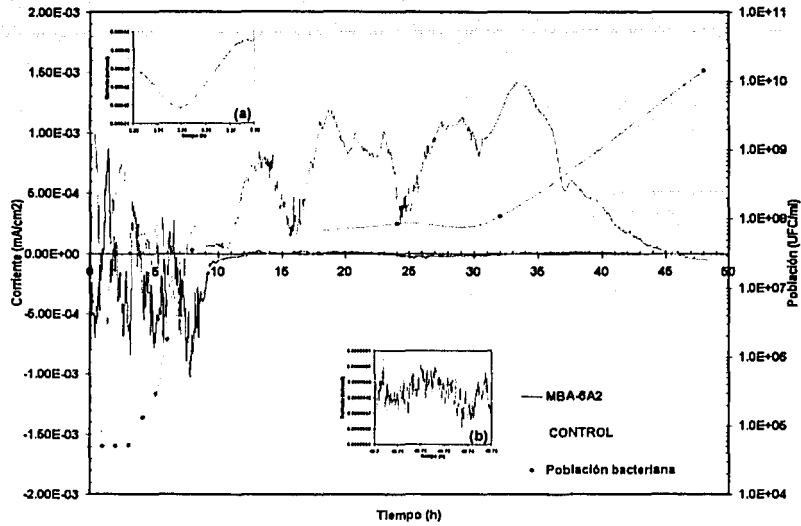


Figura 49. Respuesta de ruido electroquímico en corriente vs Curva de crecimiento cepa MBA-6A2.

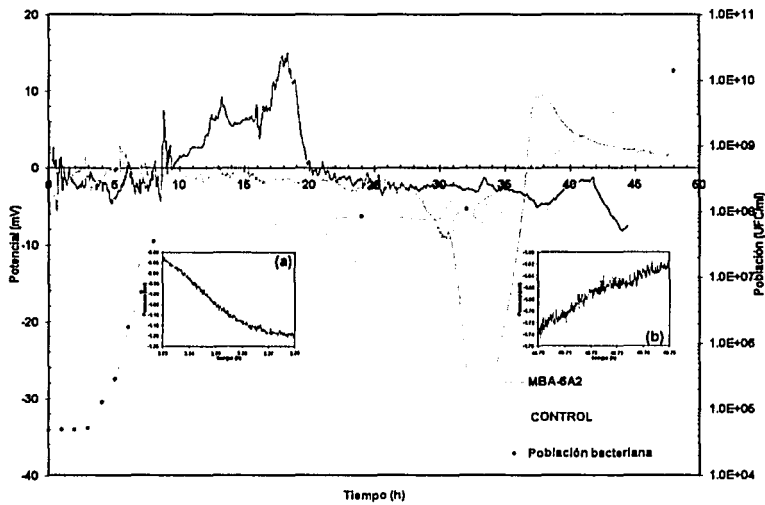


Figura 50. Respuesta de ruido electroquímico en potencial vs Curva de crecimiento cepa MBA-6A2.

señal se presentan aproximadamente durante las 10 primeras horas de prueba observándose valores de corriente que oscilan de positivo a negativo en un intervalo entre 1×10^{-3} a -1×10^{-3} mA/cm², aproximadamente. Este comportamiento en la variación de la corriente, se correlaciona con las fases de adaptación y logarítmica acelerada del crecimiento de la bacteria en estudio; es de inferir entonces, que el establecimiento bacteriano en la superficie metálica de los electrodos de prueba, genera cambios significativos en la interfase metal/biofilm/electrolito los cuales se ven reflejados en las variaciones de la corriente medida. A partir de la hora 10 del experimento la señal en corriente tiende a cero y es prácticamente asintótica al eje del tiempo por lo que puede decirse que el fenómeno corrosivo se ve significativamente disminuido.

La condición anterior se correlaciona perfectamente con el inicio de la fase estacionaria de crecimiento hasta aproximadamente la hora 30, ya que a partir de ese tiempo, el comportamiento de la población bacteriana observó un incremento sustancial en el número de bacterias presentes de aproximadamente 1×10^8 hasta 1×10^{10} ufc/ml. Este incremento en la población bacteriana no generó modificaciones en la señal de corriente la cual se mantuvo prácticamente en cero mA/cm², por lo que la presencia de una mayor población bacteriana en el sistema no indujo, en este caso, a cambios significativos en el fenómeno corrosivo. El comportamiento anterior puede ser debido, como se ha mencionado anteriormente, a que la biopelícula formada sobre la superficie metálica, generó una condición estable en la interfase metal/biofilm, debido al efecto barrera aparente de la biopelícula. Sin embargo, si se considera la propuesta de formación de la biopelícula^(15, 59), el efecto inhibitor o retardador podría ser solamente transitorio debido a que dichas biopelículas presentan un fenómeno conocido como "sloughing": desprendimiento de fragmentos que dejan al descubierto la superficie sobre la cual se formaron, induciéndose así un fenómeno de corrosión localizada. Sin embargo, el tiempo de prueba no permitió observar dicha etapa del desarrollo de las biopelículas, lo cual queda fuera del alcance del presente trabajo.

Por lo que respecta a la respuesta de ruido electroquímico en potencial para la misma bacteria (figura 50), se puede observar un incremento en la señal de potencial a partir de la hora 8 y hasta la hora 20 lo cual concuerda con el inicio y continuación de la fase estacionaria de crecimiento, el resto de los valores obtenidos para el voltaje mantienen un comportamiento que en términos generales puede ser considerado como de poca variación.

Finalmente los resultados de las respuestas de ruido en corriente y potencial obtenidos para la bacteria MBA - 9B2, se presentan en las figuras 51 y 52 respectivamente. En la figura 51 se puede observar que las fluctuaciones en la señal de corriente son pequeñas comparadas con las obtenidas para las otras bacterias estudiadas. Dichas fluctuaciones oscilan aproximadamente en el rango de 1×10^{-3} y -1×10^{-3} mA/cm². Desde el inicio y hasta las 15 horas de prueba después de este tiempo, la señal tiende a mantenerse constante y paralela al eje del tiempo hasta que a partir de la hora 30 el valor se vuelve prácticamente de 0 mA-cm². Es de resaltar que precisamente las mayores variaciones en la señal (hasta la hora 15), corresponden con el mantenimiento de la fase exponencial del crecimiento de esta bacteria. El comportamiento anterior que en términos generales también fue observado para las demás bacterias, sugiere que los microorganismos estudiados tienen influencia en diferentes grados de severidad con el fenómeno corrosivo, principalmente en las fases de adaptación y de crecimiento exponencial lo cual sin duda se debe a que en esas fases la perturbación de la interfase metal/biofilm se ve mayormente alterada.

Con la finalidad de tener una visión cualitativa del fenómeno corrosivo en presencia de las bacterias estudiadas, en la figura 53 se presentan los valores obtenidos del índice de localización (IL) para cada cepa bacteriana. El índice localización puede ser utilizado para identificar el mecanismo de ataque de la corrosión y se define como:

$$LI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^N (x_i)^2}} = \frac{\sigma[I(t)]}{I_{rms}}$$

donde $\sigma[I(t)]$ se utiliza sin remoción de la tendencia. Se han establecido los siguientes intervalos para poder establecer el mecanismo de corrosión:

Intervalo LI	Corrosión
$0.001 < LI < 0.01$	Uniforme
$0.01 < LI < 0.1$	Mixta
$0.1 < LI < 1.0$	Localizada
$LI > 1.0$	Inicio picado

Si se considera la propuesta de Eden⁽⁶⁵⁾, retomada por Kelly⁽¹²⁴⁾ respecto de la clasificación del índice de localización, se tiene que valores mayores que 1.0 son indicativos del inicio de picaduras en el sistema de prueba. De acuerdo con la figura 53 solamente el control del experimento llega en forma esporádica a ese valor de corriente, lo cual demuestra como ya se mencionó con anterioridad que el medio de prueba es corrosivo *per se*. Analizando la misma figura se encontró que la cepa bacteriana MBA-6A2 es la que presentó una mayor tendencia para llegar a la frontera en el valor de LI donde se inicie el picado (valores de LI de 0.98, 0.94 y 0.92), seguida de la cepa MBA-1B2 que tuvo como máximo valor de LI 0.88 y la bacteria MBA-5B1 que al igual que la cepa bacteriana presentó un solo valor alto de LI de 0.84. La cepa MBA-9B1 no presentó de acuerdo con los resultados de LI ninguna tendencia al picado en el medio de prueba durante el tiempo de la experimentación.

El criterio establecido por Eden⁽⁶⁵⁾ indica que a valores de LI de entre 0.1 y 1.0, se presentará un fenómeno de corrosión localizada. Es justamente en ese rango de valores de LI (figura 53), en donde para las primeras 8 horas se encuentran los calculados para las cuatro cepas de bacterias aerobias estudiadas. En el intervalo de las horas 18 y 30, en términos generales, las cepas MBA-1B2, MBA-6A2, MBA-9B1 y el control presentaron tendencias hacia un fenómeno de corrosión mixta.

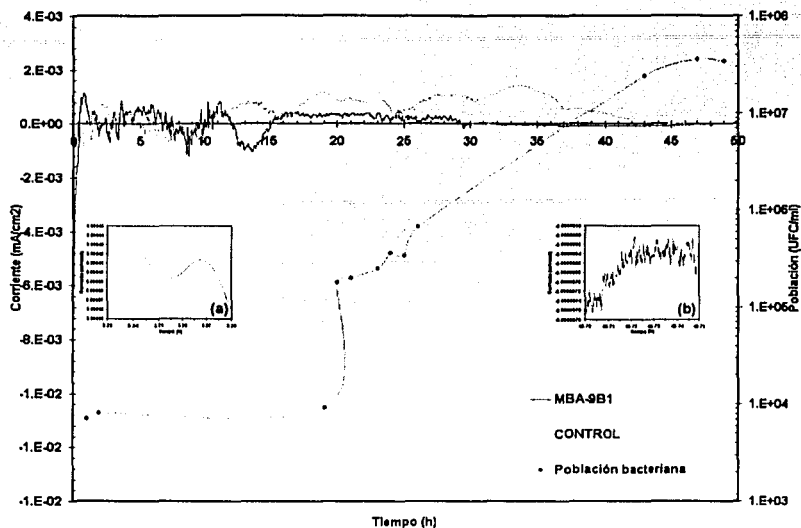


Figura 51. Respuesta de ruido electroquímico en corriente vs Curva de crecimiento cepa MBA-9B1.

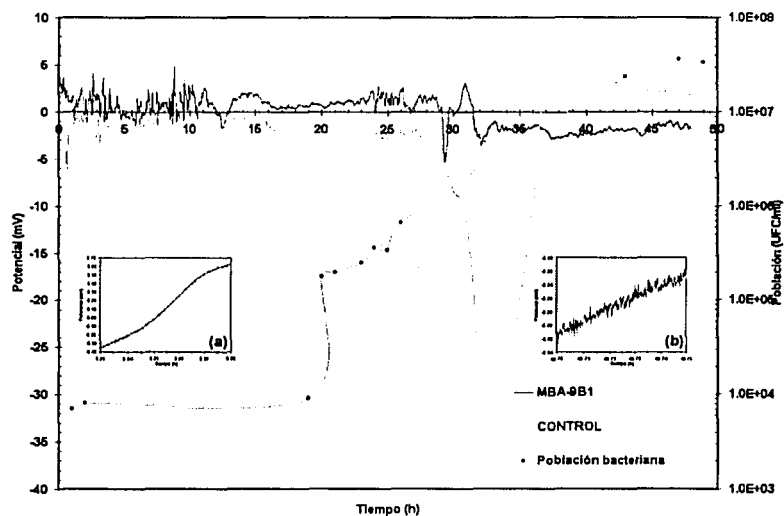


Figura 52. Respuesta de ruido electroquímico en potencial vs Curva de crecimiento cepa MBA-9B1.

Después de este tiempo, únicamente las cepas MBA-1B2 y MBA-6A2 conservaron dicha tendencia.

La figura 54 muestra los valores de la resistencia de ruido electroquímico (R_n), calculado a partir de la desviación estándar de la señal de ruido en potencial dividida entre la desviación estándar de la señal de ruido en corriente⁽¹²⁵⁾:

$$R_n = \frac{\sigma[V(t)]}{\sigma[I(t)]}$$

Como se indicó en la introducción, esta resistencia es comparable a la resistencia a la polarización (R_p) pero estimada a partir de parámetros de ruido electroquímico⁽¹²⁶⁻¹²⁸⁾. En la figura se puede observar que en términos generales y de acuerdo a los valores de R_n las cepas bacterianas se comportaron de acuerdo a lo siguiente: Para el intervalo de 0 a 10 horas la bacteria MBA-5B1 presentó los máximos valores de R_n seguida de las bacterias MBA-1B2, MBA-9B1 y MBA-6A2. A partir de la hora 25 la bacteria MBA-6A2 presentó los máximos valores de R_n , seguida de las cepas MBA-5B1, MBA-1B2 y MBA-9B1.

Finalmente por lo que respecta a las pruebas electroquímicas, en la figura 55 se muestran para cada una de las cepas bacterianas los valores de la velocidad de corrosión (mpy) obtenidos a partir de la relación de Stern y Geary:

$$R_p = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303(\beta_a + \beta_c) i_{corr}}$$

donde β_a y β_c son las pendientes de Tafel anódica y catódica, respectivamente; i_{corr} es la densidad de corriente de corrosión, R_p se obtiene a partir de la técnica clásica de polarización lineal (LPR).

Si se consideran $\beta_a = \beta_c = 120$ mV/dec, y $R_n = R_p$, entonces se puede obtener la V_{corr} en [mpy] a partir de R_n :

$$V_{corr} = 460209.07 * \frac{0.026}{R_n}$$

donde R_n [=] $\Omega \cdot \text{cm}^2$.

Como se señaló en las figuras analizadas y discutidas en esta sección, los mayores valores de velocidad de corrosión se presentaron en concordancia con las fases de adaptación y logarítmica de la curva de crecimiento para cada bacteria, de esta forma se puede observar que en orden de agresividad la bacteria MBA-6A2 indujo a las mayores velocidades de corrosión durante las primeras 10 horas de prueba, alcanzando valores de hasta 21 mpy, y de acuerdo al valor IL tendencias muy cercanas a la iniciación del fenómeno de picado, seguida de la cepa MBA-9B1 y MBA-1B2 cuyos máximos valores fueron de 16 y 7 mpy, respectivamente. La bacteria MBA-5B1 fue la que presentó las menores velocidades de corrosión, incluso menores que la prueba control. Correlacionando esta figura con el de IL, se puede además decir que el fenómeno de corrosión que estos microorganismos inducen corresponde principalmente a fenómenos de corrosión localizada que además es asistida por la generación de celdas de aireación diferencial⁽⁶⁾, ocasionadas por el establecimiento bacteriano seguido de la formación de biopelículas que interfieren

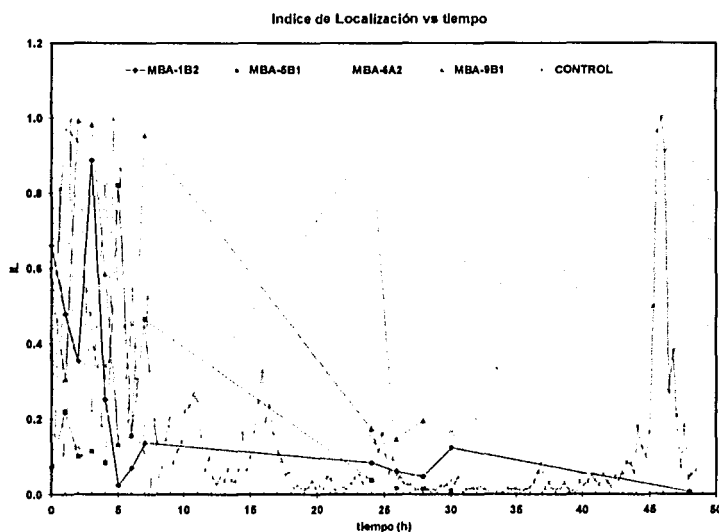


Figura 53. Índice de localización vs tiempo para las cepas: MBA-1B2, MBA-5B1, MBA-6A2 y MBA-9B1.

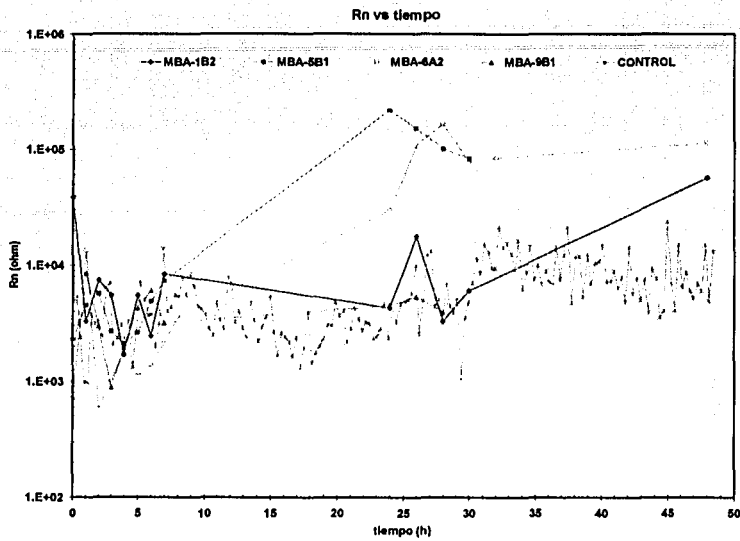


Figura 54. Rn vs tiempo para las cepas: MBA-1B2, MBA-5B1, MBA-6A2 y MBA-9B1.

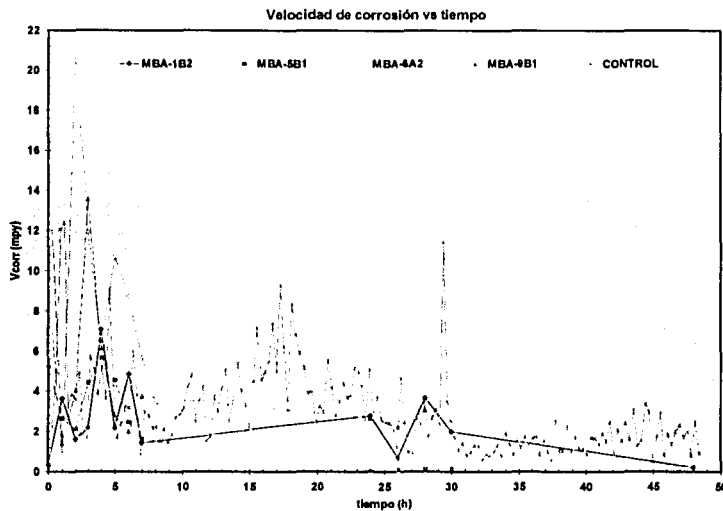


Figura 55. Velocidad de corrosión vs tiempo para las cepas: MBA-1B2, MBA-5B1, MBA-6A2 y MBA-9B1.

con el acceso de oxígeno hacia la interfase metal/biofilm. Cabe señalar que aún y cuando el fenómeno corrosivo es principalmente localizado, la existencia de corrosión general se hizo evidente.

5.3 Representación esquemática del mecanismo de acción de bacterias aerobias.

Como ya se confirmó con los resultados obtenidos en las evaluaciones de campo y laboratorio, las bacterias aerobias aisladas de la superficie interna de los acueductos, tienen impacto en el fenómeno de corrosión interior que ahí se presenta.

Por lo anterior, se hace necesaria la generación de un modelo de acción o adecuación de alguno ya existente, que trate de explicar el mecanismo a través del cual las bacterias aerobias dan lugar o aceleran los procesos corrosivos presentes en el sistema de inyección de agua.

Primeramente se debe tener muy claro que dentro de la matriz del biofilm, las bacterias se distribuyen de acuerdo a diferentes parámetros como pueden ser la cantidad y tipo de nutrientes, la vecindad con otras bacterias y la concentración de oxígeno presente.

En la figura 56 se presenta la estratificación de microorganismos dentro de un biofilm, tomando como base el gradiente de oxígeno. Se puede observar la formación de tres estratos. El primero de ellos corresponde a la sección aerobia, rica en oxígeno, que da lugar al desarrollo y proliferación de bacterias heterotróficas aerobias, con la consecuente producción de metabolitos bacterianos. El segundo estrato está integrado por bacterias con una actividad heterotrófica facultativa que consumen oxígeno pero también pueden llevar a cabo fermentaciones. Finalmente el tercer estrato corresponde a las zonas donde el oxígeno ya no se encuentra presente

y la actividad bacteriana preponderante es la anaerobia. El contexto anaerobio, especialmente el estudio de bacterias sulfato reductoras, es al que la comunidad científica e industrial mas atención le ha dado.

Debido a lo anterior y dadas las condiciones fisicoquímicas y ambientales de los acueductos donde se desarrollan las bacterias aerobias aisladas e identificadas, en este proyecto doctoral, se propone que el mecanismo de corrosión que experimentan las bacterias en estudio esta basado en un mecanismo de aireación diferencial como el que se ejemplifica en la figura 57.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

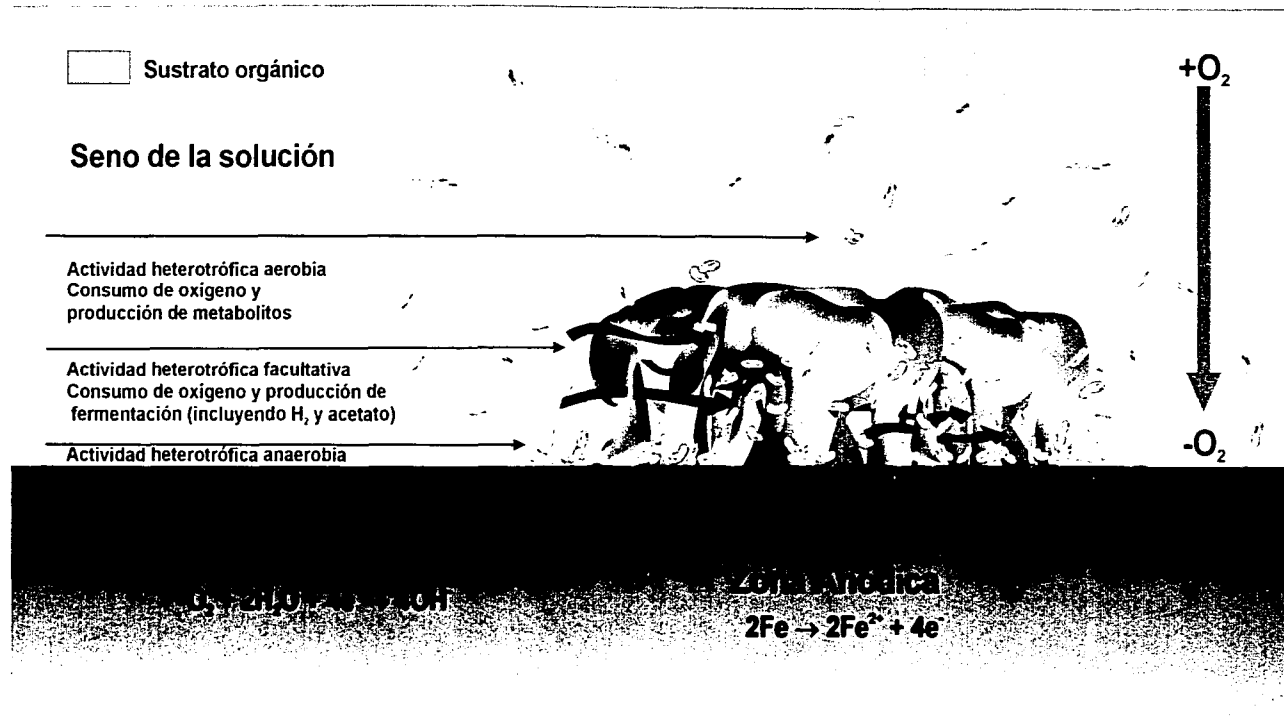


Figura 56. Estratificación de microorganismos dentro de un biofilm con base en el gradiente de oxígeno.

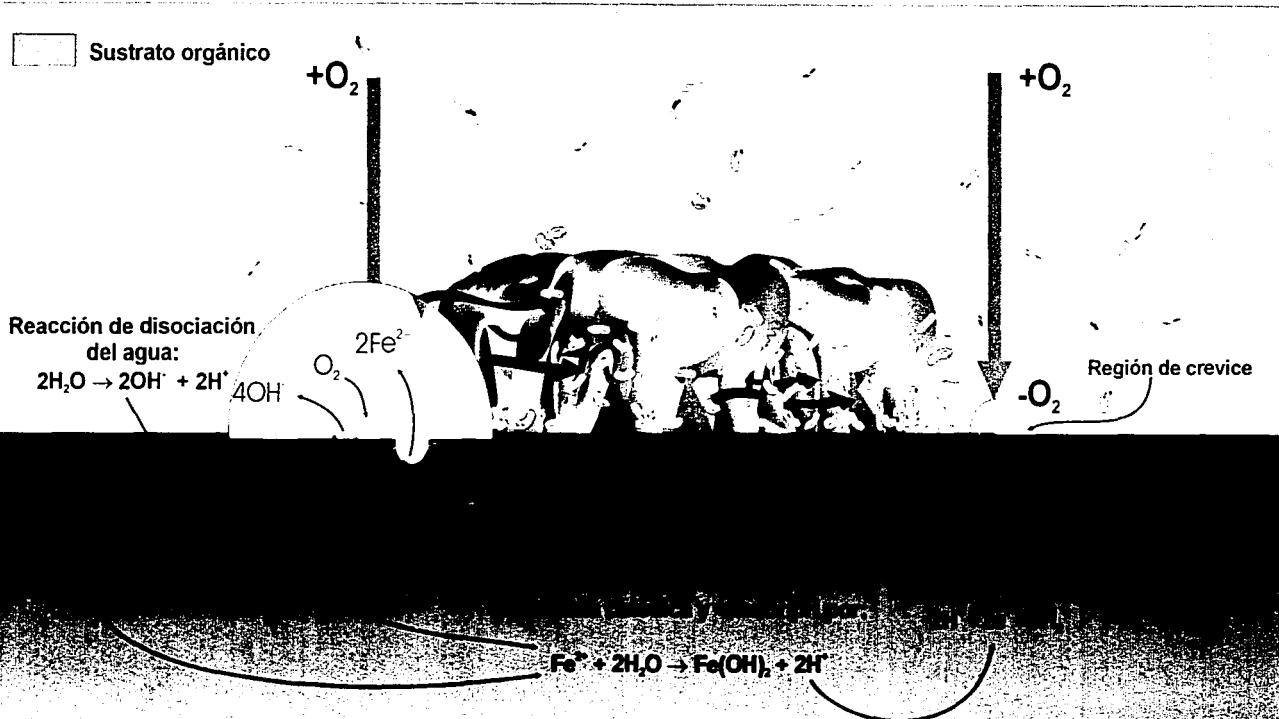


Figura 57. Mecanismo de corrosión por la presencia de un biofilm aerobio sobre la superficie metálica.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO

6.0

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos durante el trabajo de campo y las evaluaciones de laboratorio realizadas durante este proyecto doctoral, se puede concluir lo siguiente:

El seguimiento y control microbiológico de campo durante los años 1999 y 2000 confirmaron la presencia de bacterias aerobias que se desarrollan en el flujo y en la superficie interna de los acueductos. A pesar de los programas de tratamiento con la inyección de secuestrantes de oxígeno y biocidas.

La superficie interna de los acueductos ésta expuesta a fenómenos de corrosión localizada, generados por la presencia y actividad metabólica de microorganismos aerobios, como lo demostró el estudio de impacto de la actividad microbiana aerobia en la superficie de bioelementos.

De las evaluaciones electroquímicas a través de la técnica de ruido electroquímico, se determinó que las bacterias aerobias en estudio, están en mayor o menor grado relacionadas con los fenómenos de corrosión potencialmente localizada, presentes en los acueductos del sistema de inyección de agua.

La bacteria MBA-6A2 observó la mayor tendencia para el inicio del fenómeno de picado alcanzando además, el valor de velocidades de corrosión mas alto (11.8 mpy) durante las primeras 2 horas de prueba, seguida de las cepas y MBA-1B2 cuyos

máximos valores fueron de 6 y 4 mpy, respectivamente. La cepa MBA-1B2 fue la menos agresiva.

La identificación de las cepas bacterianas aerobias aisladas de la superficie de los bioelementos expuestos en el interior de los acueductos, reveló que esas bacterias son nuevas especies o especies aún no reportadas en las bases de datos consultadas.⁽⁸¹⁾⁽⁸²⁾

Se requiere una reconsideración y optimización de los programa de tratamiento microbiológico en campo, a fin de garantizar una mayor eficiencia de los productos biocidas que se aplican.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO

7.0

PERSPECTIVAS FUTURAS

El petróleo es un recurso natural no renovable y al mediano o largo plazo tenderá a agotarse y/o a dejar de fluir de manera natural durante las actividades de la explotación petrolera. Por lo anterior, es de esperar que la implementación y puesta en operación de sistemas de recuperación secundaria como el complejo de inyección de agua Abkatún Pol Chuc será cada vez mayor.

Si tomamos en cuenta que el problema de la corrosión inducida por microorganismos es una de las mayores preocupaciones que se tienen en este tipo de sistemas. Entonces estaremos de acuerdo en que la planeación y desarrollo oportuno de estudios de investigación encaminados al entendimiento y control de este fenómeno corrosivo, son y serán trascendentales para la industria petrolera y la comunidad científica interesada en este campo.

El interés que el campo de la corrosión inducida por microorganismo ha tenido en el ámbito científico e industrial, nos ha llevado al entendimiento parcial del fenómeno y al desarrollo de nuevas tecnologías para su detección y control.

En este contexto, las perspectivas para las investigaciones futuras deberán ser orientadas entre otros, hacia tópicos que se mencionan a continuación:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- Determinación de las interacciones de los consorcios bacterianos aerobios y anaerobios, entre si y con la superficie metálica donde se encuentren coexistiendo.
- Procesos de generación y/o mantenimiento de biofilms y estudios específicos de sus características microestructurales y microambientales.
- Proyectos específicos dedicados al estudio de los patrones de colonización y del comportamiento de microorganismos agresivos desde el punto de vista de corrosión, en ambientes naturales o industriales como el estudiado en este proyecto de tesis doctoral.
- Efectos protectores contra la corrosión relacionados con la actividad bacteriana aerobia.
- Estudios tendientes al desarrollo de metodologías para el control microbiológico, que no involucren en primera instancia el uso de biocidas.
- Desarrollo de nueva metodologías para el estudio de los eventos involucrados en la generación de picaduras y su rápida propagación en la superficie metálica.
- Estudios para determinar la influencia que los parámetros metalúrgicos y microestructurales de los aceros y sus aleaciones tienen en la iniciación y propagación de la corrosión inducida por microorganismos.
- Adecuación y/o optimización de metodologías de biología molecular para la identificación de los microorganismos involucrados en los procesos corrosivos y para su control microbiológico en las instalaciones industriales.
- Estudios para la determinación de la influencia que bacterias aerobias y anaerobias tienen con los sistemas de protección anticorrosiva actualmente implementados en las instalaciones y equipos industriales.

Estos son solo algunos de los tópicos de interés en el fascinante campo de la corrosión inducida por microorganismos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO

8.0

BIBLIOGRAFÍA

1. Nivens, D., Chambers, J., White, D. Subsurface Salt Water Injection and Disposal. American Petroleum Institute., pp:16-28. (1978).
2. Petróleos Mexicanos. Reporte de Instalaciones Petroleras., pp: 6-15. (2000).
3. Hamilton, W.A. Sulphate-reducing bacteria and anaerobic corrosion. Annu. Rev. Microbiol. V. 39., pp:195-217. (1985).
4. Voordouw, G., Niviere, V., Ferris, F.G., Fedorak, P.M., and Westlake, D.W.S. Distribution of hydrogenase genes in *Desulfovibrio sp* and their use in identification of species from the oil field environment. Appl. Environ. Microbiol. V. 56., pp: 3748-3754. (1990).
5. Chen, E.Y., and Chen, R.B. Monitoring of microbial corrosion in large oilfield water systems. J. Petl. Technol. V. 36., pp: 1171-1176. (1984).
6. Videla , H.A. Manual of Biocorrosión, Lewis Publishers., p: 273. (1996).
7. Eden, D.A., and Rothwell, A.N. Electrochemical Noise Data: Analysis, Interpretation and Presentation. Corrosion/92., Paper No. 292., pp: 292/1-292/12. (1992).
8. Ferris, F.G., Jack, T.R., and Bramhill, B.J. Corrosion products associated with attached bacteria at an oil field water injection plant. Can. J. Microbiol. V. 38., pp:1320-1324. (1992).
9. Galván,J., L ory,A., Nolasco,J y Nava Y. Tratamiento del agua de inyección. Instituto Mexicano del Petróleo., pp: 128. (1982).
10. Universidad Nacional Autónoma de México. Apuntes de recuperación secundaria. Depto. de Explotación del Petróleo. División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra. Facultad de Ingeniería. (1982).

11. Forrest F.C. Aspectos de Ingeniería de la Inyección de Agua. Society of Petroleum Engineers of AIME. V. 3., pp: 132. (1982).
12. Fettke, C.R., Bradford Oil Field, Pennsylvania and New York. Pennsylvania Geological Survey, 4th Series. M-21. (1938).
13. Hoyle B.D., Jass, J., Costerton, J.W. The biofilm glycocalyx as a resistance factor. J. Antimicrob Chemother. V.26., pp: 1-6. (1990).
14. Costerton, W.J., Lewandowski, Z., Caldwell, D.E., Korber, D.R., Lappin Scott HM Microbial Biofilms. Annu. Rev. Microbiol. V.49., pp:711-745. (1995).
15. Ferrari, M.D., De Mele, M.F.L. y Videla, H.A. eds. Manual Práctico de Biorrosión y Biofouling para la Industria. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). Red Temática XVc. BIOCORR., pp:178. (1995).
16. Videla, H.A. Corrosión Microbiológica: Retrospectiva Histórica y Perspectiva Futura. Rev. Iber. Corros. Y Prot. Vol.XVII, No. 5, pp: 329-333. (1986).
17. Prasad, R. Assessment and Control of MIC in the Oil Industry in the 20th Century. Corrosión /2000. Paper 390., pp:1-11. (2000).
18. Rogers, T.H. Marine Corrosion. George Newness Ltd., London, pp: 206-230. (1968).
19. Gaines, R.H. Bacterial Activity as a Corrosion Influence in the soil. Jour. Ind. Eng. Chem. V.2., pp: 128-130. (1910).
20. Ramírez, D.R., y Paredon, D.J. La corrosión influida por microorganismos y su impacto en los equipos intercambiadores de calor. Nota técnica TecnoLab. CFE. pp: 25-33. (1993).
21. Von Wolzogen, Kurhr, C.A.H., and Van Der Vlugt, L.S. Graphitization of cast iron as and electro-biochemical process in anaerobic soil. Water. (the Hague), V.48., pp: 147-165. (1934).
22. Pope, D.H., Duquette, D., Wayner Jr., P.C. and Johannes, A.H. Microbiologically influenced corrosion: A State-Of-The-Art Review., Second Edition., MTI Publication No. 13, USA., pp:3. (1989).
23. Pope, D.H. Microbiologically influenced corrosion in the twentieth century and where do we go from here. Corrosión/2000. Paper 402., pp: 1-5. (2000).
24. Costerton, J.W., and Irvin, R.T., Ann. Rev. Microbiol. V.35., pp: 299. (1981).

25. Southerland, I.W., Adv. Microbiol. Physiol. V.8., pp: 143. (1972).
26. Mansfeld, F. & Little B. A Technical Review of Electrochemical Techniques applied to Microbiologically Influenced Corrosion. Corrosion Science, V. 32, No. 3., pp. 247-72. (1991).
27. Borestein, S.W. Microbiologically Influenced Corrosion Handbook. Industrial Press Inc. New York., pp: 288. (1994).
28. Ghaheri, M. The corrossions caused by microbial activities and the methods of inhibition. Eurocorr '99. Pp: 1-4. (1999).
29. Stott, J.F.D. What progress in the understanding of microbially induced corrosion has been made in the last 25 years? A personal viewpoint. Corrosion Science, V. 35, Nos. 1-4., pp. 667-673. (1993).
30. Johansson, L.S., and Saastamoinen, T. Investigating early stages of biocorrosión with XPS: AISI 304 stainless steel exposed to Burkholderia species. Applied Surface Science., pp:144-145. (1999).
31. Gilbert, B., Evans, D.J., M.R.W. Brown, J. Appl. Bacter. Symp. Suppl. 74. (1993).
32. Pope, D.H. A study of microbiologically influenced corrosion and a practical guide for its treatment and prevention, Final report, EPRI CS-5495, Electric Power Research Institute. (1986).
33. NACE. Field Monitoring of Bacterial growth in Oilfield Systems. Standard TMO194-94. pp: 1-13. (1994).
34. Pope, H.D. and Morris III E.A., Some experiences with microbiologically influenced corrosion of pipelines. Material Performance . Cathodic and Anodic Protection. pp: 23-28. (1995).
35. Pope, D.H. A study of microbiologically influenced corrosion in nuclear power plants and a practical guide of countermeasures., Final report, EPRI NP-4582. (1984).
36. Tiller, A.K. Biocorrosion in civil engineering., in Microbiology in Civil Engineering, FEMS Symposium, No 59. London. p: 26. (1990).
37. Treseder, R.S. Ed. Corrosion Engineers Reference Book. Second edition. NACE International Houston. pp:99. (1991).

38. San Martin R.G. Microbiological Techniques to Evaluate Biocides in Secondary Recovery Systems. MsC. Disertation. UMIST., UK., pp: 37-40. (1999).
39. Costello, J.A. The corrosion of metals by microorganisms. A Literature survey. International Biodeterioration Bulletin. (1969).
40. Iverson, W.P. Microbial Iron Metabolism, J.B. Nielands Ed. Academic Press. New York, NY. (1974).
41. Miller, J.D.A. and Tiller, A.K. Microbial Aspects of Metallurgy., J.D.A. Miller Ed. Elsevier. New York, NY. (1970).
42. Postgate, J.R. The Sulfate Reducing Bacteria. Cambridge University Press. Cambridge, England. (1979).
43. Geesey, G.G., Microbial Exopolymers: Ecological and Economic Considerations. Am. Soc. Microbial News. V. 48., pp:9-14. (1982).
44. Fleming, H.C. and Geesey, G.G., eds. Biofouling and Biocorrosion in Industrial Water Systems. Springer-Verlag, New York., p: 62. (1991).
45. Uhlig, H.H. Corrosión Handbook. John Wiley & Sons, New York. (1948).
46. Geesey, G.G. What is biocorrosion?., Presented at biofouling and biocorrosion in Industrial Water Systems. Stuttgart, Germany. Springer- Verlag, New York. (1990).
47. Licina, G.J. Sourcebook for Microbiologically Influenced Corrosion in Nuclear Power Plants. RP2812-2. Electric Power Research institute. Palo Alto, California. (1988).
48. Lewandowski, Z., MIC and Biofilm Heterogeneity. Corrosion/2000. Paper 400. pp: 1-7. (2000).
49. Jayaraman, A., Cheng,E.T., Earthman,J.C. and Wood,T.K. Importance of biofilm formation for corrosion inhibition of SAE 1018 steel by axenic aerobic biofilm., Journal of Industrial Microbiology &Biotechnology. V.18, pp: 396-401. (1997).
50. Pedersen,A. And Hermansson, M. The effects on metal corrosion by Serratia marscences and Pseudomona sp. Biofouling. V. 1. pp: 313-322. (1989).

51. Pedersen, A. And Hermansson, M. Inhibition of metal corrosion by bacteria. *Biofouling*, V. 3. pp:1-11. (1991).
52. Sternberg, C., Christensen, B. B., Johansen, T., Nielsen, A.T., Andersen, J.B., Givskov, M. And Molin, S. Distribution of bacterial growth activity in flow-chambers biofilms. *Applied and Environmental microbiology*. p: 4108-4117. (1999).
53. Hamilton, W.A. Sulphate-reducing bacteria and the offshore oil industry. *Trends Biotechnol.*, V. 1., pp: 36-40. (1983).
54. Corpe, W.A. Marine microfouling and OTEC heat exchangers., in *Proceedings of the Ocean Thermal Energy Conversion. Biofouling and Corrosion Symposium*, ed. Gray., pp:31. (1977).
55. Watnick, P. And Kolter, R. Biofilm, *City of Microbes*, *Journal of Bacteriology*, V. 182., No. 10., pp: 2675-2679. (2000).
56. Costerton, J.W. and Stewart, S.P. Battling BIOFILMS. *Scientific American*. July., pp: 61-67. (2001).
57. Videla H.A. Microbially Induced Corrosión an up dated overview in *Biodeterioration*, Rossmore, H.W. Ed. Elsevier Applied Science, Ltd., London, pp: 63. (1991).
58. Costerton, J.W., and Lappin-Scott, H.M. Behaviour of bacteria in biofilms, *American Society of Microbiology News.*, V. 55, No. 12., pp: 650-654. (1989).
59. Little, B.J., Wagner, P.A. and Mansfeld, F. Microbiololy Influenced Corrosion. *NACE*, Houston, Tex. (1997).
60. Little, B.J., *Succesion in microfouling*, in *Proceedings of the Office of Naval Research Symposium on Marine Biodeterioration*, U.S. Naval Inst. Press, Bathesda, MD. (1985).
61. *ASM Metals handbook. Corrosion.*, ASM International, Metals Park, OH, V. 13., pp: 492. (1987).
62. Tiller, A.K. *Microbiology in Civil Engineering.*, E. & F.N. Spon, London., pp:24. (1991).

63. Edyvean, R.G. and Videla, H.A. Biological Corrosion., Interdisciplinary Science Reviews, pp:16, 267. (1991).
64. Iverson, W.P. Transient voltage changes produced in corroding metals and alloys. J. Electrochem. Soc. 115, 6, pp: 617-618. (1968).
65. Eden, D.A, John, D.G. y Dawson, J.L. Corrosion Monitoring. Patent. International Application Published under the Patent Cooperation Treaty (PCT), Publication No: WO 87/07022. (1987).
66. Eden, D.A. y Rothwell, A.N. Electrochemical noise data: Analysis, Interpretation and presentation. Corrosion/1992, paper no:292, (Co: NACE International). (1992).
67. Dawson, J. L. y Hladky, K. The measurement of localized corrosion using electrochemical noise. Corr. Sci., 21, 4, pp:317-322. (1981).
68. Pistorius, P.C. The effect of some fundamental aspects of the pitting corrosion of stainless steel on electrochemical noise measurements. Electrochemical noise measurements for corrosion applications, ASTM STP 1277, Kearns, J.R., et al., Eds., American Society for Testing and Materials, pp: 343-358. (1996).
69. Wharton, J.A., Mellor, B.G., Wood, R.J., y Smith, C.J. Crevice corrosion studies using electrochemical potential noise measurements. Corrosion/2000, paper no: 417, (Co: NACE International). (2000).
70. Hladky, K., y Dawson, J.L. The measurement of corrosion using electrochemical 1/f noise. Corr. Sci., 22, pp: 231-237. (1982).
71. Chen, J.F., Shadley, J., Rybicki, E.F., y Bogaerts, W.F. Pitting corrosion monitoring with an improved electrochemical noise technique. Corrosion/1999, paper no:193, (Co: NACE International). (1999).
72. Whitman, T., y Huizinga, S. Evaluation of electrochemical noise analysis as an on-line monitoring tool to distinguish between biofilm-associated localised corrosion and oxygen corrosion. Aspects of Microbially Induced Corrosion.
73. Dawson, J.L. Electrochemical noise measurement: The definitive in-situ technique for corrosion applications. Electrochemical noise measurements for corrosion applications, ASTM STP 1277, Kearns, J.R., et al., Eds., American Society for Testing and Materials, pp: 3-35. (1996).
74. Kearns, J.R., et al. EASTM standardization of electrochemical noise measurement. Electrochemical noise measurements for corrosion applications,

- ASTM STP 1277, Kearns, J.R., et al., Eds., American Society for Testing and Materials, pp: 446-470. (1996).
75. Aballe, A., Bautista, A., Bertocci, U., y Huet, F. Measurements of the noise resistance for corrosion applications. *Corrosion*, 57, 1, pp: 35-42. (2001).
76. Bertucci, U., Gabrielli, C., Huet, F., y Keddani, M. Noise resistance applied to corrosion measurements. I. Theoretical analysis. *J. Electrochem. Soc.*, 144, 1, pp: 31-37. (1997).
77. Bertucci, U., Gabrielli, C., Huet, F., Keddani, M., y Rousseau, P. Noise resistance applied to corrosion measurements. II. Experimental tests. *J. Electrochem. Soc.*, 144, 1, pp: 37-43. (1997).
78. Cottis, R., y Turgoose, S. Electrochemical impedance and noise. *Corrosion Testing Made Easy*, NACE International, Houston, Tx., p: 149. (1999).
79. Jovancicevic, V., y Rothwell, A.N. Controlled potentiostatic measurements of electrochemical noise. *Corrosion/2000*, paper no: 419, (Co: NACE International). (2000).
80. Benish, M.L., et al. A new electrochemical noise technique for monitoring the localized corrosion of 304 stainless steel in chloride-containing solutions. *Corrosion/1998*, paper no: 370, (Co: NACE International). (1998).
81. Eden, D.A., Hladky, K., John, D.G., y Dawson, J.L. Electrochemical Noise – Simultaneous monitoring of potential and current noise signals from corroding electrodes. *Corrosion/1986*, paper no: 274, (Co: NACE International). (1986).
82. Bierwagen, G.P. Calculation of noise from simultaneous electrochemical potential and current noise data. *J. Electrochem. Soc.*, 141, 11, pp: L155-L157. (1994).
83. Reichert, D.L. Electrochemical noise measurement for determining corrosion rates. *Electrochemical noise measurements for corrosion applications*, ASTM STP 1277, Kearns, J.R., et al., Eds., American Society for Testing and Materials, pp: 79-89. (1996).
84. Brusamarello, V., Lago, A., y Franco, C.V. Analysis of different methods to calculate electrochemical noise resistance using a three-electrode cell. *Corrosion*, 56, 3, pp: 273-282. (2000).
85. Stern, M., y Geary, A.L. Electrochemical polarization. *J. Electrochem. Soc.*, 104, 56. (1957).

86. Mansfeld, F., y Lee, C.C. The frequency dependence of the noise resistance for polymer-coated metals. *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 144, No. 6, pp: 2068-2071. (1997).
87. Mansfeld, F., Lee, C.C. & Zhang, G. Comparison of electrochemical impedance and noise data in the frequency domain. Preliminary note. *Electrochim. Acta*, 43, 3-4, pp: 435-438. (1998).
88. Hladky, K., y Dawson, J.L. Corrosion monitoring using low frequency electrochemical noise. *Corr. Sci.*,
89. Bertocci, U. Applications of a low noise potentiostat in electrochemical measurements. *J. Electrochem. Soc.*, 127, 9, pp: 1931-1934. (1980).
90. Keddam, M., Krarti, M., y Pallotta, C. Some aspects of the fluctuations of the passive current on stainless steel in presence of chlorides-Their relation to the probabilistic approach of pitting corrosion. *Corrosion*, 43, 8, pp: 454-458. (1987).
91. Cheng, Y.F., Luo, J.L. & Wilmott, M. Spectral analysis of electrochemical noise with different transient shapes. *Electrochim. Acta*, 45, pp: 1763-1771. (2000).
92. Legat, A., y Govekar, E. Detection of corrosion by analysis of electrochemical noise. *Fractals*, 2, 2, pp: 241-244. (1994).
93. Roberge, P.R. The analysis of spontaneous electrochemical noise by the stochastic process detector method. *Corrosion*, 50, 7, pp: 502-512. (1994).
94. Gorse, D., Legris, A., Pastol, J.L., y Maiki, B. *J. Electrochem. Soc.*, 146, 10, pp:702-710. (1999).
95. Hernandez, M.A., Rodriguez, F.J., Genesca, J., Garcia, E., y Boerio, F.J. Oscillation an chaos in pitting corrosion of steel. *Corrosion/1999*, paper no: 197, (Co: NACE International). (1999).
96. Nicolis, G., y Prigogine, I. Exploring complexity: An introduction. W.H. Fremman & Co., New York. (1989).
97. Aballe, A., Bethencourt, M., Botana, F.J., Calvino, J.J., y Marcos, M. Application of wavelet transformation to analyse ENM data. *Eurocorr'99*. (1999).
98. Cottis, R.A. Interpretation of electrochemical noise data. *Corrosion*, 57, 3, pp: 265-285. (2001).

99. Kriston, A., Lakatos-Varsányi, M. Testing and estochastical analysis of metastable pitting corrosion of stainless steels. *Electrochemical methods in corrosion research*, Budapest, Hungria. (2000).
100. Bertocci, U., et al. Drift removal procedures for PSD calculation. *Corrosion/2001*, paper no: 01291, (Co: NACE International). (2001).
101. Schauer, T., Greisiger, H. & Dulog, L. Details on MEM analysis of electrochemical noise data and correlation with impedance measurements for organic coatings on metals. *Electrochim. Acta*, 43, 16-17, pp: 2423-2433. (1998).
102. Blanc, G., Gabrielli, C., Ksouri, M., y Wiart, R. *Electrochim. Acta*, V. 23, No. 4, pp: 337-340. (1978).
103. Madigan, M.T., Martinko, J.M. y Parker, J. *Brock Biología de los Microorganismos.*, 8ª Edición, Prentice Hall, Iberia, Madrid., pp: 1064. (1999)
104. Davis, B.D., Dulbecco, R., Eisen, H.N., Ginsberg, H.S. y Wood, W.B. *Tratado de Microbiología.* 2ª Edición, Salvat Editores., pp: 36. (1978).
105. Pickup, R.W. Development of molecular methods for the detection of specific bacteria in the environment. *J. Gen. Microbiol.* 137, pp: 1009-19. (1991).
106. Jan, J. y Le Borgne, S. Uso de técnicas moleculares para realizar estudios de biodiversidad microbiana en ambientes petroleros. *Biotecnología.*, V. 5, No. 3, pp: 103-109. (2001).
107. Roszak, D.B. & Colwell, R.R. Survival strategies of bacteria in the natural environment. *Microbiological Reviews.* V. 51., pp: 365-379. (1987).
108. Woese, C.R. Bacterial evolution. *Microbiol. Rev.* V. 51., pp: 221-271. (1987).
109. Alm E.W., Oerther, D.B., Larsen, N., Stahl, D.A y Raskin, L. The oligonucleotide probe database. *Appl. Environ. Microbiol.* **62**, 3557-9. (1996).
110. Barns, S.M., Fundyga, R.E., Jeffries, M.W. y Pace, N.R. Remarkable archaeal diversity detected in a Yellowstone National Park hot spring environment. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **91**, 1609-13. (1994).
111. Giovannoni, S.J., DeLong, E.F., Olsen, G.J. y Pace, N.R. Phylogenetic group-specific oligodeoxynucleotide probes for identification of single microbial cells. *J. Bacteriol.* **170**, 720-6. (1998).

112. Wilson V.L., Tatford , B.C., Yin, X., Rajki, S.C., Walsh, M.M. y LaRock, P. Species-specific detection of hydrocarbon-utilizing bacteria. *J. Microbiological Methods* . **39**, 59-78 (1999).
113. Maidak, B.L., Cole, J. R., Lilburn, T.G., Parker Jr, C.T., Saxman, P. R., Stredwick, J. M., Garrity, G. M., Li, B., Olsen, G. J., Pramanik, S., Schmidt, T. M. y Tiedje, J.M. The RDP (Ribosomal Database Project) continues. *Nucleic Acids Res.* **28**, 173-4. (2000).
114. Abrams, E.S. and Stanton, V.P. Use of denaturing gradient gel electrophoresis to study conformational transitions in nucleic acids. *Methods Enzymol.* **212**, 71-105. (1992).
115. Yoshino, K., Nishigaki, K. And Husimi, Y. Temperature sweep gel electrophoresis: a simple method to detect point mutations. *Nucleic Acids Res.* **19**, 3153. (1991).
116. Marsh, T.L., Saxman, P. , Cole, J. and Tiedje, J. Terminal restriction fragment length polymorphism analysis program, a web-based research tool for microbial community analysis. *Appl. Environ. Microbiol.* **66**, 3616-20. (2000).
117. NACE Report No. 54281. Review of current practices for monitoring bacterial growth in oil field systems. (Houston, Tx. NACE). (1990).
118. American Petroleum Institute. API Recommended Practice for Biological Analysis of Subsurface Injection Waters. (Washington D.C.), pp: 7. (1975).
119. Smith, C.R. 1982. "Mechanics of Secondary Oil Recovery". Department of Petroleum Engineering. University of Wyoming. Reinhold Publishing Corporation, 9:13-17
120. Sternberg, C. Etal "Distribution of Bacterial Growth Activity in Flow – Chamber Biofilms" *Applied and Environmental Microbiology*, Sept. 1999, pp. 4108-4117.
121. Larsen, J., "Experience with the use of tetrakis hydroxymethyl phosphonium sulfate (THPS) for the control of Down Hole Hydrogen Sulfide. *Corrosion*, 2000, paper: 123.
122. Amann, R.I., etal. Phylogenetic Identification and In Situ Detection of Individual Microbial Cells Without Cultivation. *Microbiological Reviews*, Mar. 1995, pp. 143-169.

123. Potekhina, J.S. et al., Role of Microorganisms in Corrosion Inhibition of Metals in Aquatic Habitats., Mini Review. Appl. Microbiol Biotechnol. 1999., 52:639-646.
124. Kelly, R.G., Inman, M.E., and Hudson, J.L., "Analysis of Electrochemical Noise for Type 410 Stainless Steel in Chloride Solutions", Electrochemical Noise Measurement for Corrosion Applications, ASTM STP 1277, Jeffery, R. Kearns, John, R. Scully, Pierre, R. Roberge, David L., Reichert, and John I. Dawson, Eds. American Society for Testing and Materials, 1996. Pp. 101-113.
125. Reichert, D.L., "Electrochemical Noise Measurement for Determining Corrosion Rates", Electrochemical Noise Measurement for Corrosion Applications, ASTM STP 1277, Jeffery, R. Kearns, John, R. Scully, Pierre, R. Roberge, David L., Reichert, and John I. Dawson, Eds. American Society for Testing and Materials, 1996. Pp. 79-89.
126. Aballe, A., et al. Measurement of the noise resistance for corrosion applications. Corrosion, 57 (1), 2001. Pp. 35-42.
127. Bertocci, U., et al. Noise resistance applied to corrosion measurements. I. Theoretical analysis. J. Electrochem. Soc., 144 (1). 1997. Pp. 31-37.
128. Bertocci, U., et al. Noise resistance applied to corrosion measurements. II. Experimental tests. J. Electrochem. Soc., 144 (1). 1997. Pp. 37-43.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO

9.0

APÉNDICE

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

**TABLA 3. SISTEMA DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA
COMPLEJO DE INYECCIÓN DE AGUA**

MONITOREO BACTERIOLÓGICO (1999)

Salida de planta (UFC/ml)						
Día	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
1	110	19	348	260	41	7
2	177	119	230	97	73	191
3	9	262	920	566	4	309
4	80	S/A	666	850	280	519
5	15	398	717	2238	56	1080
6	143	206	687	1860	396	984
7	385	766	792	8	353	3050
8	408	557	758	645	10	5510
9	53	110	487	660	269	230
10	60	225	255	1086	400	641
11	2	590	710	1920	913	684
12	163	220	710	1690	1020	986
13	40	710	230	56	661	206
14	6	425	354	1280	11	112
15	2	341	110	2140	11	78
16	10	510	406	2060	516	62
17	88	468	498	481	802	170
18	34	380	442	980	680	197
19	130	710	518	115	807	174
20	141	610	721	520	137	191
21	284	320	629	367	S/A	378
22	47	180	681	186	S/A	26
23	35	420	712	51	680	596
24	55	360	742	1368	300	208
25	190	205	1200	1210	648	602
26	310	330	270	960	525	517
27	465	279	576	930	464	690
28	906	199	746	2311	357	1120
29	484	S/A	2266	2650	1476	432
30	488	S/A	990	52	1456	20
31	422	S/A	1308	S/A	2050	S/A

MONITOREO BACTERIOLÓGICO (1999) (CONTINUACIÓN...)

Salida de planta (UFC/ml)						
Día	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	231	2432	504	16	101	S/A
2	356	1490	44	39	26	S/A
3	795	55	20	23	156	S/A
4	5200	780	62	40	168	S/A
5	7380	922	31	27	80	S/A
6	3050	220	63	34	69	148
7	4068	19	31	31	84	1763
8	688	40	33	23	376	2500
9	4310	41	68	61	196	7380
10	6300	106	30	50	365	51
11	2040	35	8	131	219	1064
12	8760	25	25	144	360	5560
13	3800	41	71	1040	13	2420
14	2980	84	50	2840	40	7115
15	3030	320	72	2336	346	10
16	3	114	87	3000	117	5560
17	157	266	4	15	606	6560
18	447	1600	7	100	2486	4750
19	80	1256	52	67	3180	428
20	474	706	46	80	60	10200
21	860	7894	52	50	194	4290
22	980	750	94	95	4360	1800
23	318	10	207	106	S/A	0
24	650	165	353	126	S/A	12
25	4000	210	291	616	S/A	150
26	5200	378	371	165	S/A	50
27	336	443	330	790	S/A	48
28	S/A	256	480	963	S/A	258
29	S/A	100	5	870	S/A	95
30	S/A	255	10	920	S/A	260
31	930	418	S/A	11	S/A	464

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

**TABLA 4. SISTEMA DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA
COMPLEJO DE INYECCIÓN DE AGUA**

**VELOCIDADES DE CORROSIÓN
1999**

Salida de planta (mpy)						
Día	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
1	S/A	0.15	0.19	0.06	0.10	0.08
2	S/A	0.17	0.24	0.20	0.05	0.06
3	S/A	0.23	0.25	0.09	0.05	0.06
4	S/A	0.18	0.27	0.25	0.20	0.06
5	0.53	0.19	0.32	0.15	0.21	0.06
6	0.40	0.19	0.34	0.10	0.51	0.09
7	0.32	0.22	0.54	0.06	0.11	0.08
8	0.28	0.23	0.22	0.10	0.07	0.06
9	0.24	0.28	0.24	0.05	0.07	0.06
10	0.23	0.32	0.25	0.05	0.05	0.05
11	0.20	0.39	0.25	0.25	0.05	0.07
12	0.18	0.52	0.27	0.52	0.13	0.05
13	0.35	0.52	0.28	0.23	0.11	0.06
14	0.17	S/A	0.33	0.19	0.11	0.05
15	0.17	0.12	0.36	0.13	0.07	0.06
16	0.15	0.22	0.36	0.08	0.06	0.06
17	0.14	0.19	0.61	0.28	0.05	0.06
18	0.14	0.19	0.50	0.21	0.05	0.05
19	0.15	0.18	0.55	0.11	S/A	0.05
20	0.14	0.18	0.79	0.05	S/A	0.09
21	0.19	0.18	0.96	0.04	0.04	0.06
22	0.20	0.18	1.20	0.04	0.44	0.19
23	0.17	0.18	1.70	0.15	0.11	0.45
24	0.14	0.18	1.07	0.44	0.09	0.35
25	0.15	0.18	1.07	0.09	0.05	0.12
26	0.16	0.16	1.45	0.07	0.04	0.06
27	0.17	0.21	1.84	S/A	0.04	0.08
28	0.18	0.21	2.00	0.12	0.04	0.28
29	0.22	S/A	2.28	0.12	0.04	0.06
30	0.63	S/A	0.08	0.07	0.50	0.08
31	0.21	S/A	0.04	S/A	0.08	S/A

VELOCIDADES DE CORROSIÓN (1999) (CONTINUACIÓN...)

Salida de planta (mpy)						
Día	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	0.06	0.09	0.04	0.13	0.26	S/A
2	0.23	0.12	0.04	0.15	0.18	S/A
3	0.29	0.08	0.03	0.15	0.14	S/A
4	0.10	0.07	0.03	0.13	0.14	1.36
5	0.11	0.06	0.11	0.12	0.13	0.73
6	0.09	0.05	0.11	0.09	0.13	0.72
7	0.05	0.04	0.11	0.11	0.61	0.57
8	0.04	0.05	0.11	0.22	0.41	0.94
9	0.03	0.05	0.12	0.18	0.20	0.55
10	0.24	0.05	0.12	0.11	0.22	1.11
11	0.06	0.06	0.37	0.19	2.18	1.66
12	0.08	0.05	0.36	0.11	0.18	0.72
13	0.07	0.05	0.29	0.11	0.20	2.11
14	0.10	0.04	0.17	0.23	0.38	1.04
15	0.07	0.04	0.25	1.40	0.90	5.30
16	0.11	0.04	0.15	0.21	0.51	0.62
17	0.09	0.04	0.11	0.20	0.65	10.60
18	0.08	0.05	0.11	0.12	0.32	0.73
19	0.06	0.03	0.09	0.11	0.48	9.34
20	0.06	0.05	0.08	0.20	0.95	10.40
21	0.15	0.04	0.08	0.12	0.71	7.57
22	0.07	0.05	0.08	0.13	0.78	0.52
23	0.07	0.06	0.08	0.13	S/A	0.38
24	0.06	0.05	0.08	0.13	S/A	0.30
25	0.09	0.05	0.13	1.62	S/A	0.29
26	S/A	0.26	0.14	0.23	S/A	0.34
27	S/A	0.10	0.14	0.26	S/A	0.23
28	S/A	0.05	0.11	0.30	S/A	5.50
29	0.36	0.04	0.11	0.24	S/A	8.01
30	0.20	0.04	0.09	0.20	S/A	5.50
31	0.15	0.03	S/A	0.18	S/A	2.27

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

**TABLA 5. SISTEMA DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA
COMPLEJO DE INYECCIÓN DE AGUA**

**MONITOREO BACTERIOLÓGICO
2000**

Salida de planta (UFC/ml)						
Día	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
1	62	1848	2900	141	2	23
2	150	965	242	125	79	410
3	347	1200	556	83	24	37
4	332	8	1720	63	26	86
5	340	692	1200	500	73	60
6	1040	645	4080	260	61	20
7	1420	672	315	690	106	55
8	640	750	400	530	386	19
9	668	50	56	440	255	265
10	2600	982	317	760	894	81
11	3400	1830	460	650	940	210
12	469	2860	590	545	970	420
13	17600	128	500	0	74	693
14	14640	390	730	339	8	592
15	2300	693	960	248	12	481
16	164	950	1480	128	20	423
17	1621	1930	56	283	25	528
18	4080	2080	178	94	164	508
19	11600	49	360	98	99	291
20	24	120	560	108	167	200
21	80	494	640	8	120	44
22	99	1050	320	50	138	24
23	572	1380	790	90	286	45
24	620	1210	850	68	93	102
25	152	0	0	68	4	79
26	200	574	824	70	36	40
27	395	130	605	160	74	68
28	401	1290	800	60	75	41
29	5160	6000	1680	131	50	38
30	1900	S-A	50	193	169	30
31	1200	S-A	234	S-A	130	S-A

MONITOREO BACTERIOLÓGICO (2000) (CONTINUACIÓN...)

Salida de planta (UFC/ml)						
Día	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	3	1870	297	S-A	12	6
2	7	1800	205	S-A	18	127
3	24	16	78	S-A	26	317
4	63	24	52	S-A	30	656
5	11	23	33	S-A	73	150
6	8	32	110	S-A	80	198
7	40	16	368	S-A	299	161
8	44	10	200	S-A	152	288
9	46	136	143	S-A	123	937
10	55	156	377	S-A	169	290
11	94	192	49	3072	140	101
12	220	389	430	12880	79	170
13	730	178	114	1960	315	587
14	900	196	204	2460	108	36
15	S-A	100	523	43	321	50
16	S-A	90	51	96	664	9
17	S-A	200	104	698	96	350
18	S-A	240	120	187	472	S-A
19	S-A	66	209	1633	45	630
20	S-A	98	600	1100	398	492
21	S-A	408	51	790	80	350
22	S-A	110	105	15	422	396
23	S-A	22	15	72	322	235
24	S-A	298	74	121	277	286
25	S-A	112	106	1	380	169
26	S-A	190	42	201	548	63
27	S-A	1204	87	148	250	214
28	S-A	12	107	466	428	196
29	S-A	2	345	411	391	103
30	S-A	21	369	246	2	86
31	S-A	6	S-A	101	S-A	76

**TABLA 6. SISTEMA DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA
COMPLEJO DE INYECCIÓN DE AGUA**

**VELOCIDADES DE CORROSIÓN
2000**

Salida de planta (mpy)						
Día	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
1	0.44	0.66	1.87	0.27	0.66	0.92
2	0.37	6.03	1.82	0.20	0.49	1.30
3	0.27	0.89	1.91	0.25	0.56	1.00
4	0.25	1.12	1.79	3.24	0.60	1.20
5	0.76	2.66	4.39	2.66	0.51	1.39
6	0.28	1.29	1.72	0.64	0.71	S-A
7	0.22	1.78	2.05	1.55	1.61	S-A
8	0.11	1.48	1.22	0.62	2.17	S-A
9	0.37	1.52	1.54	0.31	0.80	S-A
10	2.45	1.71	1.28	0.39	0.76	S-A
11	0.37	1.87	1.52	0.66	0.90	S-A
12	0.45	1.80	1.51	1.40	0.75	S-A
13	0.38	1.80	1.52	0.70	0.75	S-A
14	0.79	1.90	1.54	0.55	0.66	S-A
15	0.54	2.10	1.51	1.36	0.65	S-A
16	0.67	2.32	1.46	1.54	0.69	S-A
17	0.7	2.40	1.35	0.73	0.71	S-A
18	0.76	2.40	1.39	0.63	0.99	S-A
19	0.63	2.60	1.41	0.52	0.70	3.36
20	0.57	2.40	1.46	0.56	0.74	0.46
21	0.50	2.70	1.43	1.88	0.79	0.43
22	0.56	3.10	1.62	0.63	0.91	0.38
23	0.61	8.80	1.71	0.48	5.10	0.35
24	0.70	3.73	2.16	0.48	1.49	S-A
25	0.53	4.43	2.16	0.45	1.44	S-A
26	0.57	3.35	1.16	2.87	1.15	S-A
27	0.60	2.34	2.45	1.86	1.01	S-A
28	0.61	2.08	4.69	0.76	2.26	0.23
29	0.54	2.16	2.65	3.99	1.08	0.32
30	1.90	S-A	0.46	0.77	0.97	0.12
31	0.61	S-A	0.27	S-A	0.92	S-A

VELOCIDADES DE CORROSIÓN (2000)(CONTINUACIÓN...)

Salida de planta (mpy)						
Día	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	0.10	0.54	0.44	S-A	0.10	0.10
2	0.10	S-A	0.27	S-A	0.14	0.14
3	0.10	S-A	0.29	S-A	0.12	0.30
4	0.07	S-A	0.37	S-A	0.12	0.21
5	0.07	0.30	0.79	S-A	0.12	0.17
6	0.07	0.31	0.46	S-A	0.14	0.16
7	0.07	0.45	0.76	S-A	0.15	3.08
8	0.07	0.52	0.47	S-A	0.23	1.02
9	0.07	0.34	0.35	S-A	0.33	0.43
10	0.09	0.29	1.23	S-A	0.36	0.20
11	0.07	0.29	0.37	S-A	0.37	0.15
12	S-A	0.23	0.30	3.41	0.39	0.13
13	S-A	0.22	0.32	1.74	0.31	0.13
14	S-A	1.48	0.37	1.16	0.23	0.15
15	S-A	0.27	0.34	1.16	0.20	0.55
16	S-A	0.22	0.32	0.76	0.19	0.55
17	S-A	0.18	0.34	0.74	0.19	0.38
18	S-A	0.18	0.70	0.80	0.29	0.27
19	S-A	0.37	0.75	0.80	0.19	0.46
20	S-A	0.66	0.31	0.80	0.17	0.54
21	S-A	0.54	0.38	0.75	0.19	0.47
22	S-A	0.35	0.39	0.71	0.16	0.19
23	S-A	0.33	0.40	2.44	0.10	0.14
24	S-A	0.30	0.40	0.80	0.11	0.46
25	S-A	0.18	0.42	0.76	0.09	0.48
26	S-A	0.16	0.38	0.79	0.09	0.24
27	S-A	0.45	0.42	0.79	0.25	0.46
28	S-A	0.38	0.44	0.38	0.13	0.30
29	0.32	0.26	0.69	0.21	0.10	0.28
30	0.64	0.25	0.42	0.48	0.46	0.22
31	0.66	0.29	S-A	0.12	S-A	0.19

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TABLA 7. Parámetros de corrosión obtenidos a partir de los valores de ruido electroquímico y población bacteriana de la cepa MBA-1B2

Tiempo (h)	Población (UFC/ml)	Rn (ohm cm ²)	Vcorr (mpy)	IL
0	41,000	5.47E+04	0.18	0.66
1	46,000	4.65E+03	2.08	0.48
2	46,000	1.05E+04	0.92	0.35
3	46,000	7.77E+03	1.24	0.89
4	50,000	2.39E+03	4.04	0.25
5	74,000	7.79E+03	1.24	0.02
6	100,000	3.48E+03	2.77	0.07
7	130,000	1.18E+04	0.82	0.14
24	6,000,000	6.07E+03	1.59	0.08
26	8,300,000	2.49E+04	0.39	0.06
28	19,000,000	4.62E+03	2.09	0.05
30	39,000,000	8.53E+03	1.13	0.12
48	58,000,000	8.08E+04	0.12	0.01

TABLA 8. Parámetros de corrosión obtenidos a partir de los valores de ruido electroquímico y población bacteriana de la cepa MBA-5B1

Tiempo (h)	Población (UFC/ml)	Rn (ohm cm ²)	Vcorr (mpy)	IL
0	3,600	1.62E+03	5.96	0.28
1	4,000	3.95E+03	2.45	0.10
2	6,900	7.35E+03	1.32	0.23
3	100,000	5.57E+03	1.74	0.39
4	340,000	7.88E+03	1.23	0.22
5	520,000	1.34E+04	0.72	0.60
6	680,000	1.80E+04	0.54	0.18
7	3,500,000	4.31E+04	0.22	0.84
24	190,000,000	1.54E+04	0.63	0.13
26	210,000,000	3.38E+04	0.29	0.02
28	100,000,000	3.68E+04	0.26	0.02
30	64,000,000	2.57E+04	0.38	0.04
48	48,000,000	2.09E+04	0.46	0.41

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TABLA 9. Parámetros de corrosión obtenidos a partir de los valores de ruido electroquímico y población bacteriana de la cepa MBA-6A2

Tiempo (h)	Población (UFC/ml)	Rn (ohm cm ²)	Vcorr (mpy)	IL
0	48,000	1.77E+03	5.47	0.41
1	50,000	1.88E+04	0.51	0.97
2	50,000	8.19E+02	11.80	0.94
3	52,000	1.42E+03	6.81	0.22
4	130,000	2.67E+03	3.62	0.82
5	290,000	1.59E+03	6.09	0.13
6	1,800,000	1.94E+03	4.99	0.45
7	6,000,000	3.00E+03	3.22	0.45
8	35,000,000	4.99E+03	1.94	0.13
24	85,000,000	4.23E+04	0.23	0.93
32	110,000,000	1.18E+05	0.08	0.06
48	14,000,000,000	1.61E+05	0.06	0.05

TABLA 10. Parámetros de corrosión obtenidos a partir de los valores de ruido electroquímico y población bacteriana de la cepa MBA-9B1

Tiempo (h)	Población (UFC/ml)	Rn (ohm cm ²)	Vcorr (mpy)	IL
1	7,100	6.05E+03	1.60	0.19
2	8,200	4.66E+03	2.07	0.46
19	9,200	6.93E+03	1.40	0.05
20	180,000	2.05E+04	0.47	0.07
21	200,000	7.32E+03	1.32	0.01
23	250,000	7.47E+04	0.13	0.20
24	360,000	5.20E+03	1.86	0.02
25	340,000	7.05E+03	1.37	0.02
26	670,000	9.35E+03	1.03	0.03
43	24,000,000	9.91E+03	0.98	0.49
47	36,000,000	1.47E+04	0.66	0.23
49	34,000,000	9.65E+03	1.00	0.15

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN