

01177
18

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

EFFECTO DE LA GENERACIÓN DE OXÍGENO FOTOSINTÉTICO EN UN SISTEMA SÓLIDO-LÍQUIDO-GAS

T E S I S

PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN INGENIERÍA
(INGENIERÍA AMBIENTAL)
PRESENTA

MARÍA GUADALUPE SOTO ESQUIVEL

TUTORA: DRA. ING. MARÍA DEL CARMEN DURÁN DOMÍNGUEZ DE BAZÚA

2003

TESIS CON
FALLA DE CUBIEN

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la
UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el
contenido de mi trabajo recepcional.
NOMBRE: Ma. Guadalupe
Soto Esquivel
FECHA: 19 - NOV - 03
FIRMA: [Signature]

A



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.

Jurado

Presidente	Dr. Germán Buitrón Méndez
Vocal	Dra. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa
Secretario	M. C. Lina María Cardoso Vigueros
Primer suplente	Dr. Joan Genescá Llongueras
Segundo suplente	Dra. Gabriela Moeller Chávez

Sitio en donde se realizó el trabajo de investigación:

Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental, Facultad de Química, UNAM. Laboratorios 301, 302 y 303. Conjunto E.

Facultad de Química, UNAM. Laboratorio de Tecnologías más limpias, B-201. Edificio B.

Sustentante



María Guadalupe Soto Esquivel

Tutor principal



María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa

TESIS CON
FALLA DE NÚMERO

A Óscar...

... con amor, respeto y admiración.

A mis papás y mi tía...

... por estar conmigo desde siempre.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

C

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) la beca otorgada para la realización de los estudios de maestría y la conclusión de los mismos con esta tesis.

A la DRA. ING. CARMEN DURÁN DE BAZÚA, por la tutoría recibida para la elaboración de esta tesis. Asimismo, se le agradecen las facilidades brindadas en el laboratorio del PIQAYQA.

Al DR. GERMÁN BUITRÓN y a la M.C. LINA CARDOSO, por su apoyo académico desde el Comité Tutorial.

Al DR. AGUSTÍN MUHLIA, del Centro de Ciencias de la Atmósfera, por la ayuda brindada en las mediciones de irradianza.

Al DR. JOAN GENESCA LLONGUERAS, por la asesoría recibida para la construcción y calibración de los electrodos.

A la DRA. GABRIELA MOELLER, por sus valiosos comentarios sobre este trabajo.

Al M.C. ROLANDO GARCÍA y la SRA. IRENE GONZÁLEZ, por el apoyo y las sonrisas otorgados durante mi segunda estancia en las instalaciones del PIQAYQA.

A la M.C. HILDA CALDERÓN, por las atenciones y apoyo dados durante mi experimentación en el laboratorio B-201.

A todos los compañeros de la maestría (en especial a Selene, Anilú y Luz), por las palabras de aliento recibidas cuando los ánimos estuvieron bajos.

A los chicos del PIQAYQA, por los buenos momentos pasados en el laboratorio.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CONTENIDO

	Página	
Resumen	ii	
Abstract	iii	
Glosario de términos	iv	
Índice de tablas y figuras	v	
Capítulo I	Antecedentes	1
	1.1 Problemática	1
	1.2 Objetivo y alcances	2
	1.3 Hipótesis	3
Capítulo II	Fundamentos	4
	II.1 Definiciones	4
	II.2 Mecanismos de remoción de contaminantes en los humedales artificiales	6
	II.3 Transporte de oxígeno en los humedales artificiales	8
	II.4 Irradianza recibida por las plantas en estudio	9
Capítulo III	Materiales y métodos	11
	III.1 Construcción de las columnas	11
	III.2 Alimentación de agua	13
	III.3 Presencia de luz UV	14
	III.4 Tiempo de residencia hidráulica (TRH)	14
	III.5 Construcción de los electrodos	15
	III.6 Análisis estadístico	15
Capítulo IV	Resultados experimentales y discusión	16
	IV.1 Calibración de los electrodos de referencia	16
	IV.2 Mediciones de irradianza	16
	IV.3 Parámetros fisicoquímicos	17
	IV.4 Diferencias de potencial	21
Capítulo V	Conclusiones y recomendaciones	27
Anexos		28
Anexo A1.	Construcción del sistema experimental	28
Anexo A2.	Metodologías analíticas	30
Anexo A3.	Resultados experimentales	32
Anexo A4.	Acervo fotográfico	71
Anexo A5.	Análisis estadísticos	78
Bibliografía		94

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

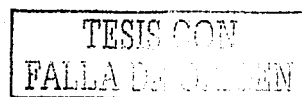
RESUMEN

En México, aproximadamente 80% de las aguas residuales generadas son descargadas al ambiente sin un tratamiento adecuado. Esto conlleva a la búsqueda de opciones de tratamiento de aguas residuales viables técnica y económicamente. Una de estas opciones la representan los humedales artificiales o construidos (HC); éstos son sistemas de tratamiento en los que se llevan a cabo procesos físicos y bioquímicos para la transformación de compuestos orgánicos disueltos. El oxígeno molecular es muy importante en éstos mecanismos de remoción, ya que se convierte en el reactivo limitante en los humedales, eliminando el material orgánico sólido y permitiendo su mineralización. Dentro de este contexto, en el laboratorio del Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental, de la Facultad de Química de la UNAM, se lleva a cabo un estudio que incluye la determinación del papel que juega la transferencia del oxígeno molecular en la zona radicular de las macrofitas. El estudio de que se habla plantea la determinación de la transferencia de oxígeno molecular del aire y el generado fotosintéticamente, hacia la zona de la raíz de la planta. Cuatro reactores con un volumen total de 20 L y un volumen de trabajo de 10 L y empacados con escoria volcánica (tezontle), fueron alimentados con agua residual sintética (R1 y R2) y con agua de la llave (R3 y R4). El agua residual sintética tenía un contenido de sacarosa, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, dando una relación C:N:P de 15:1:0.1. La carga orgánica se midió como demanda química de oxígeno (DQO) y fue de 800 mgL^{-1} . Dos de los reactores (R1 y R3) tenían una mata de tule (*Thypha latifolia*), cada una y los dos reactores restantes (R2 y R4) no tuvieron planta. Los reactores fueron totalmente sellados para disminuir la difusión del oxígeno de aire hacia las zonas empacadas. Los reactores se mantuvieron en un ambiente controlado a $28 \pm 2^\circ\text{C}$, con irradiación artificial constante equivalente a 20.6 Wm^{-2} para las 15 lámparas instaladas, durante 12 horas diarias (de 7:00 a 19:00 h (12 horas de luz / 12 horas de oscuridad). Los resultados indican que el oxígeno fotosintético aumenta la conversión de sustratos adicionados en el agua residual sintética y medidos como DQO.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ABSTRACT

In Mexico, almost 80% of the wastewater generated are discharged without any treatment. In this situation is imperative to look for technical and economical correct options. Wetlands are excellent alternatives for this case. In these systems, organic material is transformed by biochemical action of bacteria present in the soil or inert supporting media and the plant root zone. Molecular oxygen is very important in the degradation mechanisms, since it becomes the limiting reagent. Wetlands also eliminate suspended organic material in wastewater and permit its mineralization. At laboratory level, the Program for Environmental Chemical Engineering and Chemistry (PECEC) from the Faculty of Chemistry, UNAM, has been studying the effect of molecular oxygen in these systems using macrophytes. Results on previous experiments already published have lead to this study and its objective is to study the effect of the molecular oxygen generated by photosynthesis, in an artificial lab scale wetland. Four 20-Liter reactors (10-L working volume) packed with volcanic lava were fed with synthetic wastewater (R1, R2) and tap water (R3, R4). Synthetic wastewater contained sucrose, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ to give a C:N:P ratio (15:1:0.1) and 800 mg COD (total chemical oxygen demand)/L. Two reactors, R1, R3, had a single macrophyte (*Thypha latifolia*), and R2, and R4 had no plant. The reactors were fully covered to avoid or minimize the diffusion of atmospheric oxygen. Reactors were maintained in a $28 \pm 2^\circ\text{C}$ room with artificial constant light irradiation (20.6 Wm^{-2} for the 15 lamps installed) from 7:00 to 19:00 hours (12h light/12 h dark). Results indicate that photosynthetic oxygen enhances the conversion of substrates added to the synthetic wastewater, measured as COD.



GLOSARIO DE TÉRMINOS

Aerobio	Proceso metabólico que es realizado en presencia de oxígeno. En este caso el oxígeno molecular es el aceptor de electrones
Anaerobio	Proceso metabólico realizado en ausencia de oxígeno y la generación de energía se efectúa por medio de la formación de ATP con reacciones de óxido-reducción
Anóxico	Proceso metabólico que se realiza en ausencia de oxígeno, y en donde compuestos oxidados como nitratos y nitritos actúan como aceptores de electrones
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno en cinco días
DQO _T	Demanda química de oxígeno total (mg mL ⁻¹)
HA	Humedal artificial
OD	Oxígeno disuelto
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales (industriales o domésticas)
R1	Reactor de prueba, con planta macrofita y se regó con agua residual sintética
R2	Reactor testigo; sin planta macrofita y se regó con agua residual sintética
R3	Reactor testigo, con planta macrofita y se regó con agua corriente
R4	Reactor testigo, sin planta macrofita y se regó con agua corriente
Redox	Reacciones de óxido-reducción
T	Temperatura

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

		Página
Tabla II.1	Mecanismos de remoción de contaminantes en los sistemas de humedales (Miranda, 2000)	6
Tabla III.1	Estratos del material de soporte en las columnas en estudio (Durán de Bazúa, <i>et al.</i> , 1998; Fenoglio, 2002)	11
Figura III.1	Reactores R1 (reactor de prueba, alimentado con agua residual sintética y dotado con planta macrofita) y R2 (reactor testigo regado con agua residual sintética y sin planta macrofita)	12
Figura III.2	Reactores R3 y R4. el primero se refiere al reactor testigo regado con agua corriente y dotado con planta macrofita y el segundo se refiere al reactor testigo regado con agua corriente y sin planta macrofita	12
Tabla III.2	Composición del agua residual sintética (Fenoglio <i>et al.</i> , 2002)	14
Tabla IV.1	Mediciones obtenidas durante la calibración de los electrodos de referencia fabricados en el laboratorio	16
Figura IV.1	Dispositivo de medición de la irradianza emitida por dos de las lámparas utilizadas en la fase experimental	17
Figura IV.2	Resultados de las mediciones de demanda química de oxígeno total (DQO _T) realizadas a las muestras de los reactores R1 y R2 (con y sin planta y regados con agua residual sintética)	18
Figura IV.3	Resultados de las mediciones de conductividad eléctrica (CE) realizadas a las muestras de los reactores R1 y R2 (con y sin planta y regados con agua residual sintética)	19
Figura IV.4	Resultados de las mediciones de sólidos totales disueltos (STD) realizadas a las muestras de los reactores R1 y R2 (con y sin planta y regados con agua residual sintética)	20
Figura IV.5	Resultados de las mediciones de pH realizadas a las muestras de los reactores R1 y R2 (con y sin planta y regados con agua residual sintética)	21
Figura IV.6	Comparación de los electrodos A en los reactores R1, R2, R3 y R4, operando en la fase estable, a un TRH de 12 y 24 horas	22
Figura IV.7	Comparación de los electrodos B en los reactores R1, R2, R3 y R4, operando en la fase estable, a un TRH de 12 y 24 horas	23
Figura IV.8	Comparación de los electrodos C en los reactores R1, R2, R3 y R4, operando en la fase estable, a un TRH de 12 y 24 horas	25

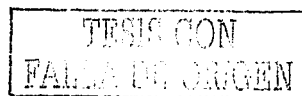


Figura A.1.1	Diagrama demostrativo de la ubicación de los electrodos en los reactores	28/
Figura A.3.1	Detalle del radiómetro con el que se hicieron las mediciones de irradianza	32
Tabla A.3.1.1	Valores de irradianza obtenidos con un radiómetro	33
Tabla A.3.2.1	Resultados de los análisis fisicoquímicos realizados al influente y efluentes del dispositivo experimental	34
Tabla A.3.3.1	Mediciones de diferencia de potencial obtenidas en el reactor R1 (con planta y regado con agua residual sintética), operando a un TRH de 12 horas	35
Tabla A.3.3.2	Mediciones de diferencia de potencial obtenidas en el reactor R2 (sin planta y regado con agua residual sintética), operando a un TRH de 12 horas	36
Tabla A.3.3.3	Mediciones de diferencia de potencial obtenidas en el reactor R3 (con planta y regado con agua corriente), operando a un TRH de 12 horas	37
Tabla A.3.3.4	Mediciones de diferencia de potencial obtenidas en el reactor R4 (sin planta y regado con agua corriente), operando a un TRH de 12 horas	38
Tabla A.3.3.5	Mediciones de diferencia de potencial obtenidas en el reactor R1 (con planta y regado con agua residual sintética), operando a un TRH de 24 horas	39
Tabla A.3.3.6	Mediciones de diferencia de potencial obtenidas en el reactor R2 (sin planta y regado con agua residual sintética), operando a un TRH de 24 horas	40
Tabla A.3.3.7	Mediciones de diferencia de potencial obtenidas en el reactor R3 (con planta y regado con agua corriente), operando a un TRH de 24 horas	41
Tabla A.3.3.8	Mediciones de diferencia de potencial obtenidas en el reactor R4 (sin planta y regado con agua corriente), operando a un TRH de 24 horas	42
Figura A.3.3.1	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 7:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	43
Figura A.3.3.2	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 9:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	43
Figura A.3.3.3	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 11:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	44

Figura A.3.3.4	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 13:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	44
Figura A.3.3.5	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 15:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	45
Figura A.3.3.6	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 17:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	45
Figura A.3.3.7	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 19:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	46
Figura A.3.3.8	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 7:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	46
Figura A.3.3.9	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 9:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	47
Figura A.3.3.10	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 11:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	47
Figura A.3.3.11	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 13:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	48
Figura A.3.3.12	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 15:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	48

Figura A.3.3.13	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 17:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	49
Figura A.3.3.14	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 19:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	49
Figura A.3.3.15	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 7:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	50
Figura A.3.3.16	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 9:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	50
Figura A.3.3.17	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 11:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	51
Figura A.3.3.18	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 13:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	51
Figura A.3.3.19	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 15:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	52
Figura A.3.3.20	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 17:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	52
Figura A.3.3.21	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 19:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	53

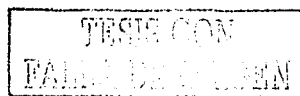


Figura A.3.3.22	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 7:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	53
Figura A.3.3.23	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 9:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	54
Figura A.3.3.24	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 11:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	54
Figura A.3.3.25	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 13:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	55
Figura A.3.3.26	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 15:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	55
Figura A.3.3.27	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 17:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	56
Figura A.3.3.28	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 19:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	56
Figura A.3.3.29	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 7:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	57
Figura A.3.3.30	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 9:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	57

Figura A.3.3.31	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 11:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	58
Figura A.3.3.32	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 13:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	58
Figura A.3.3.33	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 15:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	59
Figura A.3.3.34	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 17:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	59
Figura A.3.3.35	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 19:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	60
Figura A.3.3.36	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 7:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	60
Figura A.3.3.37	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 9:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	61
Figura A.3.3.38	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 11:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	61
Figura A.3.3.39	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 13:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	62

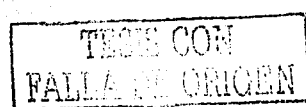


Figura A.3.3.40	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 15:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	62
Figura A.3.3.41	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 17:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	63
Figura A.3.3.42	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 19:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	63
Figura A.3.3.43	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 7:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	64
Figura A.3.3.44	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 9:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	64
Figura A.3.3.45	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 11:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	65
Figura A.3.3.46	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 13:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	65
Figura A.3.3.47	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 15:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	66
Figura A.3.3.48	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 17:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	66

Figura A.3.3.49	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 19:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	67
Figura A.3.3.50	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 7:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	67
Figura A.3.3.51	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 9:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	68
Figura A.3.3.52	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 11:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	68
Figura A.3.3.53	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 13:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	69
Figura A.3.3.54	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 15:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	69
Figura A.3.3.55	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 17:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	70
Figura A.3.3.56	Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 19:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie; electrodo C, a 30 cm de la superficie	70
Figura A.4.1	Multímetro digital utilizado	71
Figura A.4.2	Detalle del empaçado de una columna	71
Figura A.4.3	Agua residual sintética en descomposición	71
Figura A.4.4	Detalle del dispositivo de medición de irradiancia	72
Figura A.4.5	Detalle del dispositivo de medición de irradiancia	72
Figura A.4.6	Detalle del dispositivo de medición de irradiancia	73
Figura A.4.7	Detalle del dispositivo de medición de irradiancia	73

Figura A.4.8	Detalle del radiómetro	74
Figura A.4.9	Detalle del dispositivo de medición de irradianza	74
Figura A.4.10	Reactores R1 (reactor de prueba) y R2 (reactor testigo), regados con agua residual sintética	75
Figura A.4.11	Reactores R4 (reactor testigo) y R3 (reactor testigo), regados con agua corriente	75
Figura A.4.12	Vista general del sistema experimental	76
Figura A.4.13	Detalle de dos de las lámparas utilizadas para en el experimento	76
Figura A.4.14	Detalle del sitio en donde se realizó el experimento; la temperatura se mantuvo en un intervalo de $28 \pm 2^\circ\text{C}$	77
Tabla A.5.1	Valores de promedio, rango, desviación estándar y estadístico F, para los valores de diferencia de potencial obtenidos en los electrodos A, B y C, del reactor R1, a las 7:00 horas, operando a un TRH de 12 horas	79
Figura A.5.1	Rangos en el reactor R1 (con planta y regado con agua residual sintética), operando a un TRH de 12 horas. Medición de las 7:00 horas	80
Figura A.5.2	Desviación estándar del reactor R1 (con planta y regado con agua residual sintética), operando a un TRH de 12 horas. Medición de las 7:00 horas	80
Figura A.5.3	Valores de diferencia de potencial promedio en el reactor R1 (con planta y regado con agua residual sintética), operando a un TRH de 12 horas. Medición de las 7:00 horas	81
Figura A.5.4	Prueba de estadístico F para el reactor R1 (con planta y regado con agua residual sintética), operando a un TRH de 12 horas. Medición de las 7:00 horas	81
Figura A.5.5	Diferencias de potencial promedio en el electrodo A (a 2 cm de la superficie) en el reactor R1 (con planta y regado con agua residual sintética), operando a un TRH de 12 horas	82
Figura A.5.6	Diferencias de potencial promedio en el electrodo B (a 10 cm de la superficie) en el reactor R1 (con planta y regado con agua residual sintética), operando a un TRH de 12 horas	82
Figura A.5.7	Diferencias de potencial promedio en el electrodo C (a 30 cm de la superficie) en el reactor R1 (con planta y regado con agua residual sintética), operando a un TRH de 12 horas	83
Figura A.5.8	Diferencias de potencial promedio en el electrodo A (a 2 cm de la superficie) en el reactor R2 (sin planta y regado con agua residual sintética), operando a un TRH de 12 horas	83

Figura A.5.9	Diferencias de potencial promedio en el electrodo B (a 10 cm de la superficie) en el reactor R2 (sin planta y regado con agua residual sintética), operando a un TRH de 12 horas	84
Figura A.5.10	Diferencias de potencial promedio en el electrodo C (a 30 cm de la superficie) en el reactor R2 (con planta y regado con agua residual sintética), operando a un TRH de 12 horas	84
Figura A.5.11	Diferencias de potencial promedio en el electrodo A (a 2 cm de la superficie) en el reactor R3 (con planta y regado con agua corriente), operando a un TRH de 12 horas	85
Figura A.5.12	Diferencias de potencial promedio en el electrodo B (a 10 cm de la superficie) en el reactor R3 (con planta y regado con agua corriente), operando a un TRH de 12 horas	85
Figura A.5.13	Diferencias de potencial promedio en el electrodo C (a 30 cm de la superficie) en el reactor R3 (con planta y regado con agua corriente), operando a un TRH de 12 horas	86
Figura A.5.14	Diferencias de potencial promedio en el electrodo A (a 2 cm de la superficie) en el reactor R4 (sin planta y regado con agua corriente), operando a un TRH de 12 horas	86
Figura A.5.15	Diferencias de potencial promedio en el electrodo B (a 10 cm de la superficie) en el reactor R4 (sin planta y regado con agua corriente), operando a un TRH de 12 horas	87
Figura A.5.16	Diferencias de potencial promedio en el electrodo C (a 30 cm de la superficie) en el reactor R4 (con planta y regado con agua corriente), operando a un TRH de 12 horas	87
Figura A.5.17	Diferencias de potencial promedio en el electrodo A (a 2 cm de la superficie) en el reactor R1 (con planta y regado con agua residual sintética), operando a un TRH de 24 horas	88
Figura A.5.18	Diferencias de potencial promedio en el electrodo B (a 10 cm de la superficie) en el reactor R1 (con planta y regado con agua residual sintética), operando a un TRH de 24 horas	88
Figura A.5.19	Diferencias de potencial promedio en el electrodo C (a 30 cm de la superficie) en el reactor R1 (con planta y regado con agua residual sintética), operando a un TRH de 24 horas	89
Figura A.5.20	Diferencias de potencial promedio en el electrodo A (a 2 cm de la superficie) en el reactor R2 (sin planta y regado con agua residual sintética), operando a un TRH	89

	de 24 horas	
Figura A.5.21	Diferencias de potencial promedio en el electrodo B (a 10 cm de la superficie) en el reactor R2 (sin planta y regado con agua residual sintética), operando a un TRH de 24 horas	90
Figura A.5.22	Diferencias de potencial promedio en el electrodo C (a 30 cm de la superficie) en el reactor R2 (con planta y regado con agua residual sintética), operando a un TRH de 24 horas	90
Figura A.5.23	Diferencias de potencial promedio en el electrodo A (a 2 cm de la superficie) en el reactor R3 (con planta y regado con agua corriente), operando a un TRH de 24 horas	91
Figura A.5.24	Diferencias de potencial promedio en el electrodo B (a 10 cm de la superficie) en el reactor R3 (con planta y regado con agua corriente), operando a un TRH de 24 horas	91
Figura A.5.25	Diferencias de potencial promedio en el electrodo C (a 30 cm de la superficie) en el reactor R3 (con planta y regado con agua corriente), operando a un TRH de 24 horas	92
Figura A.5.26	Diferencias de potencial promedio en el electrodo A (a 2 cm de la superficie) en el reactor R4 (sin planta y regado con agua corriente), operando a un TRH de 24 horas	92
Figura A.5.27	Diferencias de potencial promedio en el electrodo B (a 10 cm de la superficie) en el reactor R4 (sin planta y regado con agua corriente), operando a un TRH de 24 horas	93
Figura A.5.28	Diferencias de potencial promedio en el electrodo C (a 30 cm de la superficie) en el reactor R4 (con planta y regado con agua corriente), operando a un TRH de 24 horas	93

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

I.1 PROBLEMÁTICA

En México se generan aproximadamente $230 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ de aguas residuales, de los cuales sólo el 15.3% de ellas son tratadas para ser descargadas a los cuerpos receptores y el resto son descargadas sin tratamiento alguno o tratadas en forma parcial. De la capacidad instalada de PTAR (industriales y domésticas), sólo opera el 70%, aproximadamente (CNA, 2003). Esto conlleva a una situación de deterioro, tanto ecológico, como de la calidad de vida de los habitantes del país (Luna Pabello et al.; 1997; Ramírez *et al.*, 1997). Los problemas de tipo económico y político agravan la situación y aunado a esto puede hablarse de la falta de educación sobre aspectos de contaminación ambiental y de la búsqueda de solución a estas problemáticas, prevaleciente en la sociedad, ocasionando que el tratamiento de estos desechos líquidos se torne un problema de gran magnitud.

En vista de lo anterior, la búsqueda de opciones de tratamiento de aguas residuales viables técnica y económicamente (por su sencillez en la construcción, operación y mantenimiento), se hace una necesidad imperativa. Una de estas opciones la representan los humedales artificiales o construidos (HA o HC). Estos son sistemas de tratamiento en los que se llevan a cabo procesos físicos y bioquímicos para la transformación de compuestos orgánicos disueltos. Su diseño y construcción son relativamente sencillos y los costos de operación y mantenimiento son más bajos que los sistemas convencionales. Puede decirse que los HC representan una opción viable de tratamiento de aguas residuales en zonas suburbanas y rurales (Fenoglio, 2003; Fenoglio et al., 2002). Actualmente las plantas de tratamiento existentes en el país, basadas en humedales artificiales, son a nivel piloto. Se puede encontrar una descripción más detallada de esta situación en Miranda (2000).

Los HC se fundamentan en los siguientes principios básicos: La actividad bioquímica de los microorganismos; el aporte de oxígeno a través de los vegetales y un lecho que sirve como soporte, tanto para los microorganismos como para los vegetales, además de servir como material filtrante. En conjunto, estos elementos eliminan materiales orgánicos suspendidos en el agua residual (Cooper y Green, 1995; Reed, 1992) y biodegradan materiales disueltos susceptibles al tratamiento biológico hasta mineralizarlos (Hu, 1991).

No requieren sistemas de bombeo una vez que el agua residual llega a ellos, dado que al lecho se le proporciona una pendiente de entre 6 y 8% para facilitar el flujo del agua.

PAGINACIÓN DISCONTINUA

Por otro lado, tienen un período de vida útil relativamente largo, 25 años, cuando funcionan adecuadamente. No presentan malos olores y son estéticamente agradables. Las plantas se pueden cosechar para la manufactura de productos específicos (construcción, utensilios, etc.) de tipo artesanal.

Hablando de los inconvenientes del sistema, puede decirse que si hubiera infestaciones por plagas, las macrofitas se ven afectadas, sobre todo si hay monocultivos. Durante el período de estiaje, debido a que parte de las hojas van secándose, pueden ser propensos a sufrir daños por incendios, ya sean por accidente o por vandalismo. Aún cuando este tipo de sistemas tiene una eficiencia promedio del 90% (Brix, 1993; Hammer, 1993), no se cuenta con la información suficiente para garantizar su correcto funcionamiento en zonas distintas a donde se han determinado estas eficiencias.

Los estudios que plantean el efecto de la transferencia del oxígeno generado por las macrofitas durante la fotosíntesis al sistema radicular donde se encuentran las bacterias y su impacto en la bioconversión de la materia orgánica son relativamente escasos. Por ello, en esta investigación se plantea corroborar este fenómeno, experimentalmente, en sistemas a escala de banco.

Dentro de este contexto, en el laboratorio del Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental, de la Facultad de Química de la UNAM, se lleva a cabo un estudio que incluye la determinación del papel que juega la transferencia del oxígeno molecular en la zona radicular de las macrofitas.

El estudio correspondiente al oxígeno difundido del aire a través de la alimentación secuenciada de agua residual al humedal artificial, fue realizado en México y Alemania, por un estudiante de la Maestría en Ciencias Químicas (Química Ambiental), de la Facultad de Química de la UNAM. Los resultados preliminares fueron dados a conocer en su tesis de grado (Fenoglio, 2003) y son citados a lo largo de este documento, ya que son parte complementaria del mismo. Este estudio plantea la determinación de la transferencia de oxígeno generado fotosintéticamente, hacia la zona de la raíz de la planta, de manera indirecta, usando potenciales de óxido-reducción.

1.2 OBJETIVO Y ALCANCES

Durante la elaboración del presente trabajo, se contempla el cumplimiento del siguiente objetivo:

Evaluar el efecto del oxígeno generado fotosintéticamente en la depuración de agua residual en columnas que simulan humedales artificiales.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los alcances del proyecto implican construir un sistema modelo a escala de banco para seguir, de manera indirecta, mediante mediciones de potenciales de óxido-reducción la transferencia del oxígeno generado por la acción fotosintética de las macrofitas, a través del lecho poroso que sirve de soporte a los microorganismos y las macrofitas. Se emplearán electrodos contruidos con materiales sencillos y se intercalibrarán con electrodos comerciales.

I.3 HIPÓTESIS

La hipótesis en que se basa este trabajo establece que: La degradación de la materia orgánica presente en agua residual sintética se realiza mediante la acción del consorcio bacteriano aerobio presente en la zona radicular de la planta macrofita facilitándose esta degradación por la presencia de oxígeno generado fotosintéticamente.

Esta degradación está limitada por la cantidad de oxígeno presente en la zona de la raíz, ya que durante el día se tiene la generación de oxígeno fotosintético y en la noche las macrofitas respiran como cualquier organismo aerobio, por lo que no generan oxígeno, lo que plantea un mecanismo secuenciado aerobio-anaerobio durante el día y la noche en el reactor.

Este mecanismo de transferencia de oxígeno durante el día es cuantificable mediante la medición de las diferencias de potencial redox presentes en el sistema.

A continuación se presentan los fundamentos en los que se basa este sistema.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

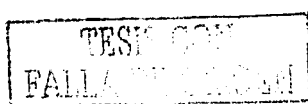
II.1 DEFINICIONES

Un humedal se define como un área de terreno totalmente inundado por aguas dulces o salobres. La inundación puede ser permanente o temporal, según sea la época del año. Existe en ellos vegetación propia de las zonas húmedas y adaptadas a la vida acuática o semi-acuática. Los humedales pueden ser naturales (pantanos, esteros, marismas, manglares, etc.) o artificiales, los cuales son sistemas creados por el hombre, a semejanza de los naturales, con la finalidad de usarlos en el tratamiento de las aguas residuales (Hammer y Bastian, 1989; Hammer, 1993; Bastian y Hammer, 1993; Vymazal *et al.*, 1998).

Los humedales artificiales o construidos por el hombre son sistemas específicamente diseñados para tratar aguas residuales, como se ha comentado arriba. La filosofía del tratamiento consiste en aumentar la capacidad depuradora del sistema mediante la optimización de los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en los sistemas naturales (Hammer y Bastian, 1989; Vymazal *et al.*, 1998).

Este método de uso de humedales para tratamiento de aguas residuales, conocido también como método de la rizosfera o de zona de la raíz (root method, en inglés), aprovecha las raíces de las plantas (hidrofitas) y sus consorcios microbianos para la degradación de los contaminantes orgánicos a compuestos simples asimilables por la misma planta. El principio fundamental del método se basa en el hecho de que la rizosfera (ambiente acuático que circunda las raíces de la planta) es altamente aerobio por el aporte de oxígeno que proviene del sistema vascular de los tallos y de las hojas de las plantas; asimismo, el movimiento natural de las raíces y rizomas mantiene la porosidad del medio plantado, permitiendo el flujo continuo de desechos a través de todo el sistema de lechos. De esta forma, el área circundante a las raíces es aerobia, mientras que las partes alejadas de ellas son anaerobias. La interacción de estos micro-ambientes permiten el desarrollo de una gran variedad de microorganismos como protozoarios, bacterias, hongos y algas (Riviera y Calderón, 1993).

Además de las altas eficiencias de remoción de carga orgánica y sólidos suspendidos que alcanzan los sistemas de este tipo, es importante resaltar su utilidad en la eliminación de nutrimentos, como el fósforo y el nitrógeno, del agua residual tratada en ellos (Haberl y Perfler, 1991).



Las plantas hidrofitas más utilizadas en estos sistemas pueden ser clasificadas en: (a) flotantes, como el lirio acuático (*Eichhornia sp*) y el chichicachtli (del Náhuatl *chichic*=amargo + *achtli*=semilla) o lentejilla (*Lemna sp*, *Hydrocotyle sp*, *Nimpha sp*); (b) emergentes, como los tules (*Typha sp*), los carrizos (*Phragmites sp*), el platanillo (*Canna sp*), la espadaña (*Scirpus sp*) y el ombligo de Venus (*Hydrocotyle sp*); (c) sub-emergentes, como *Elodea sp*, *Lobelia dortmanna* e *Isoetes lacustris* (Bishop y Eighmy, 1989; Brix, 1993; Zirschky y Reed, 1988).

Con base en esta clasificación de las hidrofitas, en términos generales, los HA o HC pueden clasificarse en tres tipos, de acuerdo con la forma de vida de las plantas vasculares dominantes en el ecosistema (Haberl, 1997): Sistemas de libre flotación, sistemas de raíces emergentes y sistemas subemergentes.

En particular, los sistemas de raíces emergentes se clasifican en dos grupos, considerando la forma de alimentación: de flujo horizontal, los cuales tienen la característica de que el influente se introduce al sistema de forma lateral y de flujo vertical, en donde el influente es alimentado por la parte superior.

En función de la concentración y características de los contaminantes presentes en el agua que se pretende tratar, así como los requerimientos de carga que se deseen obtener, se elige uno u otro diseño.

De cualquier forma, es necesaria la implementación de un pretratamiento que facilite la remoción de los sólidos suspendidos de fácil sedimentación y que prolongue la vida útil del HC (previniendo su rápido azolvamiento).

El funcionamiento general del sistema se basa en que un lecho de raíces, usando plantas emergentes, como los carrizos (*Phragmites sp*) y los tules (*Typha sp*), muy abundantes en México y ubicuas de muchas regiones del planeta, aporta una vía o ruta hidráulica por donde fluye el agua a tratar. Esta zona, llamada como ya se dijo, rizosfera, es el espacio entre los rizomas, las raíces y el área circundante. El movimiento de la trama radicular en crecimiento (raíces y rizomas) abriéndose espacio en el material inerte, previene la obstrucción del flujo de agua.

Los carrizos y los tules aportan el oxígeno a la rizosfera a través de las hojas, los tallos y rizomas de los vegetales mediante la fotosíntesis (Conley, 1991). Es recomendable que el sistema se encuentre permanentemente húmedo, para que las plantas crezcan adecuadamente. Al inicio es posible regar el humedal con agua corriente pero, a medida que las raíces de los vegetales crecen y maduran, se procede a la irrigación con agua residual hasta que ésta constituye el único aporte.

Los costos de inversión requeridos por los sistemas de humedales artificiales son muy bajos, comparados con los tratamientos convencionales ya que, dado que su vida útil es larga (hasta 25 años), los costos de mantenimiento también son bajos.

Por otro lado, si se tiene el cuidado de hacer un correcto diseño, la conducción del agua es por gravedad, lo que elimina una parte importante de los consumos energéticos y el consecuente gasto por este concepto (Reed, 1992).

Los desequilibrios en la operación debidos a fluctuaciones bruscas en el caudal o en los niveles de concentración de contaminantes, pueden controlarse mediante características específicas de los diseños, haciendo que el sistema opere más eficientemente.

II.2 MECANISMOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

El principio fundamental del mecanismo de remoción de material orgánico y nutrimentos, es el hecho de que la rizosfera, es decir, el ambiente fluido que circunda las raíces de la planta es altamente aerobio, por el aporte continuo de oxígeno de la planta (raíces, tallo y hojas) hacia el medio, debido al intercambio de O_2 por CO_2 que realiza la misma planta, a lo cual se debe añadir el movimiento natural de las raíces y rizomas que mantiene poroso el medio plantado, permitiendo el flujo continuo de desechos a través de todo el sistema. Se tienen así dos microambientes: Uno aerobio, cerca de la raíz (en la rizosfera) y otro anaerobio, en las partes alejadas de la misma, como ya se dijo arriba. Entre ambos realizan la degradación de los nutrimentos presentes en el agua residual, a compuestos más simples aprovechables por la planta o por otros organismos del sistema (Hammer, 1993; Rivera y Calderón, 1993).

La raíz influye en el suelo de varias maneras: Los niveles de CO_2 aumentan por la respiración de la raíz durante la noche y las concentraciones de oxígeno, agua y minerales se reducen, mientras que durante el día, la raíz y la planta entera producen oxígeno y consumen CO_2 mediante la fotosíntesis (Campbell, 1987; Rivera y Calderón, 1993).

La Tabla II.1 resume los mecanismos que tienen lugar en un humedal al interaccionar los elementos bióticos y abióticos del sistema.

Tabla II.1. Mecanismos de remoción de contaminantes en los sistemas de humedales (Miranda, 2000)

MECANISMOS	CONTAMINANTE AFECTADO	DESCRIPCION
FISICOS		
Sedimentación	P) Sólidos sedimentables S) Sólidos coloidales I) DBO, N, F, metales orgánicos y refractarios, bacterias y virus	Sedimentación por gravedad y constituyentes contaminantes
Filtración	S) Sólidos sedimentables S) Sólidos coloidales	Partículas retenidas mecánicamente a medida que pasa el agua por el sustrato y masa de raíces

Adsorción	S) Sólidos coloidales	Fuerzas de atracción entre partículas (Van der Waals)
Volatilización	S) N	Volatilización del NH ₃ del agua residual
QUÍMICOS		
Precipitación	P) F y metales pesados	Formación y coprecipitación de compuestos insolubles
Adsorción	P) F y metales pesados S) Compuestos orgánicos refractarios	Adsorción sobre la superficie de sustrato y planta
Descomposición	P) Compuestos orgánicos refractarios	Descomposición o alteración de compuestos menos estables por fenómenos como irradiación UV, oxidación y reducción
BIOLÓGICOS		
Metabolismo microbiano	P) Sólidos coloidales, DBO, N, orgánicos refractarios, metales pesados	Remoción de sólidos coloidales y orgánicos solubles por bacterias suspendidas y adheridas a las plantas
Metabolismo de las Plantas	S) Orgánicos refractarios, bacterias y virus	Consumo y metabolismo de orgánicos por las plantas. Las secreciones de las raíces pueden ser tóxicas a los organismos de origen entérico
Absorción de las plantas	S) N, F, metales pesados, orgánicos refractarios	Bajo condiciones apropiadas, cantidades significativas de estos contaminantes pueden ser tomados por las plantas
Muerte natural	P) Bacterias y virus	Decaimiento natural de microorganismos en ambientes desfavorables

Donde: P) = Efecto primario; S) = Efecto secundario; I) = Efecto incidental; DBO = Demanda bioquímica de oxígeno; N = Nitrógeno; F = Fósforo

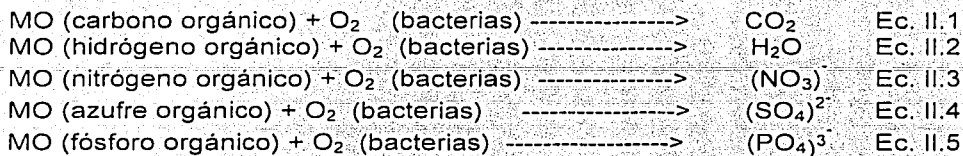
Los sólidos suspendidos en general son removidos en una unidad de pre-tratamiento mecánico que se recomienda exista antes del humedal; el resto de sólidos suspendidos es removido por sedimentación y filtración, una vez que el agua a tratar ha entrado a éste. Como se observa en la Tabla II.1, los tratamientos puramente físicos remueven un porcentaje importante de contaminantes como DBO₅, nutrimentos y microorganismos patógenos (Lord, 1982; Perfler y Haberl, 1994, 1995).

Los compuestos orgánicos solubles, en su mayoría, son degradados aerobiamente por bacterias fijas en la planta y en las superficies sedimentadas, aunque la degradación anaerobia puede ser importante en casos en los que la cantidad de O₂ no sea suficiente.

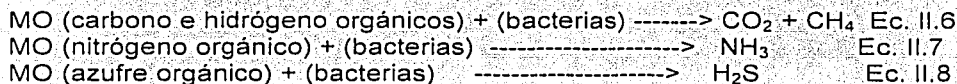
En ambos mecanismos se suceden una serie de transformaciones capaces de descomponer la materia orgánica (MO) en diferentes grados. Así, en el medio acuático tiene lugar una autodepuración que no es más que el resultado de los procesos de digestión, asimilación y metabolización de los compuestos orgánicos por microorganismos saprófitos (bacterias, hongos y protozoarios, entre otros).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En las reacciones de descomposición microbiana aerobia se consume O_2 y se producen CO_2 y H_2O , como se describe en las siguientes reacciones simplificadas (Ecs. II.1-II.5):



Por su parte, las reacciones anaerobias son procesos en los que, a partir de materia orgánica, se producen metano y dióxido de carbono (Brix, 1993; Manahan, 2002; Rivera y Calderón, 1993; Robles *et al.*, 1993):



Como estos dos microambientes coexisten en el sistema, se combinan mejorando de esta forma la depuración del agua residual.

II.3 TRANSPORTE DE OXÍGENO EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

El O_2 necesario para la degradación del material orgánico, presente en el agua residual a tratar, proviene de distintas fuentes: Directamente de la atmósfera por difusión a través del sedimento, por medio de la interfase agua-atmósfera o por la producción fotosintética de oxígeno en la planta y que ésta intercambia con el medio, a través de raíces, tallo y hojas (Brix, 1993).

Durante el día, con el proceso de fotosíntesis, las plantas hacen una aportación importante de oxígeno. Se ha identificado que al utilizar plantas sembradas en el medio de soporte de los humedales, se generan condiciones tales que favorecen el desarrollo de microorganismos en la zona de la rizosfera y ayudan a la oxigenación de esta zona (Haberl, 1997), aumentando la capacidad de degradación aerobia de la materia orgánica (Brix, 1993). Por otro lado, la anatomía de la planta también ayuda al proceso de oxigenación del sistema, ya que los tallos, huecos en el centro, de las plantas macrofitas vasculares facilitan este proceso.

El medio de soporte es fundamental para garantizar la transferencia de masa (O_2 y CO_2 , así como micro y macromoléculas que forman el material contaminante del agua residual) y permitir el flujo de agua residual y sus contaminantes (Brix, 1993, Haberl, 1997).

En los humedales, el transporte interno de oxígeno puede ocurrir por difusión molecular pasiva, siguiendo los gradientes de concentración de un sistema lacustre. También puede ser por flujo convectivo del aire a través de los espacios internos libres de las plantas (Vymazal *et al.*, 1998).

La difusión es el proceso mediante el cual, la materia es transportada de una parte del sistema a otra, como resultado del movimiento molecular. El movimiento neto de la materia será de los sitios con más alta concentración a sitios con más baja concentración, tendiendo hacia el equilibrio. Las tasas de difusión de los gases dependen del medio en que se lleva a cabo el proceso, el peso molecular del gas y de la temperatura. Estos factores se representan en el coeficiente de difusión del gas, misma que ha sido estandarizada para varias sustancias. Matemáticamente se expresa mediante la Ley de Fick.

En varias especies la convección juega un papel importante en la aireación de los tejidos bajo tierra. Otro mecanismo de transporte de gases en la zona de las raíces, es la "transpiración térmica"; ésta consiste en el movimiento del gas a través de una separación porosa cuando hay un gradiente de concentración "ayudado" por uno de temperatura a través de la separación (Vymazal *et al.*, 1998).

La magnitud de la difusión del oxígeno a través de las plantas hacia la zona de la raíz, es aparentemente suficiente para la rizosfera y para oxidar el material anóxico adyacente.

La extensión de la oxigenación depende de varios factores, incluyendo la carga orgánica (medida como demanda bioquímica de oxígeno, DBO) y los procesos químicos que se llevan a cabo en el sustrato sólido, así como de la facilidad del oxígeno para "escapar" de la raíz de la planta, lo cual depende de cada planta (Brix, 1993; Vymazal *et al.*, 1998).

El material inerte de los humedales está preferentemente bajo condiciones anaerobias, inducidas por la saturación y la inundación del medio. El resultado más significativo de su aislamiento del oxígeno atmosférico, es el cambio de las condiciones en su seno de ser aerobias oxidantes a anóxicas reductoras (Vymazal *et al.*, 1998; Haberl, 1997).

II.4 IRRADIANZA RECIBIDA POR LAS PLANTAS EN ESTUDIO

Con el objeto de evaluar la fuente fotónica (ya que se usan lámparas en sustitución de la luz solar), se medirá la radiación que teóricamente reciben los sistemas en estudio (irradiación o irradiancia), a través de las lámparas.

La irradianza es la cantidad de energía por unidad de área. Como ejemplo, se puede pensar en un plato negro expuesto al sol. La irradianza es la cantidad de energía solar que calienta al plato. Si el sol está en el cenit habrá más energía para calentar el plato, que si estuviera en la puesta (casi en el horizonte), despreciando los efectos atmosféricos. La radiación que recibe la tierra diariamente del sol es de unos 1300 Wm^{-2} (Manahan, 2002).

La irradianza fotosintéticamente activa es la energía emitida por el sol y recibida por las plantas y de la cual se sirven para realizar el proceso de la fotosíntesis. Hay una relación directamente proporcional entre irradianza y oxígeno producido durante este proceso y que se puede expresar por medio de una curva de irradianza vs. oxígeno producido.

A continuación se presenta la metodología empleada en esta investigación.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó la construcción de un dispositivo experimental capaz de proporcionar información indirecta sobre el oxígeno presente en el sistema, mediante la medición de las diferencias de potencial en el sistema de estudio. Para ello se utilizaron unas columnas empacadas y provistas de electrodos redox, previamente construidas (Fenoglio, 2003). Los electrodos proporcionan lecturas de diferencias de potencial, las cuales fueron registradas en forma electrónica. Las columnas simulaban un sistema de humedales construidos. Dos de las columnas contaban con matas de tules (*Typha sp*) y dos, controles, no tuvieron macrofitas. Dos de los reactores fueron regados con agua residual sintética, uno con macrofitas y otro sin ella, para evaluar la remoción de la carga orgánica presente. Los otros dos fueron regados con agua de la llave (sin materia orgánica). A continuación se detalla la metodología que se siguió para alcanzar los objetivos planteados al inicio de este documento.

III.1 CONSTRUCCIÓN DE LAS COLUMNAS

Se emplearon cuatro columnas para simular los reactores. Las columnas fueron construidas con acrílico y contaban con 30 cm de diámetro y 60 cm de alto. Estaban empacadas con medio de soporte inerte, consistente de escoria volcánica, previamente lavada y esterilizada. La granulometría del medio está distribuida de acuerdo con la Tabla III.1 (Durán-de-Bazúa *et al.*, 1998). En dos de ellas fueron colocadas macrofitas (tules provenientes de Xochimilco y adaptadas a la zona de la Ciudad Universitaria, *Typha sp*) y dos, que se emplearon como control, no contaron con planta (Fenoglio *et al.*, 2002). A las dos primeras columnas se les identificó como R1 y R2, respectivamente; mientras que a las columnas restantes se les denominó R3 y R4. Las Figuras III.1 y III.2 muestran el dispositivo experimental que se describe arriba (en el Anexo A.1 se presentan las dimensiones y descripción prolija de los sistemas).

Tabla III.1. Estratos del material de soporte en las columnas en estudio (Durán-de-Bazúa *et al.*, 1998; Fenoglio, 2002)

Diámetro granular (mm)	Grosor del estrato (cm)	Altura relativa a la parte inferior de la columna (mm)
4-8	20	110
0.5-4	60	90
4-8	10	30
12-16	20	20



Figura III.1. Reactores R1 (reactor de prueba alimentado con agua residual sintética y dotado con planta macrofita) y R2 (reactor testigo regado con agua residual sintética y sin planta macrofita).



Figura III.2. Reactores R3 y R4. El primero se refiere al reactor testigo regado con agua corriente y dotado con planta macrofita y el segundo se refiere al reactor testigo regado con agua corriente y sin planta macrofita.

Puesto que se va a evaluar el papel que tiene el oxígeno producido por la fotosíntesis de las plantas, las columnas tienen una tapa plástica de color negro en la parte superior, para evitar al máximo el paso del oxígeno atmosférico hacia la zona de la raíz. Presenta un orificio por el que pasa la planta, para los reactores que la tienen. Los reactores control, sin planta, están totalmente sellados al paso del aire. También presentan un orificio para introducir la alimentación del agua.

Cada reactor tenía colocados tres electrodos de potencial redox (Cu/CuSO₄-Pt), contruidos siguiendo la metodología propuesta por Fenoglio *et al.* (2002). Su posición en el reactor es a tres diferentes niveles con respecto de la parte superior de la columna (A=2, B=10 y C=30 cm, respectivamente), para evaluar los potenciales de óxido-reducción de la zona superior del reactor, de la zona intermedia y de la zona inferior. Las mediciones se realizaron manualmente con un multímetro digital modelo 390A de BK PRECISION. Esto se hace de forma intermitente y los datos son descargados a una computadora personal y almacenados para su posterior análisis.

Los reactores se fueron colocados en un cuarto a temperatura pseudo-controlada ($T_{amb} = 28 \pm 2^\circ C$). Una ventaja es que no hay variaciones térmicas para la macrofitas y los sistemas radiculares. Una desventaja es que hay una alta tasa de evapotranspiración y una rápida descomposición del agua residual sintética ya que ésta no se encuentra refrigerada. Para contrarrestar un poco este inconveniente se decidió mantener una alta humedad relativa en el sitio de trabajo, durante el mayor tiempo posible. Las mediciones que se hicieron de humedad relativa, durante dos semanas, arrojaron un valor promedio del 85%.

III.2 ALIMENTACIÓN DE AGUA

Como sustrato se utilizó un agua sintética que contiene una relación C:N:P de 15:1:0.1, con una concentración, medida como DQO_T, de 800 mg/L. La Tabla III.2 presenta la composición del agua residual sintética, misma que se diluye en 20 L de agua (y que son para 24 horas de alimentación). El régimen de alimentación fue de 1.67 L/h aproximadamente, que se alimentaban en forma continua por gravedad, lo que daba un tiempo de residencia hidráulico de 12 horas. Los experimentos con este tiempo de residencia se realizaron hasta alcanzar la estabilidad, la cual se consideró cuando el valor de remoción de DQO_T tenga variaciones de $\pm 10\%$ en un lapso de 2 semanas. Se emplean las metodologías propuestas por la APHA (1992) para evaluar la degradación del agua residual sintética (como demanda química de oxígeno total, como sólidos disueltos totales y como conductividad eléctrica). Se verificó la evapotranspiración cada vez que se corroboró la rapidez de alimentación (midiendo volúmenes de entrada y salida en el mismo lapso). Se midieron valores de pH a la entrada y la salida de los reactores con un potenciómetro digital modelo 390A de BK PRECISION y se mide la temperatura del influente y el efluente con un termómetro de mercurio SAMA CT20, así como la temperatura del cuarto donde están colocados los reactores.

Sólo dos de las columnas (una con planta y la otra control, sin ella) fueron regadas con el agua residual sintética. Las otras dos se regaban con agua corriente (una con planta y la otra sin ella) para que funcionaran también como un control.

La determinación de la materia orgánica presente, medida como DQO_T, se realizó dos veces por semana y se midieron, además, valor de pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (SDT) y temperatura promedio, empleando un sistema de campo marca Corning.

Tabla III.2. Composición del agua residual sintética (Fenoglio *et al.*, 2002)

Componente	Cantidad (g)	Concentración (mg/L)
Sacarosa (C)	16	800
Sulfato de amonio (N)	1.06	52.5
Fosfato de sodio (P)	0.1	5
Relación C:N:P	n.d.	15:1:0.1
Demanda química de oxígeno total, mg DQO _T /L	n.d.	≈800

n.d., no determinada

III.3 PRESENCIA DE LUZ UV

Para simular los períodos iluminados y sin iluminación solar, de 12 horas cada uno, se encendían y apagaban quince lámparas fluorescentes colocadas sobre las columnas mediante el uso de un controlador de tiempo, en el tiempo indicado (7 A.M., encendido y 7 P.M., apagado).

La irradianza emitida por las lámparas fue medida con un piranómetro (también conocido como solarímetro o radiómetro). Las lámparas fueron colocadas sobre un soporte que las ubica a diferentes alturas. El piranómetro se ubica debajo de ellas y envía una señal de diferencia de potencial (en μV) que es traducida a la medida de irradianza mediante una constante del equipo utilizado: $4.6 \mu\text{W}^{-1}\text{m}^{-2}$. Haciendo el cálculo correspondiente se obtuvo un valor de irradianza en Wm^{-2} . Se realizaron mediciones durante una hora a la altura equivalente a la que tienen las lámparas con respecto a la parte superior de los reactores (0.65 m). El sitio de trabajo debe estar totalmente oscuro para obtener mejores resultados. Los datos obtenidos fueron enviados a una unidad de adquisición de datos y de aquí a una computadora personal (Muhlia, 2002).

III.4 TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRÁULICA (TRH)

La fase experimental se dividió en dos partes, la primera incluyó el montaje, la aclimatación y la operación del sistema a un TRH de 12 horas hasta la estabilización del mismo, todo lo cual se llevó un período de 20 semanas.

La segunda parte se operó el sistema bajo un TRH de 24 horas, por un lapso de tiempo de 10 semanas; tiempo durante el cual alcanzó la estabilidad.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Dado que el sistema experimental fue instalado en un cuarto caliente con temperatura relativamente estable, fue necesario introducir una hielera para que el agua residual sintética de alimentación se conservara por más tiempo en buenas condiciones (sin descomponerse), cuando se trabajó con un TRH de 24 horas.

III.5 CONSTRUCCIÓN DE LOS ELECTRODOS

Los electrodos mencionados en el apartado anterior fueron construidos y calibrados como especifican Fenoglio *et al.* (2002). La metodología de construcción y calibración puede verse en el Anexo A.1 de este documento.

III.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se realizó el cálculo de promedios semanales, de rangos, de desviaciones estándar y de estadísticos "F" de las mediciones de diferencia de potencial, con la finalidad de poder decir en qué momento se estabilizaron los electrodos de cada uno de los reactores del sistema experimental.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV.1 CALIBRACIÓN DE LOS ELECTRODOS DE REFERENCIA

En la Tabla IV.1 pueden apreciarse los resultados obtenidos de la calibración de los electrodos de referencia (Cu-CuSO_4) respecto de un electrodo comercial; en este caso se trató de un electrodo de calomelanos ($\text{Hg/Hg}_2\text{Cl}_2$) saturado.

Tabla IV.1 Mediciones obtenidas durante la calibración de los electrodos de referencia fabricados en el laboratorio

ELECTRODO	Lectura 1 (mV)	Lectura 2 (mV)	PROMEDIO	DESV. EST.
1	69	66	67.5	2.1213
2	68	72	70	2.8284
3	68	74	71	4.2426
4	67	72	69.5	3.5355
5	67	66	66.5	0.7071
6	70	73	71.5	2.1213
7	73	76	74.5	2.1213
8	69	71	70	1.4142
9	67	70	68.5	2.1213
10	73	70	71.5	2.1213
11	72	67	69.5	3.5355
12	74	70	72	2.8284

IV.2 MEDICIONES DE IRRADIANZA

Se midió la irradianza emitida por dos de las lámparas que se tienen con las plantas y se obtuvo un valor promedio de 1.38 Wm^{-2} , y considerando las 15 lámparas que se tienen en el laboratorio, hace un total de 20.6 Wm^{-2} . El valor anterior es comparable al valor que representa la irradianza solar emitida al amanecer (Muhlía, 2002). Esta irradiación se mantuvo constante a lo largo de todos los experimentos.

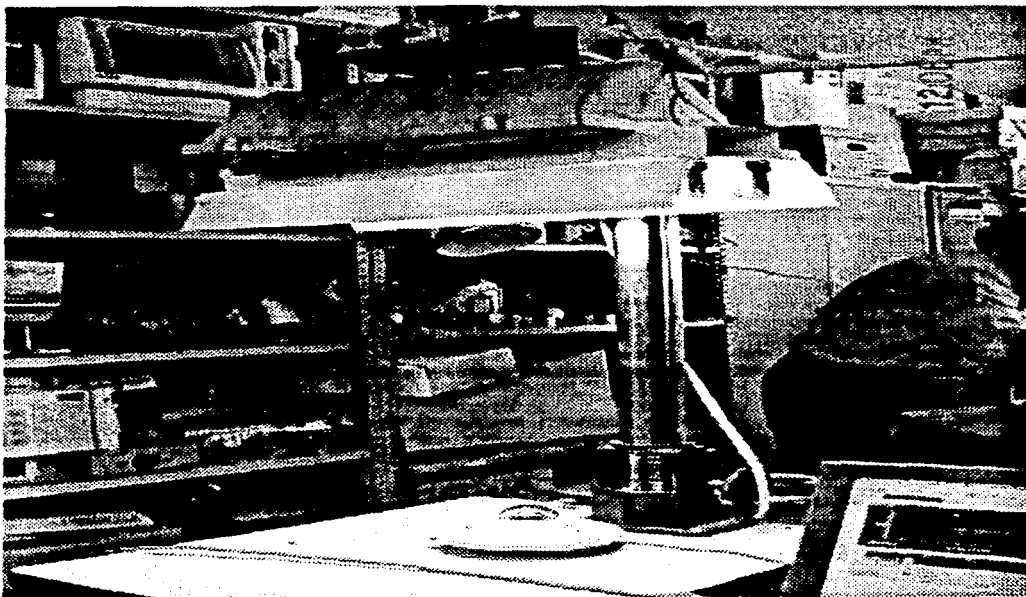


Figura IV.1. Dispositivo de medición de la irradianza emitida por dos de las lámparas utilizadas en la fase experimental.

IV.3 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

Como se comentó en el capítulo anterior, la fase experimental del presente trabajo fue dividida en dos partes. La primera incluyó el montaje, aclimatación de las plantas y estabilización de los reactores operando a un tiempo de residencia hidráulico (TRH) de 12 horas. La segunda parte se abocó únicamente a la operación del sistema a un TRH de 24 horas. Las Figuras IV-2 a IV-5 presentan las tendencias observadas en lo que se refiere al análisis fisicoquímico.

La DQO_T inicial para los reactores que reciben agua residual sintética es de $800 \pm 10 \text{ mgL}^{-1}$ y las remociones observadas durante la primera fase experimental (TRH=12 horas) son de 27% a 36% en el reactor de prueba R1 (con planta y regado con agua residual sintética), y de 5% a 22% en el testigo sin planta (denominado R2). Estos resultados coinciden con lo esperado de los sistemas en estudio, ya que la planta está "ayudando" a degradar el material orgánico presente en el agua de alimentación a R1 y R2.

La etapa de estabilidad se ha alcanzado ya en la última parte de la primera fase experimental, como puede observarse de la Figura IV-2. Considerando que hay solamente una planta, la eficiencia alcanzada es razonable, ya que en un sistema similar, a escala prototipo se alcanza a condiciones climáticas de invierno entre 85 y 95% de eficiencia de depuración, medida como DQO_T , usando agua residual real de tipo sanitario (Rodríguez y Varela, 2003).

Los resultados observados durante el segundo período de experimentación se pueden apreciar en la misma figura (Figura IV-2). Las eficiencias de remoción se mantienen relativamente constantes y no hay cambios drásticos en éstas con respecto a las que se obtuvieron en la etapa anterior.

La eficiencia de remoción del sistema con planta fue de 30% que, con respecto al que no la tenía, que fue de 24%, indica una diferencia significativa. Es decir, sí hay una contribución del oxígeno fotosintético en el sistema y, por tanto, mejora la degradación de la materia orgánica presente en el agua residual sintética.

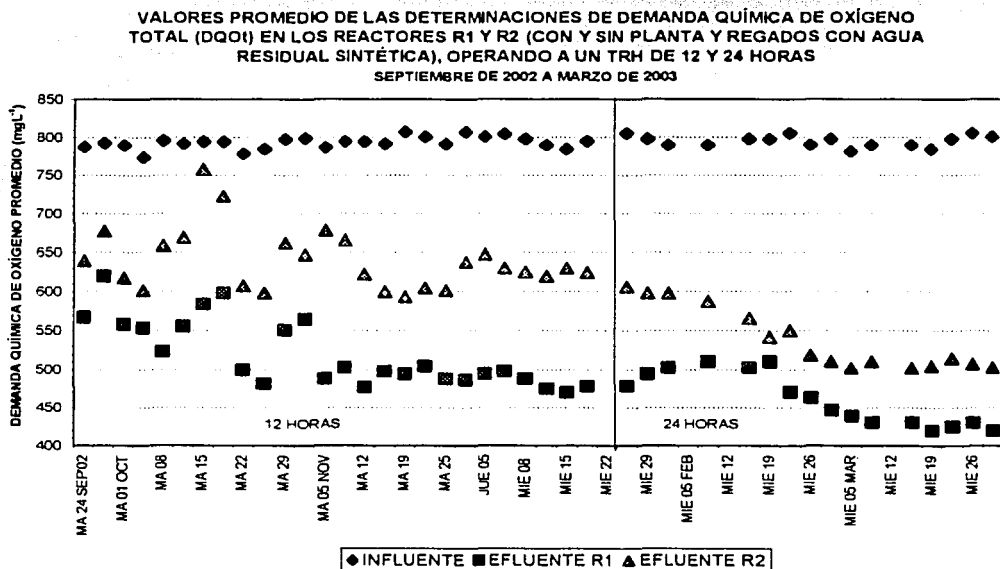


Figura IV-2. Resultados de las mediciones de demanda química de oxígeno total (DQO_T) realizadas a las muestras de los reactores R1 y R2 (con y sin planta y regados con agua residual sintética)

Durante la primera etapa de experimentación, la conductividad eléctrica a la entrada es de 4800 a 5200 μScm^{-1} , saliendo entre 3800 y 4200 de R1 (con planta y regado con agua residual sintética) y entre 4000 y 4800 de R2, reactor sin planta y regado con agua residual sintética (Figura IV-3).

Lo anterior confirma lo que se observa con el comportamiento de la DQO_T , es decir, que está habiendo una mayor remoción del material presente en el agua residual de entrada, cuando ésta pasa por el reactor con planta (R1), que cuando pasa por el reactor sin ésta (R2). Tiene una tendencia decreciente, que indica que el material inerte está reduciendo ya su lixiviación en el agua residual y que los sistemas siguen esa tendencia.

En lo que se refiere al segundo período de experimentación ($\text{TRH}=24$ horas), en la Figura IV-3, se puede observar una clara tendencia a la estabilidad del sistema. Los valores que se obtuvieron coinciden en su comportamiento con el observado en las tendencias de la DQO_T . Los valores de entrada siguieron manteniéndose en el mismo intervalo de los valores de la primera etapa. Por otro lado, los valores de conductividad eléctrica a la salida del sistema, van de 3000 a 2590 μScm^{-1} .

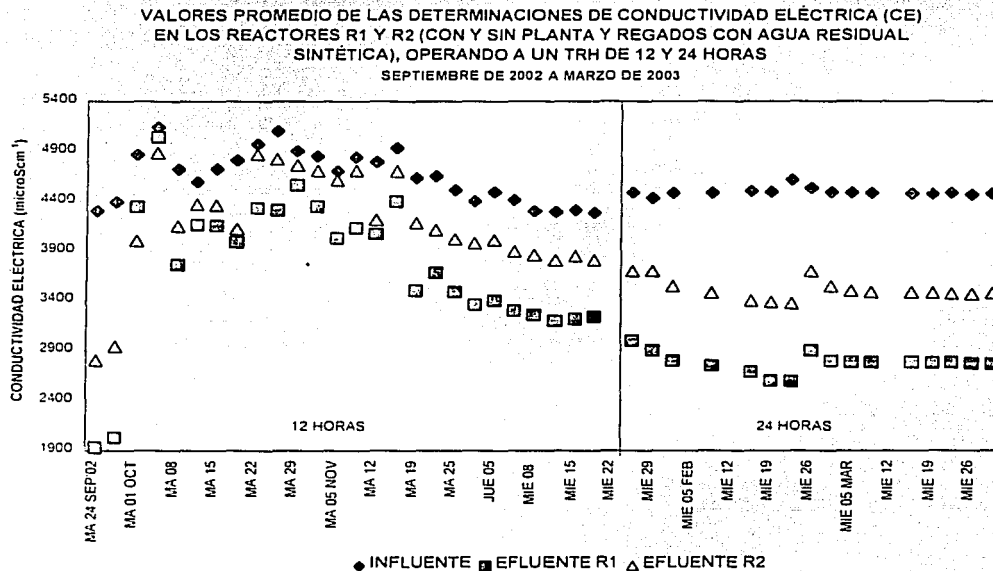


Figura IV-3. Resultados de las mediciones de conductividad eléctrica (CE) realizadas a las muestras de los reactores R1 y R2 (con y sin planta y regados con agua residual sintética)

Los sólidos disueltos totales a la entrada están entre 2300 y 2500 mgL^{-1} , saliendo de R1 entre 1400 mgL^{-1} y 1800 mgL^{-1} (durante la fase estable) y de R2 entre 1700 mgL^{-1} y 2000 mgL^{-1} (Figura IV-4). Esto se interpreta también de la misma manera que la conductividad eléctrica e indica que si hay mayor remoción de contaminantes en el reactor que tiene la planta (R1), que en el que no la tiene (R2).

VALORES PROMEDIO DE LAS DETERMINACIONES DE SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (SDT) EN LOS REACTORES R1 Y R2 (CON Y SIN PLANTA Y REGADOS CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA), OPERANDO A UN TRH DE 12 Y 24 HORAS
SEPTIEMBRE DE 2002 A MARZO DE 2003

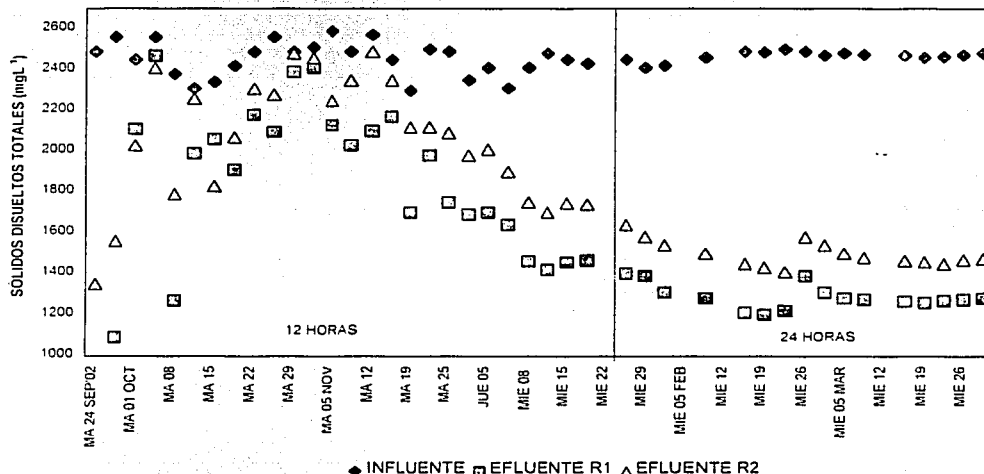


Figura IV-4. Resultados de las mediciones de sólidos totales disueltos (SDT) realizadas a las muestras de los reactores R1 y R2 (con y sin planta y regados con agua residual sintética)

Para el caso de la segunda etapa experimental (TRH=24 horas), se obtuvieron las mismas tendencias que las observadas en el comportamiento de la conductividad eléctrica (ver Figura IV-4). Los valores medidos a la salida de los reactores van de 1200 mgL^{-1} a 1400 mgL^{-1} , en R1 (reactor con planta y regado con agua residual sintética) y de 1400 mgL^{-1} a 1600 mgL^{-1} , en R2 (reactor sin planta y regado con agua residual sintética). Los valores de inicio, permanecieron en el mismo intervalo que el manejo en la etapa anterior.

Durante la primera fase experimental (TRH=12 horas), el valor del pH se mantiene entre 7 y 8 en el influente, mientras que sale entre 5.5 y 6 del reactor de prueba (R1); y entre 4.5 y 5.5 del testigo con planta (Figura IV-5). Esto se debe probablemente a la presencia de bacterias anaerobias en el reactor R2, ya que al no recibir oxígeno fotosintético generan ácidos orgánicos que acidifican el medio. Puede verse que el sistema que es "oxigenado" fotosintéticamente tiende a aumentar su valor de pH en el agua de salida.

En la segunda etapa experimental (TRH=24 horas), los valores de pH a la salida de R1 (reactor con planta y regado con agua residual sintética) van de 6.5 a 7, es decir es un efluente poco ácido; mientras que en R2 (reactor sin planta y regado con agua residual sintética) los valores son más bajos, van de 5.1 a 5.9, la acidificación del medio es mayor.

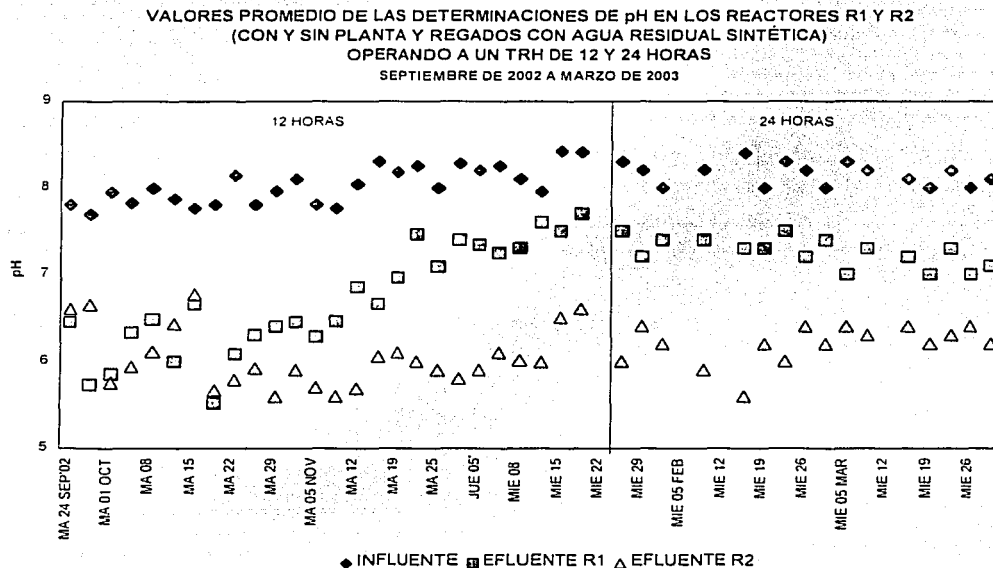


Figura IV-5. Resultados de las mediciones de pH realizadas a las muestras de los reactores R1 y R2 (con y sin planta y regados con agua residual sintética)

IV.4 DIFERENCIAS DE POTENCIAL

Como ya se ha comentado, los reactores del dispositivo experimental fueron identificados de la siguiente forma: R1, reactor de prueba, con planta y regado con agua residual sintética. R2, reactor testigo, regado con agua residual sintética y sin planta. R3, reactor testigo, regado con agua corriente y con planta. R4, reactor testigo, regado con agua corriente y sin planta. Del mismo modo, los electrodos presentes en los reactores fueron identificados como electrodo A, el superficial, a 2 cm de la superficie; electrodo B, el intermedio, a 10 cm de la misma y electrodo C, a 30 cm del límite superior, casi esta en el fondo del reactor.

En el Anexo A.3.3 de éste documento se pueden apreciar con detalle los valores de diferencia de potencial obtenidos de las mediciones hechas a las 7:00, 9:00, 11:00, 13:00; 15:00; 17:00 y 19:00 horas en los cuatro reactores (R1, R2, R3 y R4), operando a dos TRH, de 12 y de 24 horas. Estos resultados fueron graficados y tabulados en las Figuras A.3.3.1 a A.3.3.56 y Tablas A.3.3.1 a A.3.3.8, respectivamente.

La Figura IV-6 presenta un resumen de los datos obtenidos en los electrodos superficiales de los reactores durante las fases estables de ambas etapas experimentales (TRH de 12 y de 24 horas).

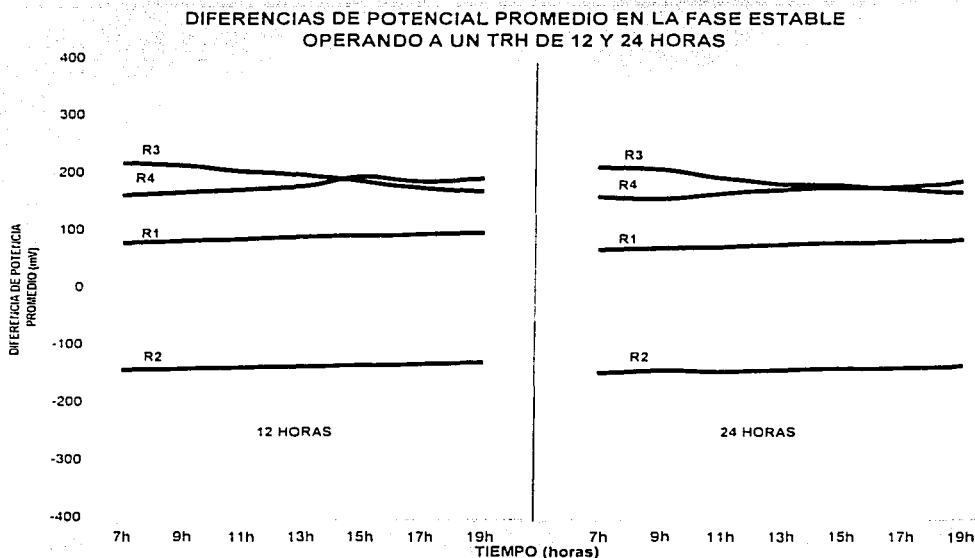


Figura IV-6. Comparación de los electrodos A en los reactores R1, R2, R3 y R4, operando en la fase estable, a un TRH de 12 y 24 horas.

Analizando el comportamiento del reactor R1 (con planta y regado con agua residual sintética), se puede observar que los valores de diferencia de potencial en el agua de entrada son menos positivos que los valores obtenidos del electrodo A (Figura IV-6), lo que se explica por la presencia de la planta en la zona en donde se colocó el electrodo A. Es decir, es una zona menos anaerobia. También puede verse que el electrodo B (a 10 cm de la superficie, ver Figura IV-7) tiene valores más negativos que el electrodo C (a 30 cm de la superficie, ver Figura IV-8). Esto es posible que se deba a la presencia de una comunidad microbiana aerobia que utiliza el poco oxígeno presente para llevar a cabo sus procesos metabólicos.

En la Figura IV-6 se pueden apreciar los valores de diferencia de potencial obtenidos en los electrodos superficiales (a 2 cm de la superficie) de cada uno de los reactores en estudio (el de prueba y los tres testigos). Sólo uno de los electrodos dio lecturas negativas; éste fue el electrodo del reactor R2 (testigo sin planta y regado con agua residual sintética), es decir que el ambiente en este sitio fue anaerobio. No había oxígeno disponible, más que el que se introducía disuelto en el agua de alimentación.

El resto de los electrodos dieron lecturas positivas. Es decir que el ambiente tenía condiciones aerobias. La zona superficial del reactor R3 resultó ser la más aerobia, lo cual se explica con la presencia de la planta y el hecho de que éste reactor fue regado con agua corriente (sin una carga orgánica presente para ser eliminada), de ahí que el reactor R1 (reactor de prueba, con planta y regado con agua residual sintética) fuese menos aerobio que el reactor R4 (reactor testigo, sin planta y regado con agua corriente). Ya que el oxígeno suministrado en el agua de alimentación y el generado por la fotosíntesis de la planta (en el caso del reactor R1), fue utilizado por la microfauna de la rizosfera para degradar la materia orgánica presente en el agua residual sintética; lo que no sucedió con el reactor R4, que sólo tenía presente el oxígeno disuelto en el agua alimentada (como se dijo arriba).

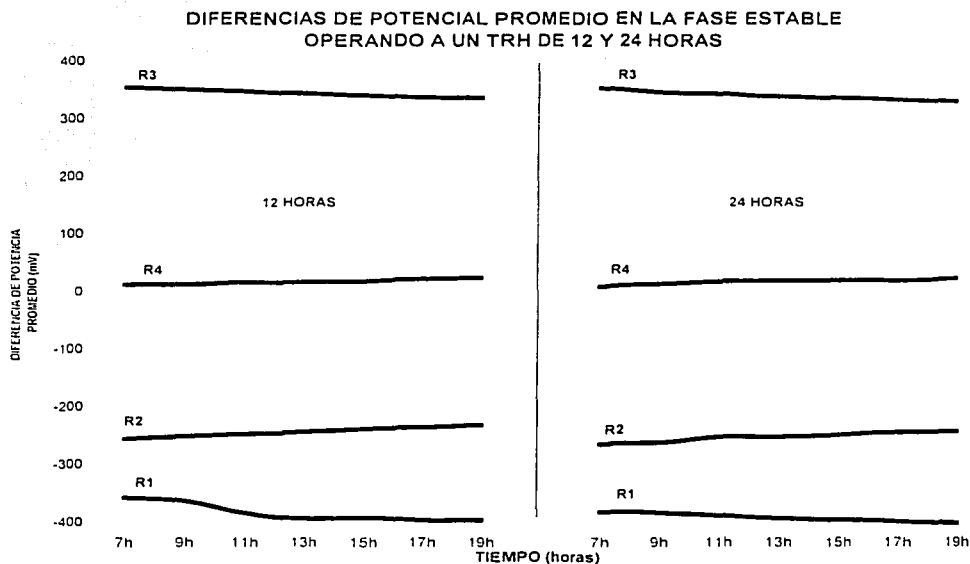


Figura IV-7 Comparación de los electrodos B en los reactores R1, R2, R3 y R4, operando en la fase estable, a un TRH de 12 y 24 horas.

Por otro lado, en la Figura IV-7 se observa el comportamiento del electrodo B (a 10 cm de la superficie). El electrodo B del reactor R3 sigue siendo el que presenta lecturas más positivas, indicando una mayor cantidad de oxígeno presente en la zona donde se localiza el mismo. A diferencia del electrodo A, del mismo reactor (R3), el reactor B indicó lecturas mucho más positivas que éste. Es decir que es más aerobia la zona intermedia que la superficial. Esto se puede deber a la generación de oxígeno fotosintético (en R3).

En el caso del electrodo B del reactor R4, se puede ver que presenta valores intermedios entre los reactores R3 y R2, los cuales disminuyeron hasta casi llegar a 0 mV. Esto indica que el poco oxígeno que llega al reactor disuelto en el agua de alimentación, es consumido por los microorganismos aerobios que se encuentren en la zona y, al no contar el reactor R4 con una planta que realice el proceso de fotosíntesis, no puede recuperarlo y, por lo tanto, disminuye con respecto a los valores presentados por el electrodo A (colocado 8 cm por arriba del electrodo B).

En la Figura IV-6 se vio que la zona del electrodo superficial del reactor R1 (electrodo A) fue más aerobia que la zona del electrodo A del reactor R2. En el caso de los electrodos intermedios (electrodos B), sucede al revés. La zona más negativa (sin oxígeno) es la zona del electrodo B del reactor R1. Esto puede deberse a la presencia de comunidades microbianas presentes en la zona de la raíz (en el reactor R1).

Es decir, que la zona intermedia de la columna es la que presenta condiciones aerobias. Esto se debe a la presencia de la planta, ya que el testigo regado con agua corriente y sin planta, presenta lecturas de diferencia de potencial bien definidas: Valores altos en el electrodo superficial (A) que van disminuyendo hacia abajo (electrodos B y C, respectivamente). Es decir que la zona superficial es totalmente aerobia y disminuye la presencia del oxígeno conforme se avanza hacia abajo en la columna. Se trata pues, del reactor más aerobio de los cuatro reactores que integran el sistema experimental.

Para el caso de la segunda etapa (TRH=24 h), se observa que el electrodo A, del reactor R1, (a 2 cm de la superficie) tiende a estabilizarse en valores menos positivos que los alcanzados en la primera fase experimental. Esto puede explicarse porque la cantidad de oxígeno disuelto en el agua residual sintética de alimentación es menor, dado que se alimenta la mitad del agua que se alimentaba en la primera etapa.

Si el TRH aumenta, entonces se cuenta con más tiempo para degradar la misma cantidad de materia orgánica (800 mgL^{-1}), de este modo se requiere más oxígeno (del que se encuentra disuelto en el agua residual sintética y del producido por la fotosíntesis de la planta) y, es por esto que, los valores de los diferenciales de potencial en el electrodo A disminuyen con respecto a los valores obtenidos en la primera etapa de experimentación.

Dado lo anterior, se observa el mismo comportamiento para los electrodos B y C (a 10 y 30 cm de la superficie, respectivamente), ya que hay más tiempo para consumir el oxígeno presente en el sistema (Figuras A.3.3.29 a A.3.3.35).

El comportamiento de los electrodos del fondo (electrodos C) puede apreciarse en la Figura IV-8. Se corrobora que la zona del fondo de los reactores es la zona más anaerobia de todas las zonas estudiadas. Los valores de las diferencias de potencial son negativos en su totalidad, no hay valores por encima de los 0 mV.

También se observa en el comportamiento la misma tendencia que se apreció en el comportamiento de los electrodos A (superficiales) de los cuatro reactores. Aunque es interesante notar que los valores del electrodo C del reactor R1 y los del electrodo C del reactor R2, son casi los mismos. Además de que conforme avanza el tiempo (a lo largo del día) los valores del potencial se tornan más negativos; conforme van generándose ácidos orgánicos (Manahan, 2000).

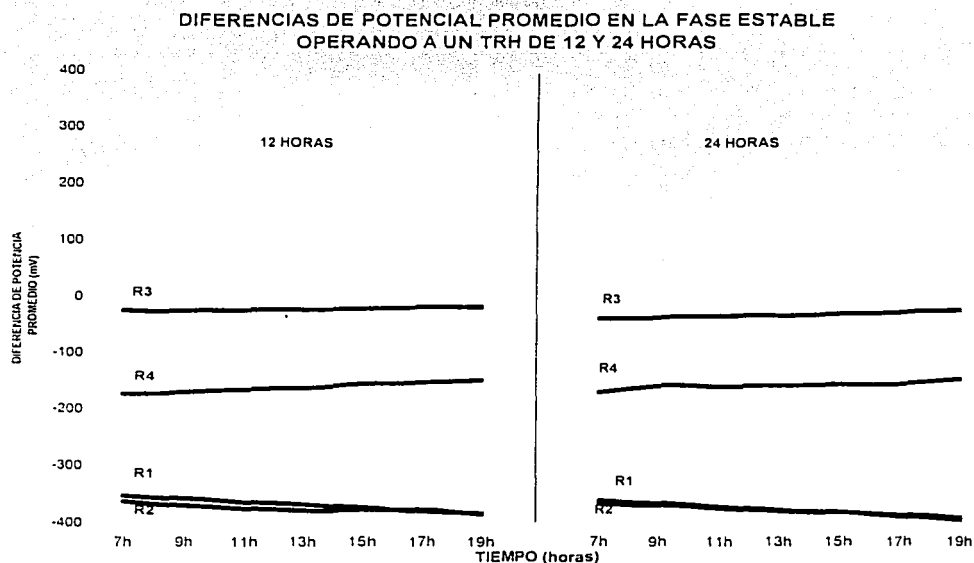


Figura IV-8. Comparación de los electrodos C en los reactores R1, R2, R3 y R4, operando en la fase estable, a un TRH de 12 y 24 horas.

También es posible observar que los valores de las diferencias de potencial aumentan conforme aumentan las horas del día. Los valores positivos del electrodo A se hacen más positivos y los valores negativos de los electrodos B y C, se vuelven más negativos (Figuras A.3.3.1 a A.3.3.7).

Los reactores alcanzaron la fase estable, en ambas etapas de experimentación, cuando las lecturas de las diferencias de potencial comenzaron a ser reproducibles. Esto ocurrió, según el análisis estadístico expuesto en el anexo correspondiente, a las 13 semanas, para el tiempo de residencia de 12 horas y las 21 semanas para el tiempo de residencia de 24 horas, en promedio. Esto es contando desde el inicio, pero si se considera desde el cambio de tiempo de residencia (de 12 a 24 horas), se llegó a la estabilización en la primera semana de la segunda etapa.

Se pudo observar que el cambio de TRH en la operación de los sistemas no mejoró significativamente el desempeño de los mismos. Esto podría significar que el período de oscuridad (de 19:00 horas a 7:00 horas) no está afectando la eficiencia de remoción, que sería una medida indirecta del efecto del oxígeno fotosintético. Esto obviamente debe corroborarse realizando mediciones en el período de oscuridad lo que será la continuación de esta investigación.

Se puede decir que el cambio de TRH en la operación de los sistemas no mejoró significativamente el desempeño de los mismos. Esto podría significar que el período de oscuridad (de 19:00 horas a 7:00 horas) no está afectando la eficiencia de remoción, que sería una medida indirecta del efecto del oxígeno fotosintético.

Durante la realización de la fase experimental, se tuvieron algunos problemas con la aclimatación de las plantas en un ambiente caliente, seco y cerrado, pero se solucionó manteniendo en forma permanente el espacio en donde se localizaba el sistema experimental con una humedad relativamente alta. De este modo, la humedad relativa del ambiente se incrementó hasta un 85% en promedio.

También se tuvieron algunos inconvenientes con el estado óptimo de las plantas, ya que éstas tienden a plagarse fácilmente con pulgones. Por lo anterior, las hojas de las plantas tenían que ser lavadas con agua jabonosa (poco jabón) en forma periódica.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

V. 1 CONCLUSIONES

De las investigaciones realizadas se puede concluir lo siguiente:

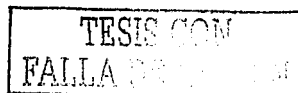
1. Si hay una contribución importante de oxígeno fotosintético en el sistema, lo cual, mejora la degradación de la materia orgánica presente en el agua residual sintética.
2. El cambio de TRH en la operación de los sistemas no mejoró significativamente el desempeño de los mismos.

V.2 RECOMENDACIONES

Es necesario hacer la determinación del perfil de comportamiento de las diferencias de potencial durante la noche, para llegar a un modelo que represente el comportamiento del oxígeno fotosintético en el humedal.

Si se desean continuar los experimentos, debe ponerse especial cuidado en la humedad del ambiente en donde se encuentre el sistema.

También es recomendable usar otra macrofita menos susceptible a las plagas, para continuar con la experimentación. Éstas pueden ser carrizos (*Phragmites sp*). Se ha observado en los humedales prototipo de la UNAM, que son más adaptables al clima y la fauna (plagas) de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Rodríguez-Monroy, 2003; Rodríguez y Varela, 2003).



ANEXOS

A. 1 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

A.1.1 CONSTRUCCIÓN DE LAS COLUMNAS EMPACADAS

Para la construcción de las tuberías se utilizó tubería de PVC, de 30 cm de diámetro y 60 cm de longitud. En la parte inferior se colocó un tubo, de PVC de 1.5 in de diámetro y 30 cm de largo, con perforaciones que ayuden al drenado del agua desde el interior de la columna. Cada columna fue empacada con escoria volcánica (tezontle rojo), de 0.5 – 4 mm de diámetro granular, previamente lavado y esterilizado. Aproximadamente las alturas de 2, 10 y 30 cm, con respecto a la superficie de las columnas, se colocaron trozos de manguera que permitieran tomar muestras de la columna en determinado momento. A estas mismas distancias fueron colocados los electrodos.

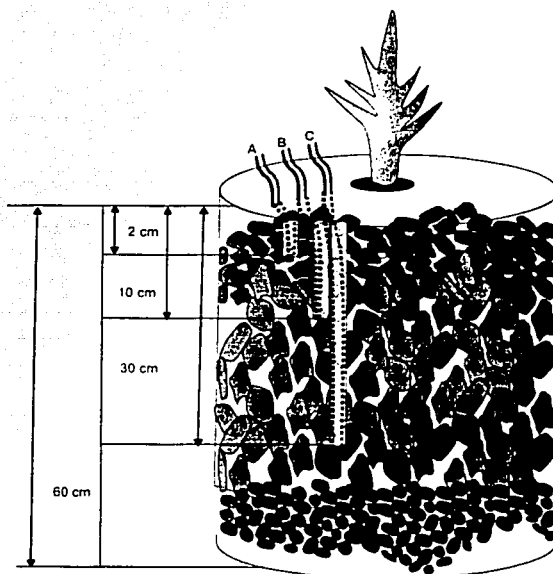


Figura A.1.1. Diagrama demostrativo de la ubicación de los electrodos en los reactores.

A.1.2 CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE ELECTRODOS

Los electrodos fueron construidos y calibrados como especifica Fenoglio (2003), en su tesis.

Aún cuando los electrodos de membrana proporcionan un método excelente para el análisis de oxígeno disuelto (OD) en aguas contaminadas (APHA, 1992), la experiencia en la utilización de estos electrodos, en esta prueba particularmente, es sumamente complicado, ya que para que la medición sea correcta, la lectura debe tomarse en un medio totalmente agitado. Por este motivo, el parámetro de medición es el potencial redox, para el cual los electrodos utilizados son de operación más simple y de costo mucho menor. Las lecturas se están realizando utilizando un electrodo para cada punto de muestreo propuesto, y se hace en forma intermitente (Fenoglio, 2003).

La construcción de los electrodos de referencia para potencial es relativamente sencilla; para ello se utiliza un tubo de plástico de 1 cm de diámetro, en uno de cuyos extremos se coloca una membrana de intercambio iónico (en este caso corcho o madera). El tubo se llena por el otro lado con una solución de sulfato de cobre saturada y se agregan cristales de la misma sal para asegurar la saturación del medio. Posteriormente, se coloca una lámina de cobre acoplada a un alambre de cobre. El alambre de cobre se hace pasar a través de un tapón de plástico, que a su vez se acopla al otro extremo del tubo plástico (Fenoglio, 2003).

Para la construcción del electrodo de medición se utiliza un trozo de alambre de platino conectado a un tramo de cable de cobre. Para evitar la interferencia en la lectura, la conexión entre el alambre de platino y el cable de cobre debe estar perfectamente aislada. Estos electrodos producen una señal en mV, de baja impedancia, que puede ser captada y medida por una interfase y alimentada a una computadora para su posterior análisis (Fenoglio, 2003).

Para la calibración de los electrodos se construyeron curvas de calibración de diferencia de potencial v.s. oxígeno disuelto y potencial v.s. pH, bajo las mismas condiciones de alimentación de las columnas, con el fin de determinar, de manera indirecta la concentración de OD en cada punto. Para establecer una relación directa entre el potencial redox leído con un electrodo Cu/CuSO₄ contra Pt y la lectura de OD utilizando un electrodo de membrana selectiva, en un vaso de precipitados de 400 mL, con agua destilada y desoxigenada por ebullición, se burbujea aire utilizando una bomba de acuario, por ejemplo, y se miden simultáneamente el potencial redox utilizando el electrodo de referencia mencionado y un electrodo de membrana selectiva, hasta obtener el máximo valor de OD. Posteriormente, se agrega bisulfito de sodio para retirar el oxígeno disuelto por burbujeo. Esto se hace hasta obtener una lectura en cero en el equipo de lectura de OD (Fenoglio, 2003).

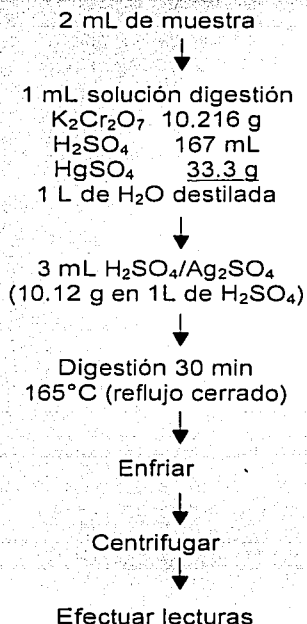
A.2 METODOLOGÍAS ANALÍTICAS

A.2.1 TÉCNICA DE DETERMINACIÓN DE DQO_T

La determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) se realizó mediante la aplicación de la técnica "micro", normalizada para su utilización en el laboratorio del Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental (PIQAYQA), de la Facultad de Química, UNAM (Oaxaca, 1997).

El diagrama de flujo correspondiente se presenta a continuación:

TÉCNICA "MICRO" PARA LA DETERMINACIÓN DE DQO_T



Aproximadamente se generan 6 mL de residuos peligrosos, por cada muestra analizada. La estabilización y disposición de estos, se puede más adelante.

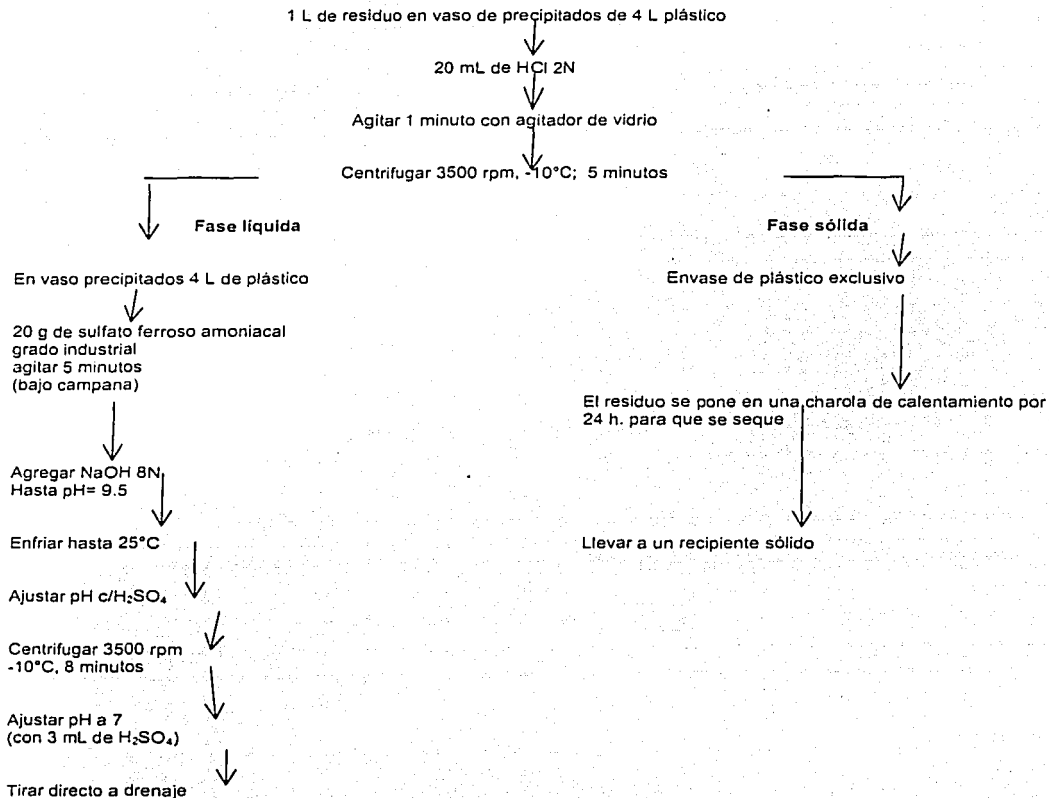
A.2.2 MEDICIÓN DE pH; TEMPERATURA; CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE), SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (SDT) Y DIFERENCIA DE POTENCIAL

La medición de pH, temperatura, CE y SDT, se realizó con un medidor portátil. Mientras que la diferencia de potencial se midió con un multímetro digital modelo 390A de la marca BK PRECISION.

A.2.3 ESTABILIZACIÓN Y DISPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS GENERADOS

La estabilización de los residuos peligrosos, generados durante la determinación de la DQO_T , se realizó mediante la técnica desarrollada en el PIQAYQA (Montuy, 1998) y cuyo diagrama de flujo se presenta a continuación.

ESTABILIZACIÓN DE RESIDUOS DE DQO



El proceso de estabilización de residuos peligrosos, no es una técnica que sea llevada a cabo con frecuencia, ya que los residuos generados en la determinación de la DQO son almacenados en un recipiente adecuado para ello y, después de un período de seis meses, son estabilizados. Al término de la estabilización, los productos obtenidos son recolectados por la Comisión de Seguridad de la Facultad de Química, bajo la supervisión del M.C. Eduardo Marambio Denett.

A.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES

A.3.1 MEDICIONES DE IRRADIANZA

Como se mencionó en el capítulo III de este documento, las mediciones de irradianza fueron realizadas en el Laboratorio de Radiación, del Centro de Ciencias de la Atmósfera, bajo la supervisión del Dr. Agustín Muhlia.

La medición se llevó a cabo utilizando un radiómetro (Quantum sensor, en inglés), modelo LI 190SB, de LI-COR. El equipo está diseñado para medir la radiación fotosintéticamente activa emitida por una fuente particular, misma que utilizan las plantas para llevar a cabo su proceso de fotosíntesis. Este equipo está acoplado a una unidad de adquisición de datos que registraba las lecturas obtenidas (en μV). Después con un factor de conversión y la constante del equipo ($4.6 \mu V/Wm^{-2}$), se obtuvieron los resultados de irradianza (en Wm^{-2}) que se pueden apreciar en la Tabla A.3.1.1



Figura A.3.1.1 Detalle del radiómetro con el que se hicieron las mediciones de irradianza.

A.3.2 ANÁLISIS FISICOQUÍMICO

A continuación se muestran los datos tabulados de los análisis fisicoquímicos realizados al influente y efluentes del sistema experimental.

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FISICOQUÍMICOS HECHOS AL AGUA RESIDUAL SINTÉTICA (INFLUENTE) Y A LOS EFLUENTES DE LOS REACTORES R1 Y R2

TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRAULICA DE 12 HORAS												
FECHA	DQO (mgL ⁻¹)			CE (mScm ⁻¹)			SDT (mgL ⁻¹)			pH		
	E	E-R1	E-R2	E	E-R1	E-R2	E	E-R1	E-R2	E	E-R1	E-R2
MA 24 SEP'02	788	567	639	4300	1930	2800	2490	907	1350	7.3	5.95	6.1
JUE 26	793	620	677	4390	2030	2940	2560	1090	1560	7.19	5.23	6.15
MA 01 OCT	790	558	617	4860	4340	4000	2450	2110	2030	7.45	5.36	5.26
JUE 03	774	554	601	5140	5040	4880	2560	2470	2410	7.32	5.83	5.44
MA 08	796	523	659	4720	3760	4150	2380	1270	1790	7.49	5.98	5.61
JUE 10	791	555	668	4590	4160	4370	2310	1990	2260	7.37	5.5	5.93
MA 15	795	584	758	4720	4150	4360	2340	2060	1830	7.26	6.16	6.27
JUE 17	795	598	723	4810	3990	4120	2420	1910	2070	7.3	5.02	5.17
MA 22	779	499	608	4970	4330	4870	2490	2190	2310	7.64	5.58	5.29
JUE 24	785	482	598	5100	4310	4820	2560	2095	2280	7.3	5.8	5.42
MA 29	798	550	662	4900	4560	4760	2490	2390	2480	7.46	5.9	5.1
JUE 31	799	565	648	4850	4350	4710	2510	2410	2460	7.6	5.95	5.4
MA 05 NOV	787	488	678	4700	4030	4610	2590	2130	2250	7.3	5.78	5.2
JUE 07	795	502	665	4840	4130	4710	2490	2030	2350	7.26	5.96	5.1
MA 12	795	477	622	4790	4070	4210	2570	2100	2490	7.54	6.35	5.19
JUE 14	791	498	600	4930	4400	4700	2450	2170	2350	7.8	6.15	5.55
MA 19	807	494	593	4630	3500	4180	2300	1700	2120	7.68	6.46	5.6
JUE 21	801	504	605	4650	3680	4110	2500	1980	2120	7.75	6.96	5.5
MA 25	791	488	601	4510	3490	4020	2490	1750	2090	7.5	6.59	5.4
MA 03 DIC	807	486	638	4400	3360	3980	2350	1690	1980	7.78	6.9	5.3
JUE 05	801	494	648	4490	3400	4010	2410	1700	2010	7.7	6.84	5.4
MA 10	804	498	630	4410	3300	3900	2310	1640	1900	7.75	6.75	5.6
MIE 08	798	488	625	4300	3260	3860	2410	1460	1750	7.6	6.8	5.51
VIE 10	790	475	620	4290	3200	3810	2480	1420	1700	7.45	7.1	5.49
MIE 15	785	470	630	4310	3220	3850	2450	1455	1745	7.92	7	6
VIE 17 ENE'03	795	478	625	4285	3240	3810	2430	1465	1740	7.91	7.2	6.1

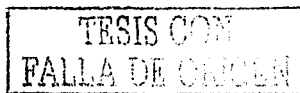
TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRAULICA DE 24 HORAS												
FECHA	DQO (mgL ⁻¹)			CE (mScm ⁻¹)			SDT (mgL ⁻¹)			pH		
	E	E-R1	E-R2	E	E-R1	E-R2	E	E-R1	E-R2	E	E-R1	E-R2
VIE 24 ENE 03	806	478	606	4465	3000	3700	2450	1400	1640	7.8	7	5.5
MIE 29	798	494	598	4430	2900	3700	2410	1390	1580	7.7	6.7	5.9
VIE 31 ENE	790	502	598	4480	2800	3550	2420	1310	1540	7.5	6.9	5.7
MIE 05 FEB												
VIE 07	790	510	587	4480	2750	3480	2460	1280	1500	7.7	6.9	5.4
MIE 12												
VIE 14	798	502	566	4500	2890	3400	2490	1210	1450	7.9	6.8	5.1
MIE 19	798	510	542	4490	2600	3390	2485	1200	1430	7.5	6.8	5.7
VIE 21	806	471	550	4610	2590	3375	2500	1220	1410	7.8	7	5.5
MIE 26	790	463	518	4530	2900	3700	2490	1390	1580	7.7	6.7	5.9
VIE 28 FEB	798	447	510	4490	2800	3550	2470	1310	1540	7.5	6.9	5.7
MIE 05 MAR	782	439	502	4485	2790	3500	2480	1280	1500	7.8	6.5	5.9
VIE 07	790	431	510	4480	2785	3490	2475	1275	1480	7.7	6.8	5.8
MIE 12												
VIE 14	790	431	502	4475	2790	3485	2470	1265	1465	7.6	6.7	5.9
MIE 19	785	420	505	4470	2780	3480	2460	1260	1460	7.5	6.5	5.7
VIE 21	798	425	515	4480	2784	3475	2465	1270	1450	7.7	6.8	5.8
MIE 26	805	430	507	4465	2775	3470	2473	1275	1470	7.5	6.5	5.9
VIE 28 MAR'03	801	420	503	4475	2770	3480	2480	1280	1475	7.6	6.6	5.7

E = Entrada

E-R1 = Salida reactor R1

E-R2 = Salida reactor R2

Tabla A.3.2.1 Resultados de los análisis fisicoquímicos realizados al influente y efluentes del dispositivo experimental



**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R1 (CON PLANTA Y
REGADO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA) - OPERANDO A UN TIEMPO DE
RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 12 HORAS**

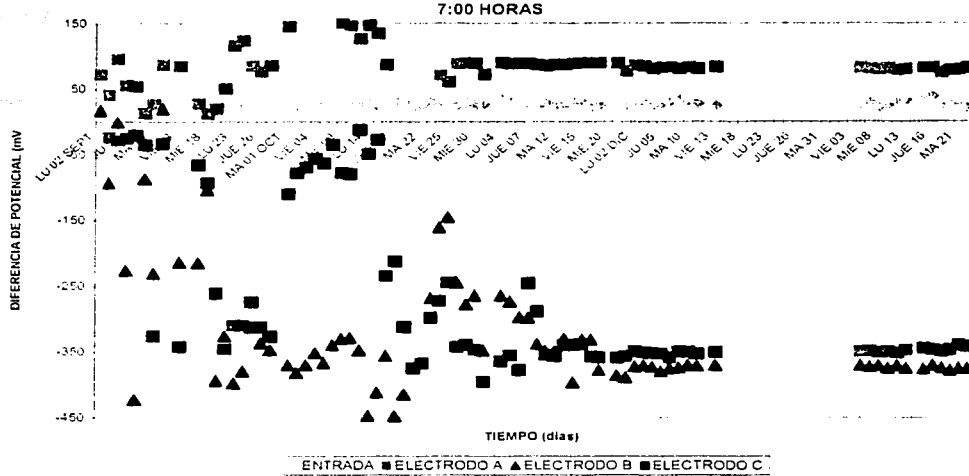


Figura A.3.3.1. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 7:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

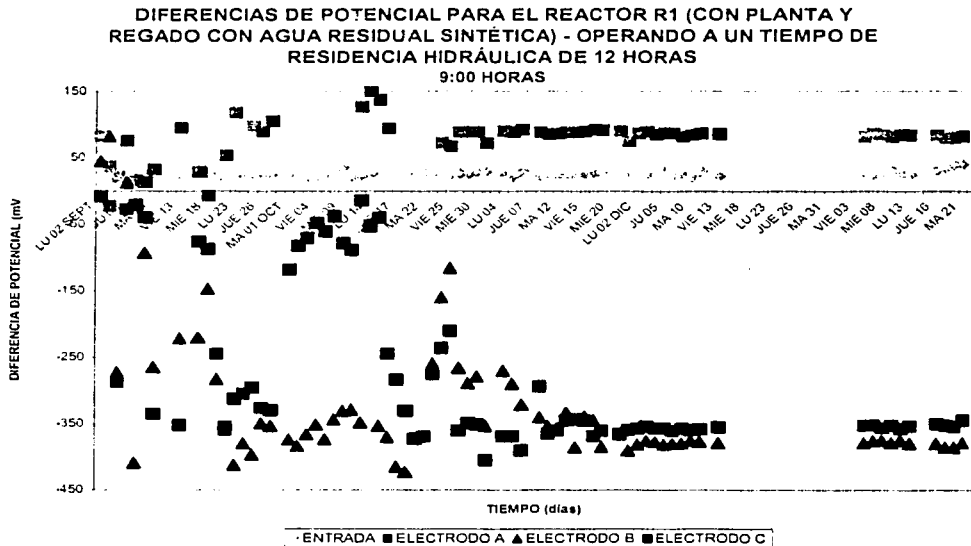


Figura A.3.3.2. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 9:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R1 (CON PLANTA Y
REGADO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA) - OPERANDO A UN TIEMPO DE
RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 12 HORAS**

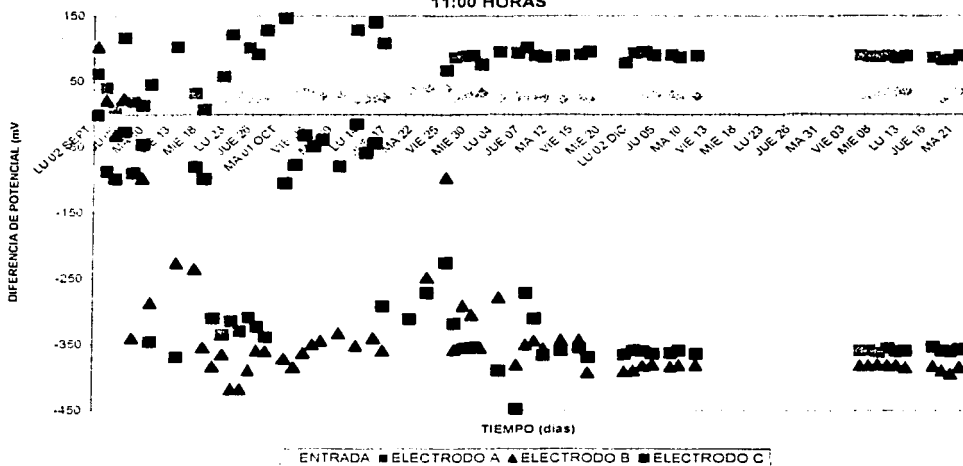


Figura A.3.3.3. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 11:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R1 (CON PLANTA Y
REGADO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA) - OPERANDO A UN TIEMPO DE
RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 12 HORAS**

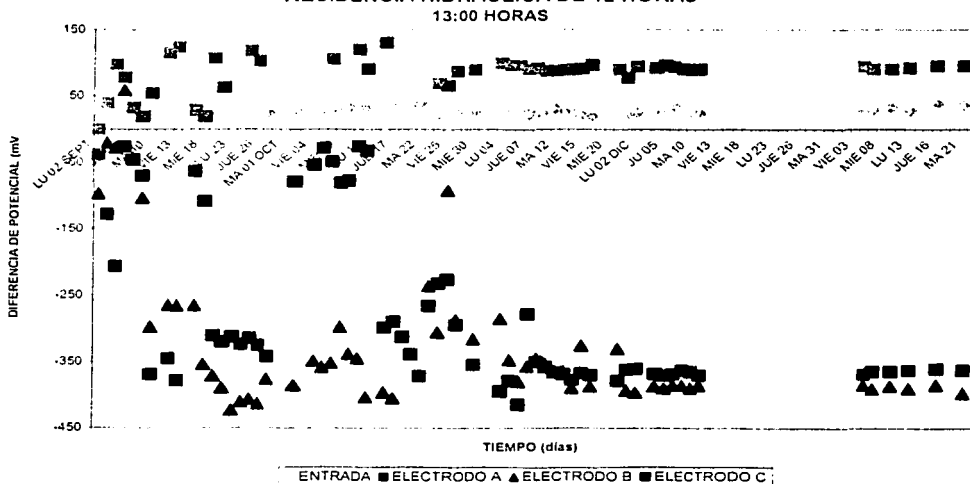


Figura A.3.3.4. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 13:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R1 (CON PLANTA Y
REGADO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA) - OPERANDO A UN TIEMPO DE
RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 12 HORAS
15:00 HORAS**

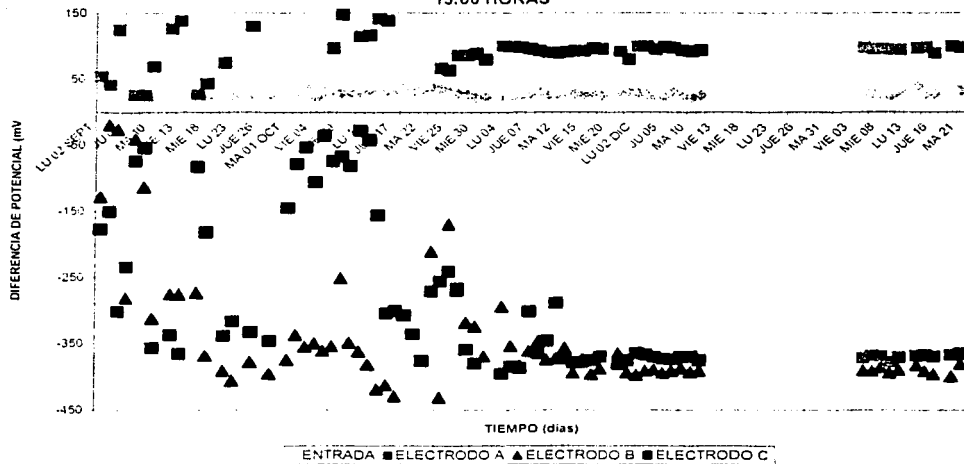


Figura A.3.3.5. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 15:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R1 (CON PLANTA Y
REGADO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA) - OPERANDO A UN TIEMPO DE
RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 12 HORAS
17:00 HORAS**

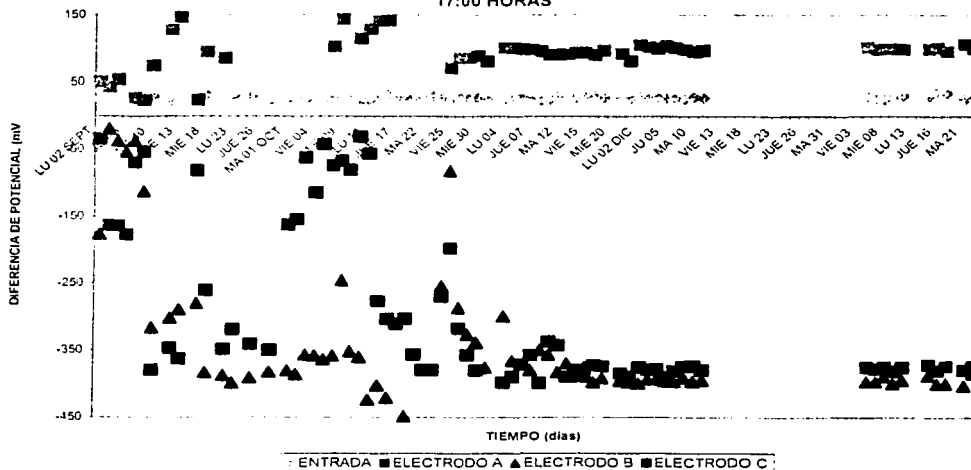
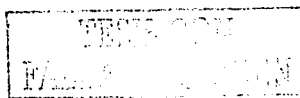


Figura A.3.3.6. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 17:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.



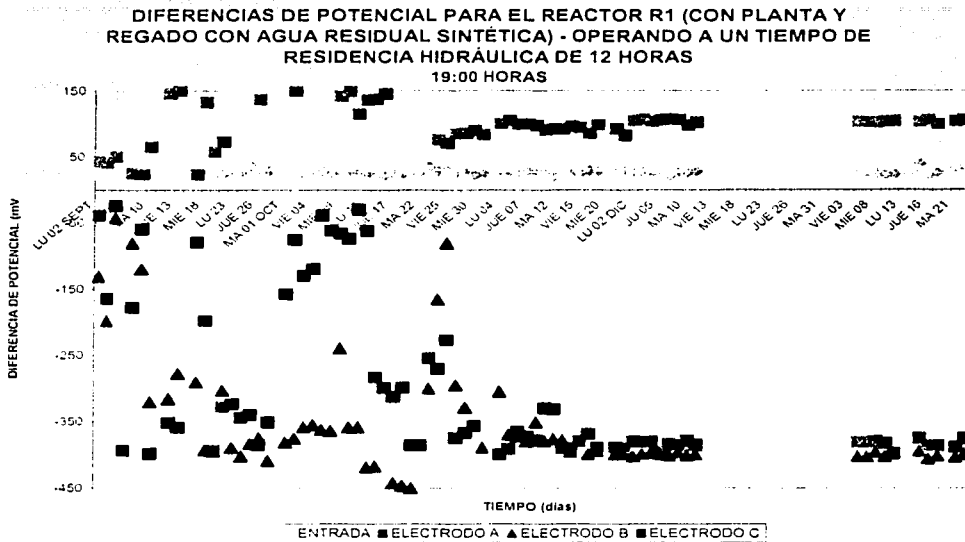


Figura A.3.3.7. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 19:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

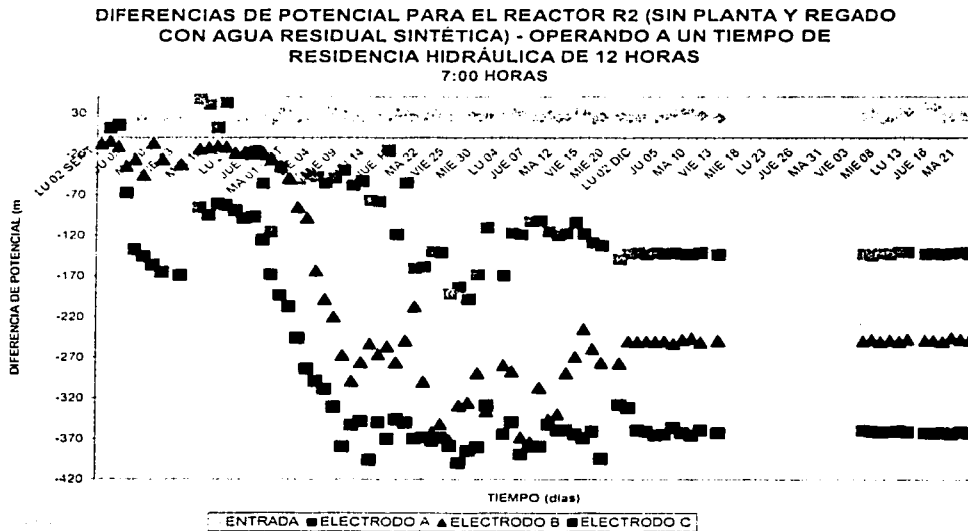


Figura A.3.3.8. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 7:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R2 (SIN PLANTA Y REGADO
CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA) - OPERANDO A UN TIEMPO DE
RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 12 HORAS
9:00 HORAS**

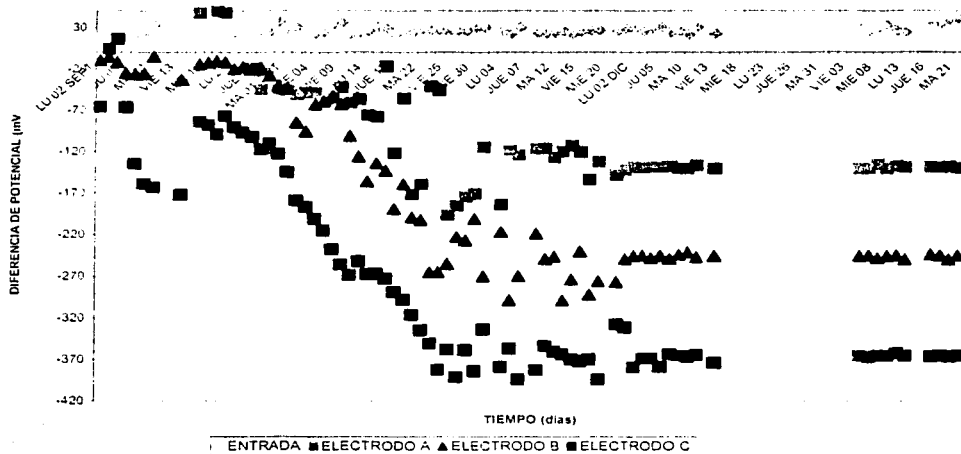


Figura A.3.3.9. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 9:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R2 (SIN PLANTA Y REGADO
CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA) - OPERANDO A UN TIEMPO DE
RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 12 HORAS
11:00 HORAS**

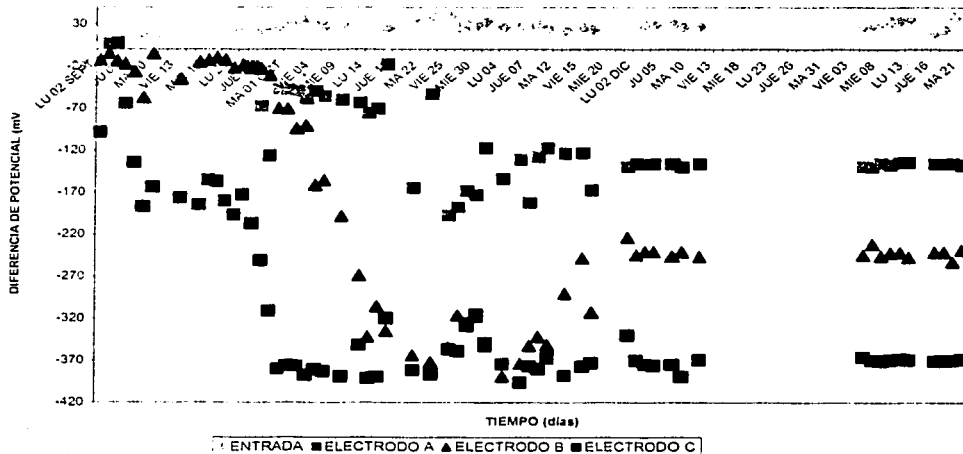


Figura A.3.3.10. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 11:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

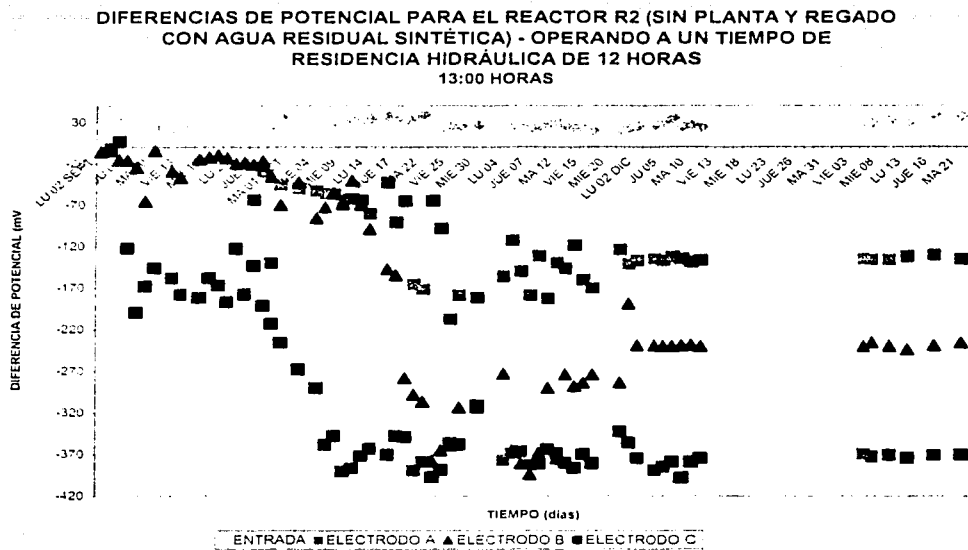


Figura A.3.3.11. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 13:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

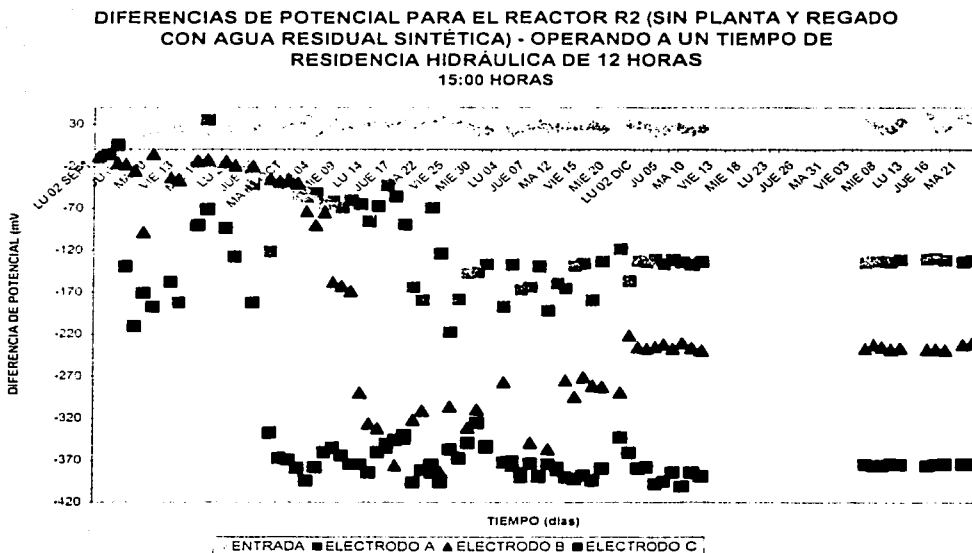


Figura A.3.3.12. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 15:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R2 (SIN PLANTA Y REGADO
CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA) - OPERANDO A UN TIEMPO DE
RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 12 HORAS
17:00 HORAS**

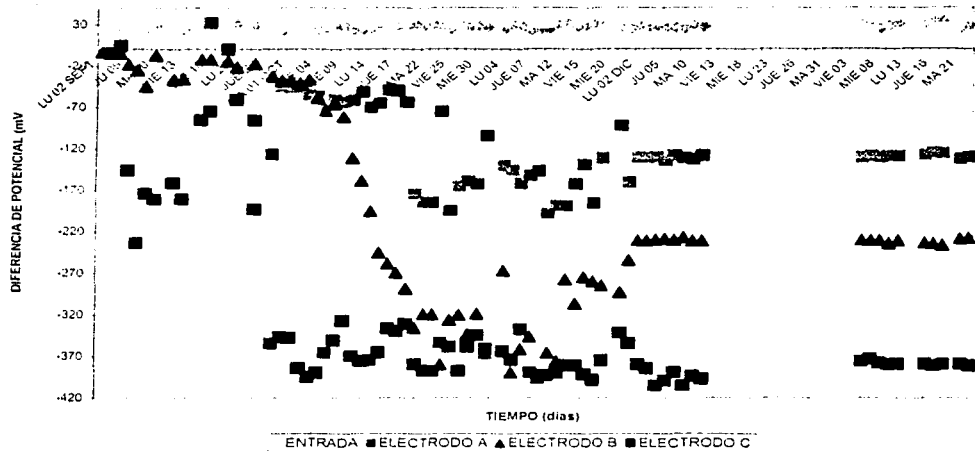


Figura A.3.3.13. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 17:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R2 (SIN PLANTA Y REGADO
CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA) - OPERANDO A UN TIEMPO DE
RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 12 HORAS
19:00 HORAS**

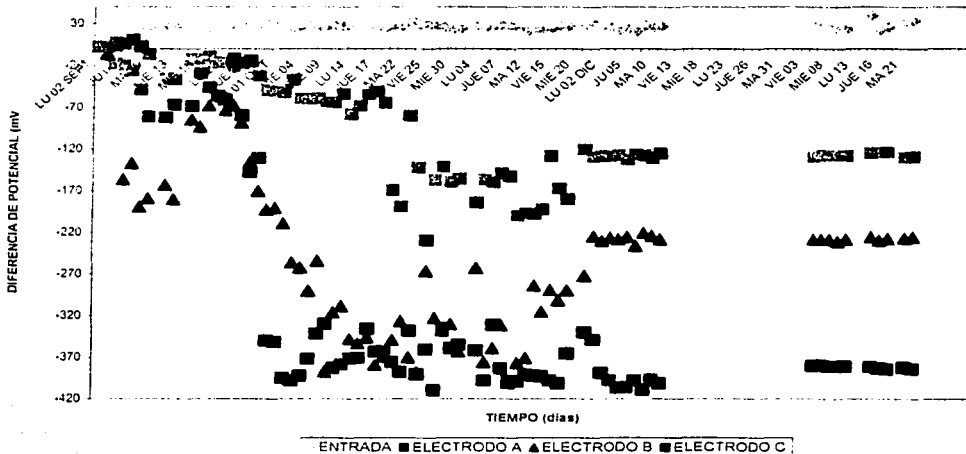


Figura A.3.3.14. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 19:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

TESIS GEN
FALLA DE ORIGEN

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R3 (CON PLANTA Y REGADO CON AGUA CORRIENTE) - OPERANDO A UN TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 12 HORAS
7:00 HORAS

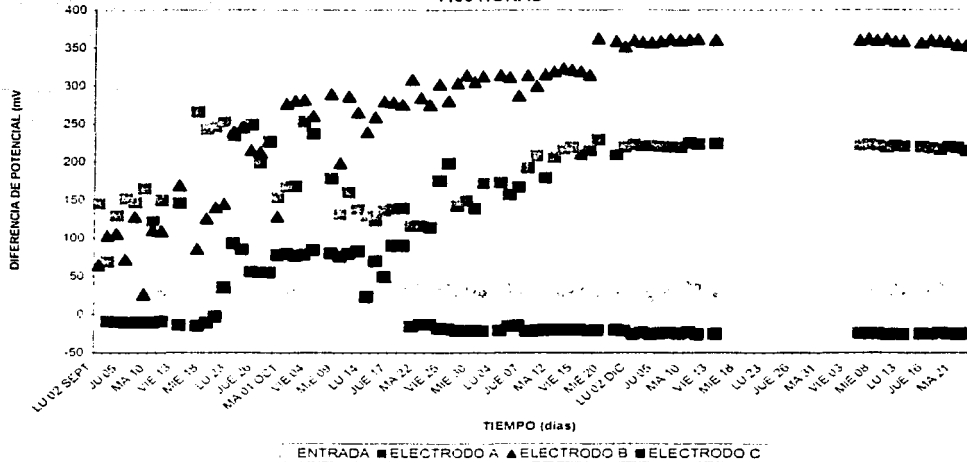


Figura A.3.3.15. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 7:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R3 (CON PLANTA Y REGADO CON AGUA CORRIENTE) - OPERANDO A UN TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 12 HORAS
9:00 HORAS

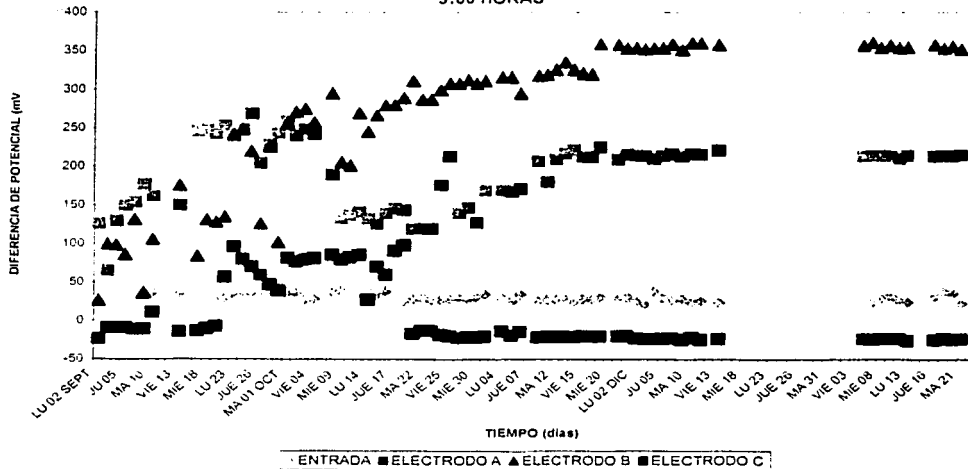


Figura A.3.3.16. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 9:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

TEC. ...
FALLA DE ORIGEN

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R3 (CON PLANTA Y
REGADO CON AGUA CORRIENTE) - OPERANDO A UN TIEMPO DE
RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 12 HORAS
11:00 HORAS**

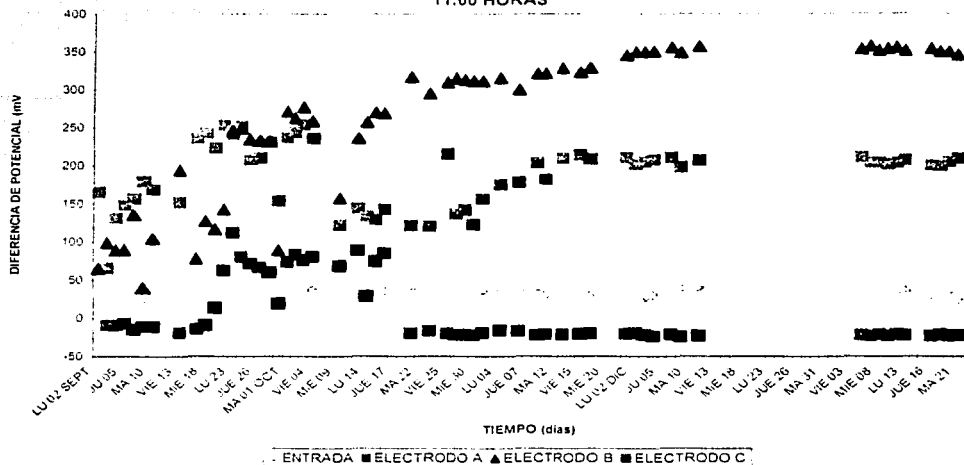


Figura A.3.3.17. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 11:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R3 (CON PLANTA Y
REGADO CON AGUA CORRIENTE) - OPERANDO A UN TIEMPO DE
RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 12 HORAS
13:00 HORAS**

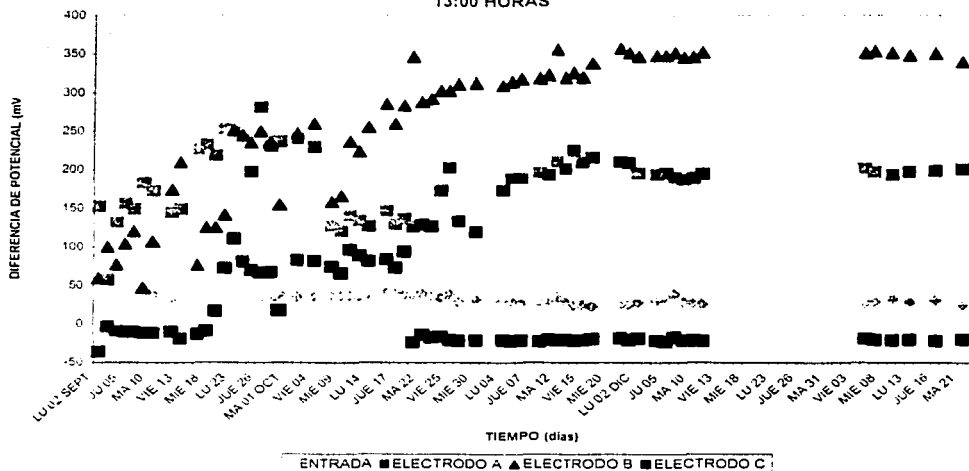


Figura A.3.3.18. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 13:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

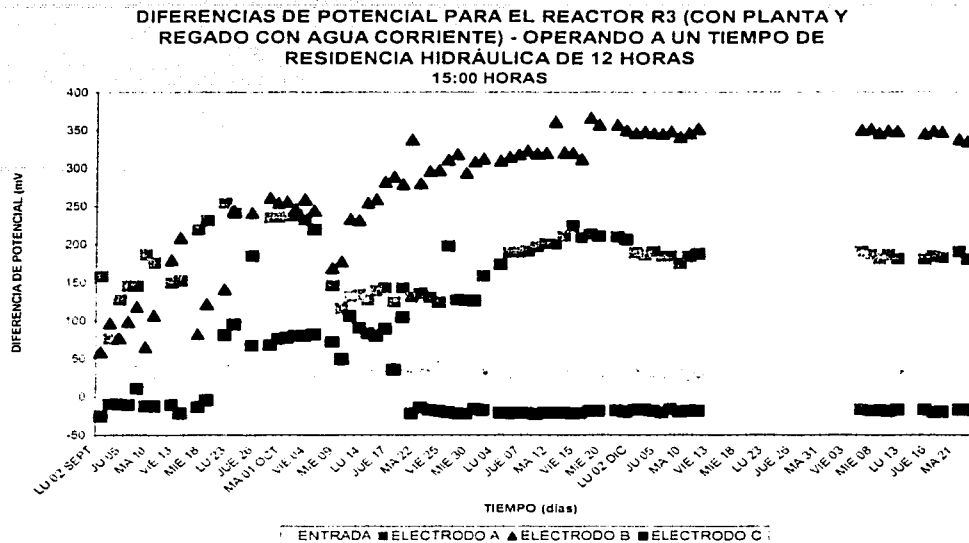


Figura A.3.3.19. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 15:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

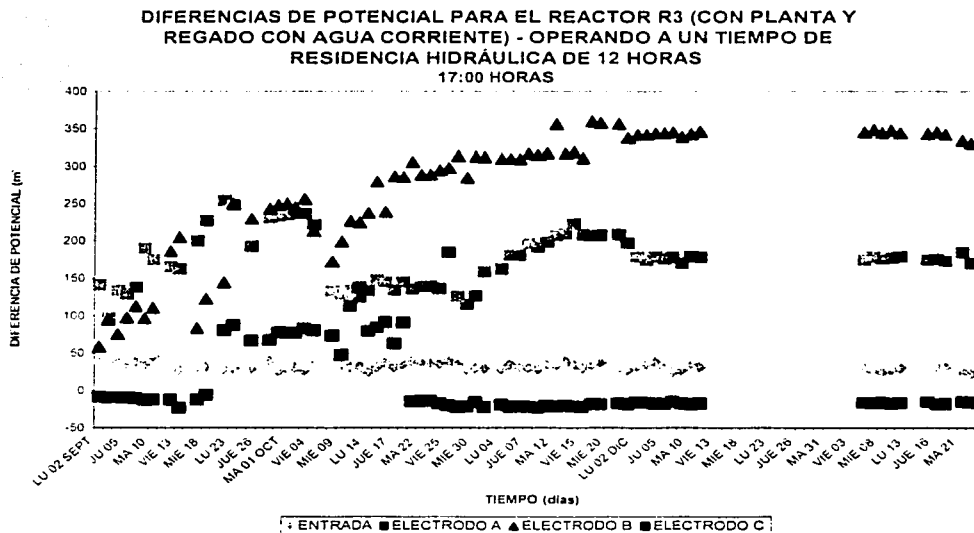


Figura A.3.3.20. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 17:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

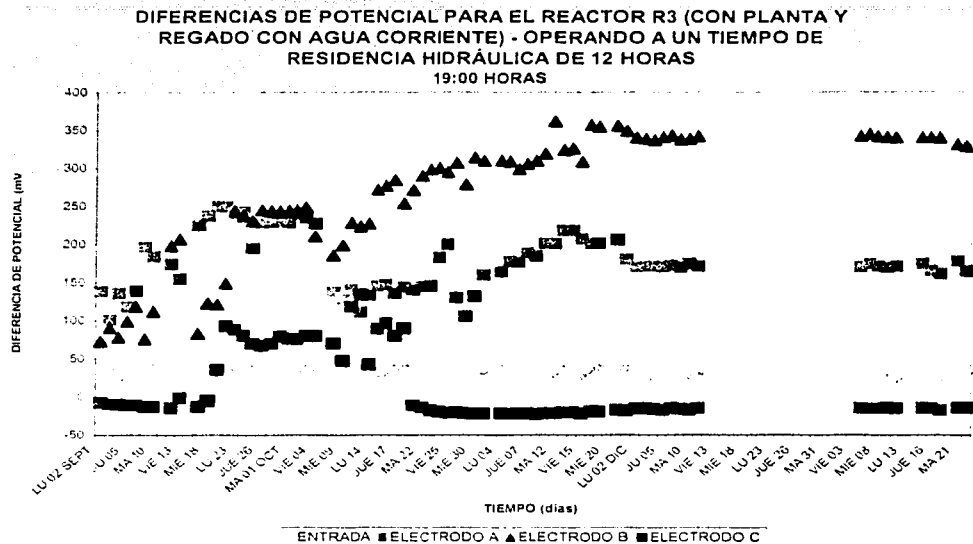


Figura A.3.3.21. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 19:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

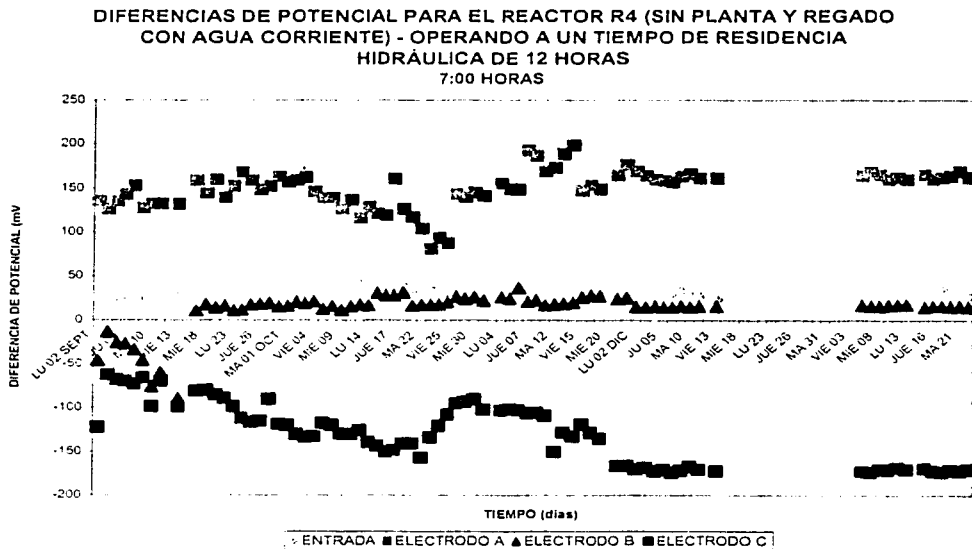


Figura A.3.3.22. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 7:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.



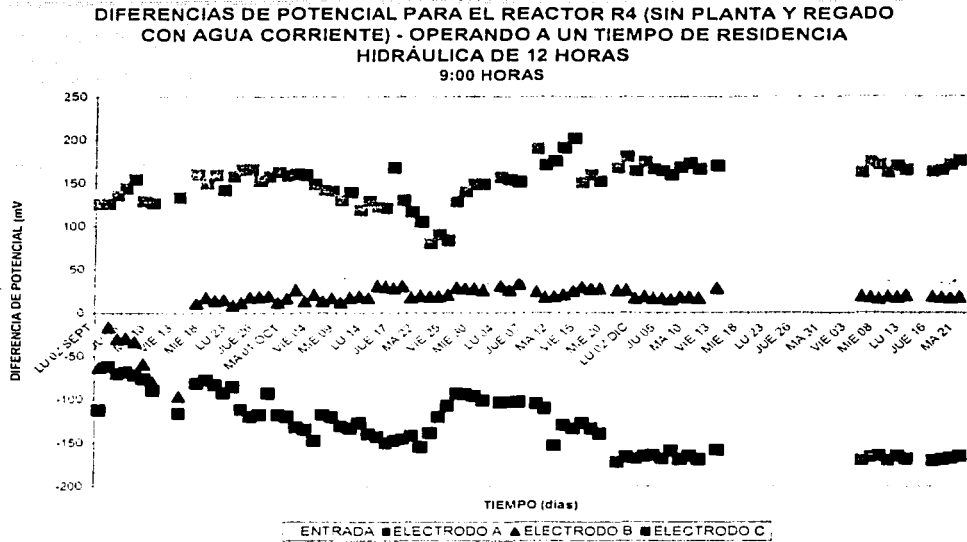


Figura A.3.3.23. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 9:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

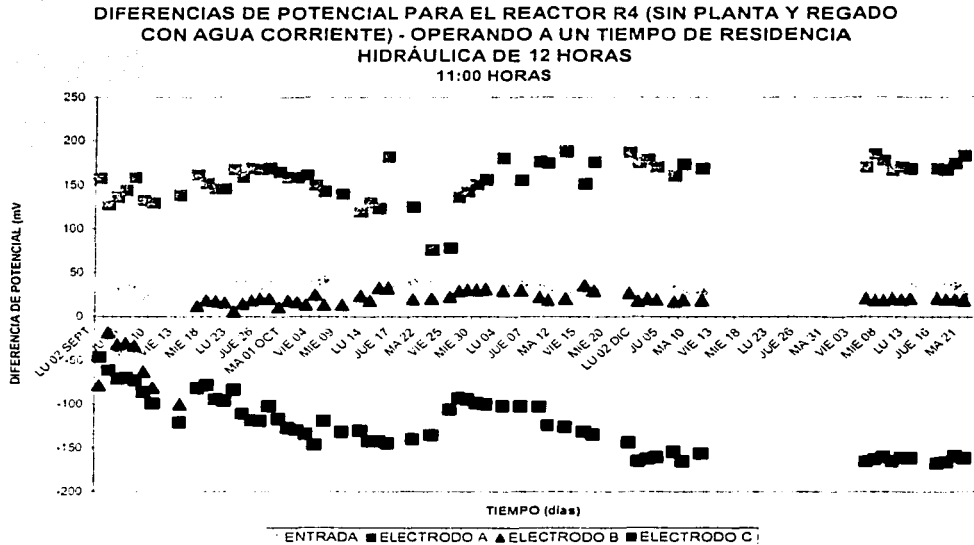


Figura A.3.3.24. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 11:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R4 (SIN PLANTA Y REGADO
CON AGUA CORRIENTE) - OPERANDO A UN TIEMPO DE RESIDENCIA
HIDRÁULICA DE 12 HORAS
13:00 HORAS**

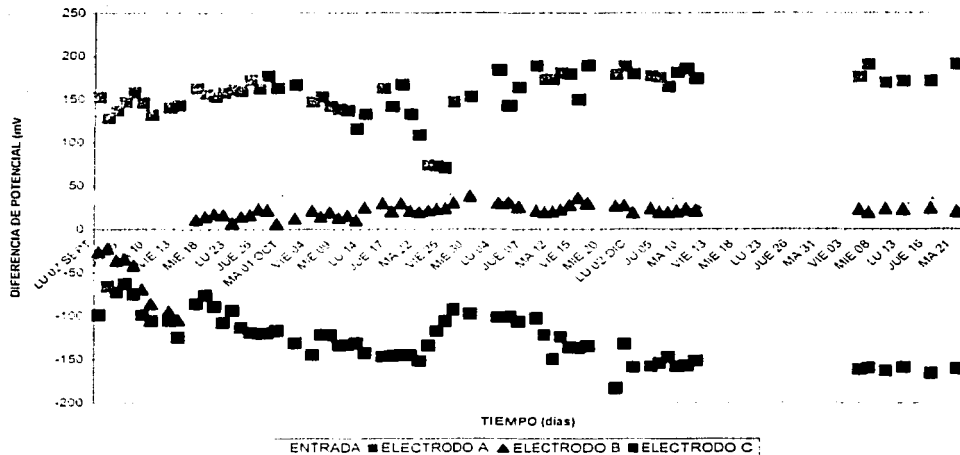


Figura A.3.3.25. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 13:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R4 (SIN PLANTA Y REGADO
CON AGUA CORRIENTE) - OPERANDO A UN TIEMPO DE RESIDENCIA
HIDRÁULICA DE 12 HORAS
15:00 HORAS**

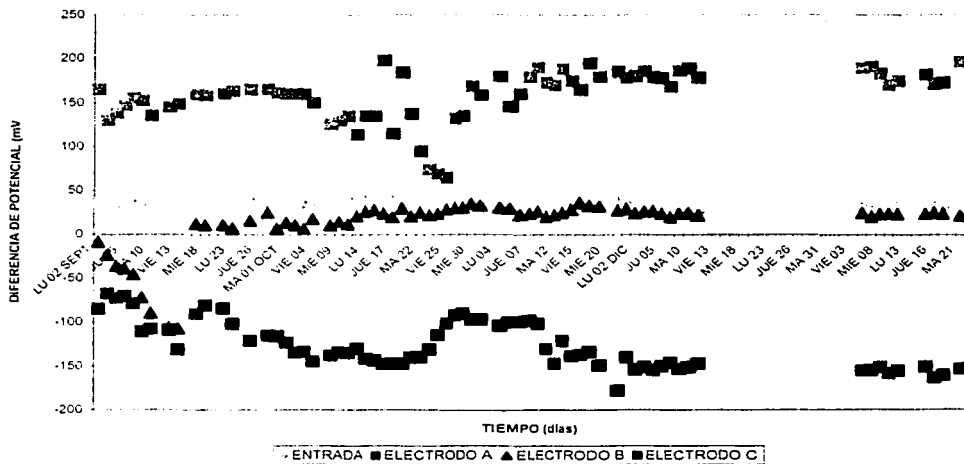


Figura A.3.3.26. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 15:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R4 (SIN PLANTA Y REGADO
CON AGUA CORRIENTE) - OPERANDO A UN TIEMPO DE RESIDENCIA
HIDRÁULICA DE 12 HORAS
17:00 HORAS**

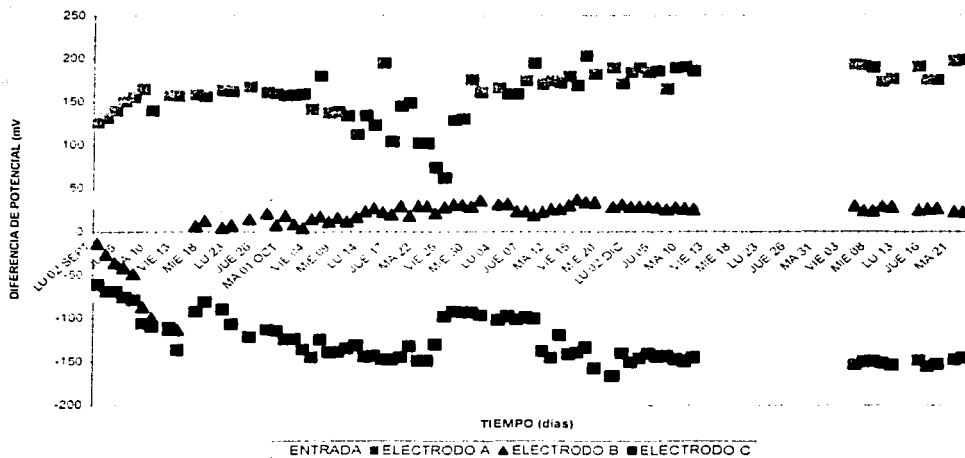


Figura A.3.3.27. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 17:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R4 (SIN PLANTA Y REGADO
CON AGUA CORRIENTE) - OPERANDO A UN TIEMPO DE RESIDENCIA
HIDRÁULICA DE 12 HORAS
19:00 HORAS**

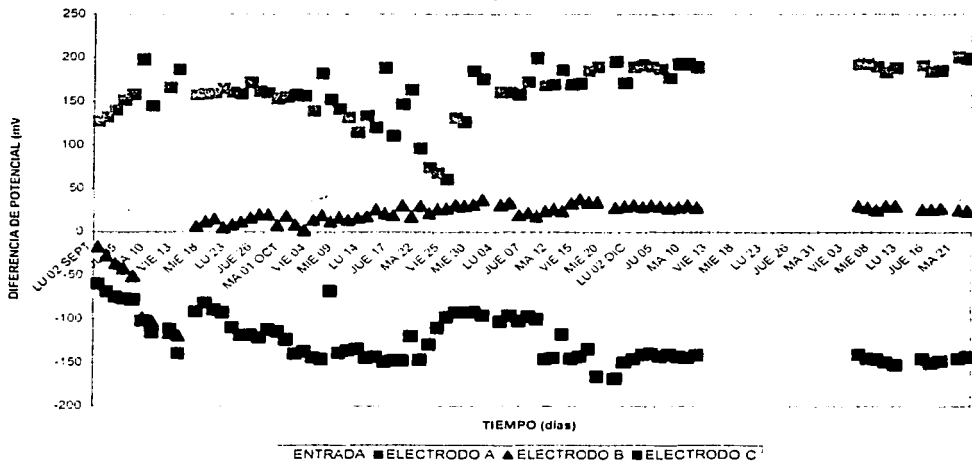


Figura A.3.3.28. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 19:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 12 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R1 (CON PLANTA Y
REGADO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA) - OPERANDO A UN TIEMPO DE
RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 24 HORAS
7:00 HORAS**

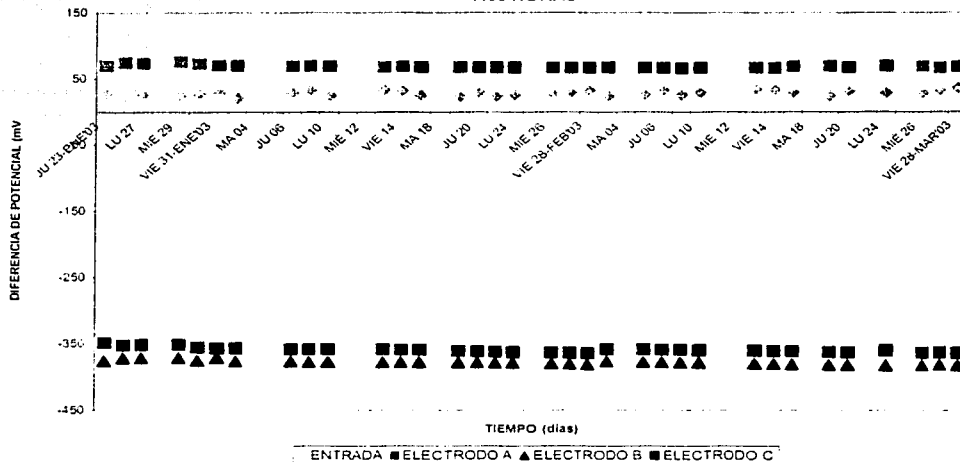


Figura A.3.3.29. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 7:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R1 (CON PLANTA Y
REGADO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA) - OPERANDO A UN TIEMPO DE
RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 24 HORAS
9:00 HORAS**

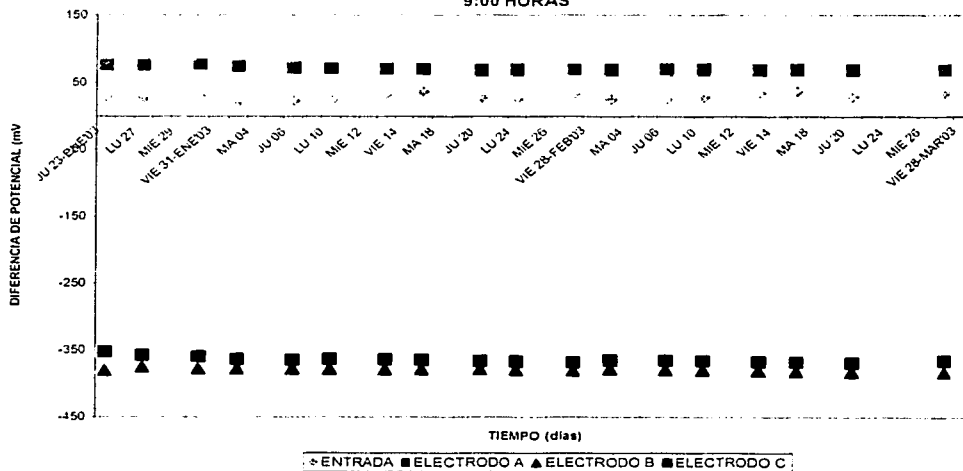


Figura A.3.3.30. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 9:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.



**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R1 (CON PLANTA Y
REGADO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA) - OPERANDO A UN TIEMPO DE
RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 24 HORAS
11:00 HORAS**

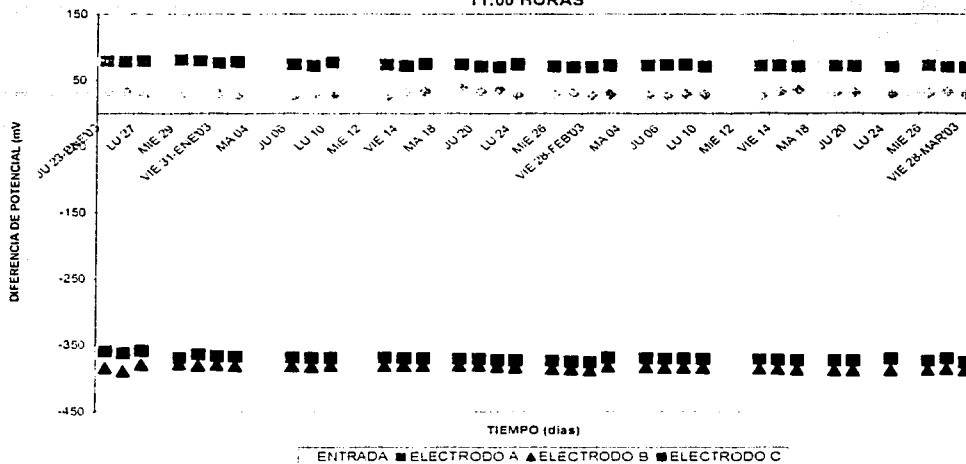


Figura A.3.3.31. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 11:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R1 (CON PLANTA Y
REGADO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA) - OPERANDO A UN TIEMPO DE
RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 24 HORAS
13:00 HORAS**

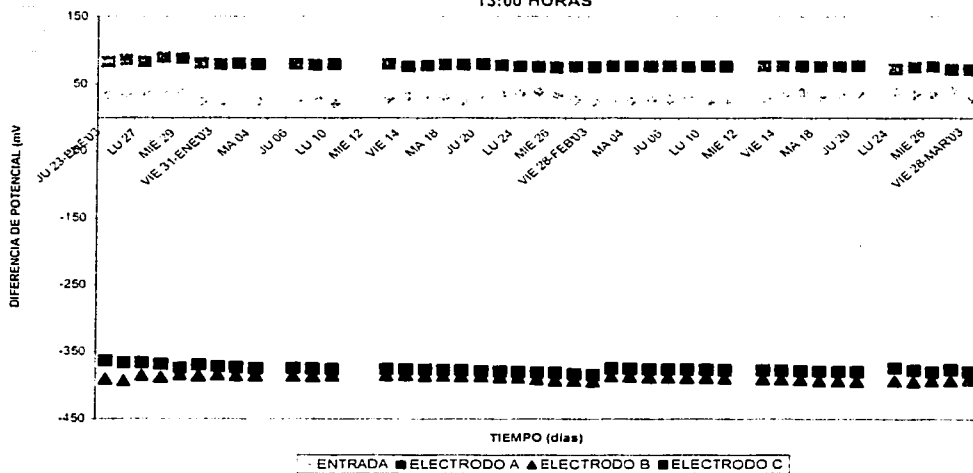


Figura A.3.3.32. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 13:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R1 (CON PLANTA Y
REGADO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA) - OPERANDO A UN TIEMPO DE
RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 24 HORAS
15:00 HORAS**

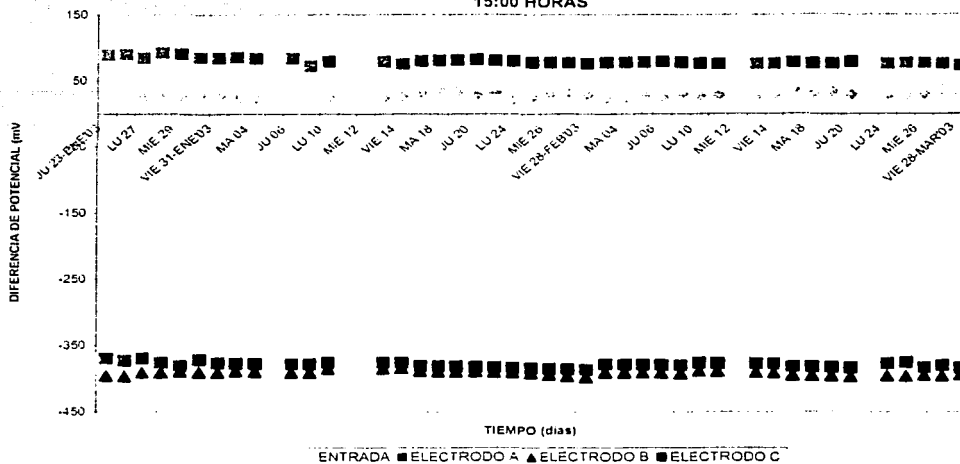


Figura A.3.3.33. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 15:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R1 (CON PLANTA Y
REGADO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA) - OPERANDO A UN TIEMPO DE
RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 24 HORAS
17:00 HORAS**

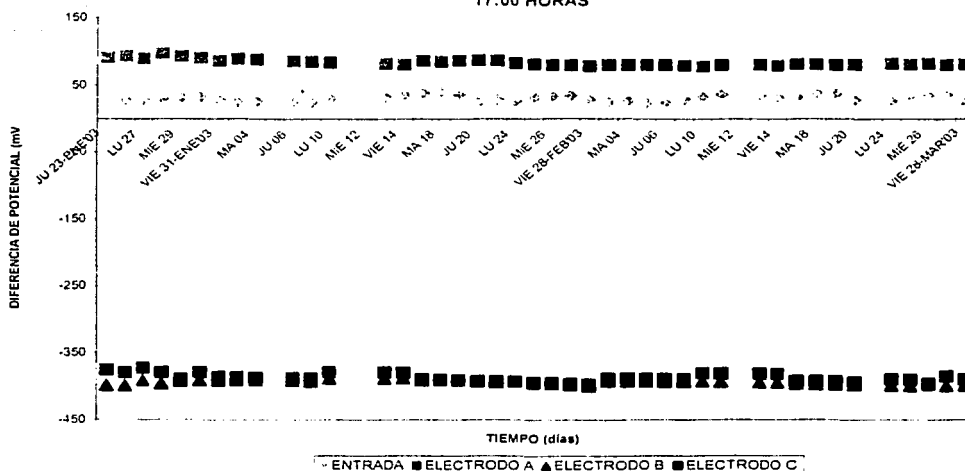


Figura A.3.3.34. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 17:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R1 (CON PLANTA Y
REGADO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA) - OPERANDO A UN TIEMPO DE
RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 24 HORAS
19:00 HORAS**

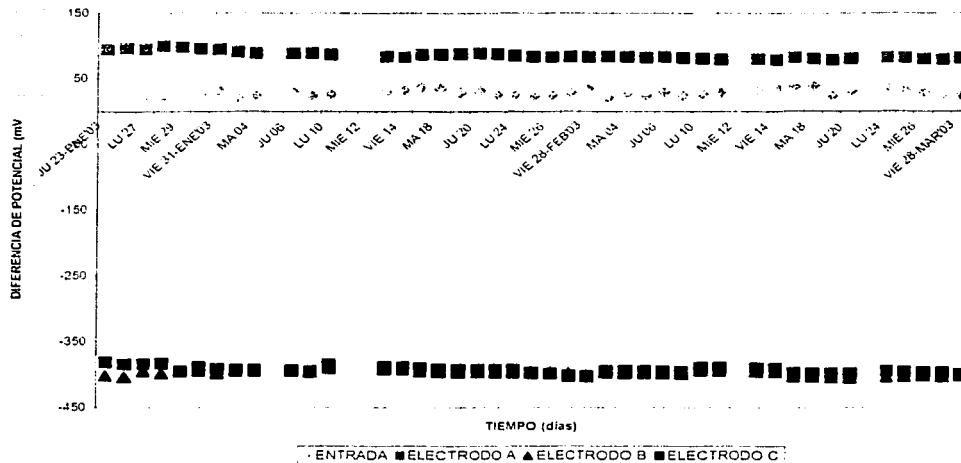


Figura A.3.3.35. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 19:00 horas, en el reactor R1, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R2 (SIN PLANTA Y REGADO
CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA) - OPERANDO A UN TIEMPO DE
RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 24 HORAS
7:00 HORAS**

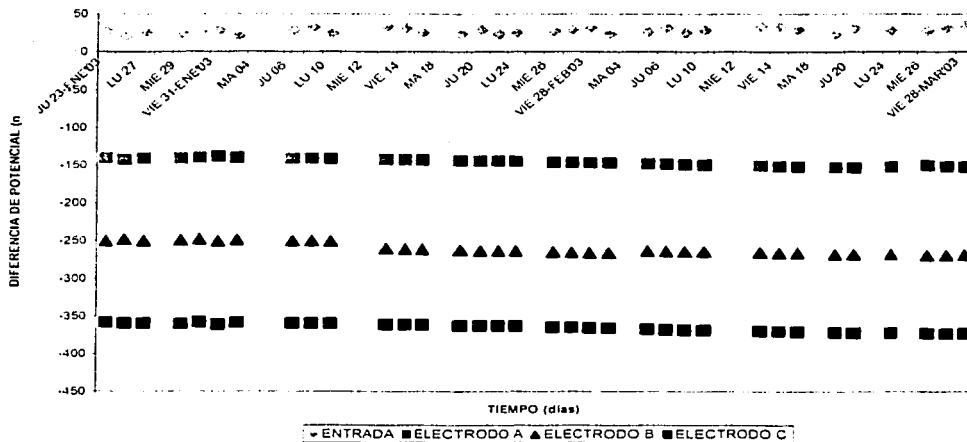
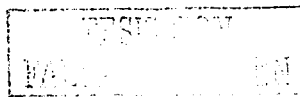


Figura A.3.3.36. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 7:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.



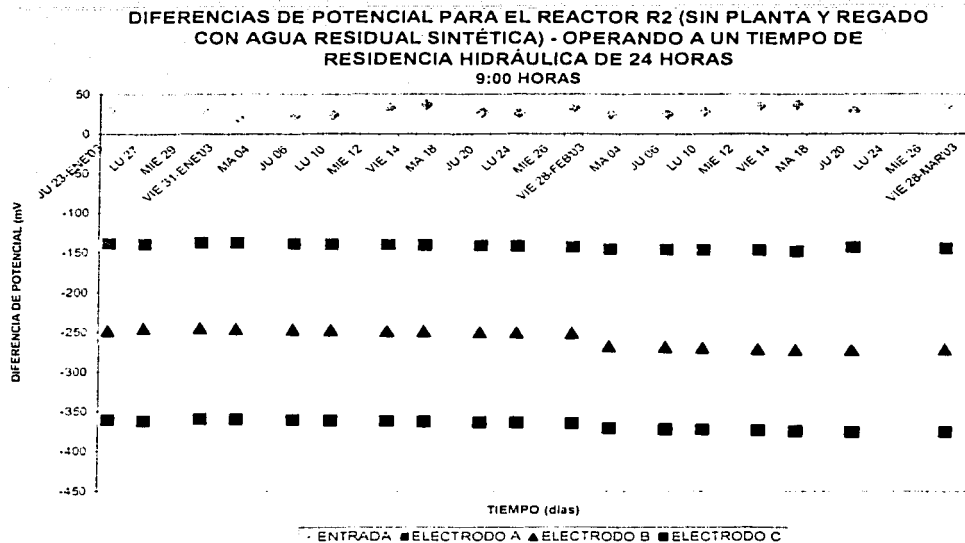


Figura A.3.3.37. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 9:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

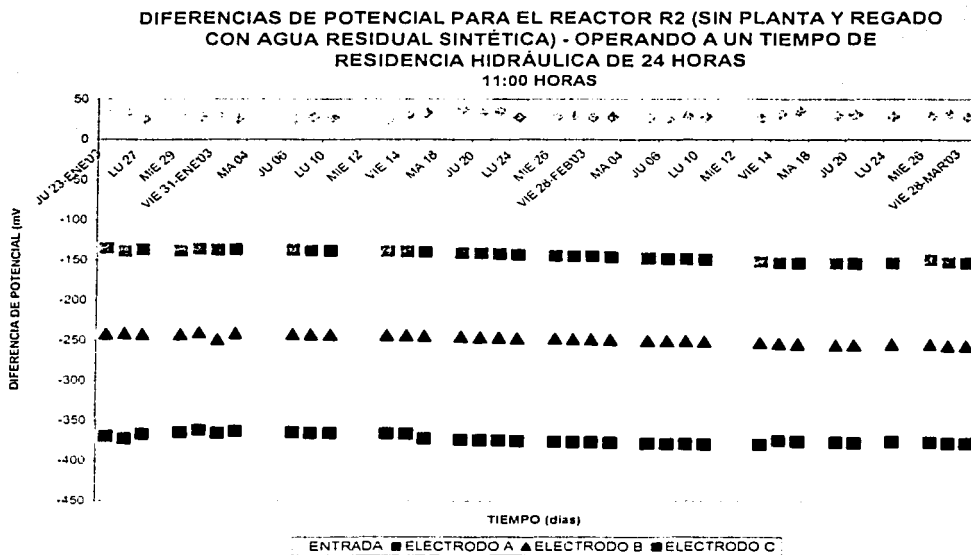


Figura A.3.3.38. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 11:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.



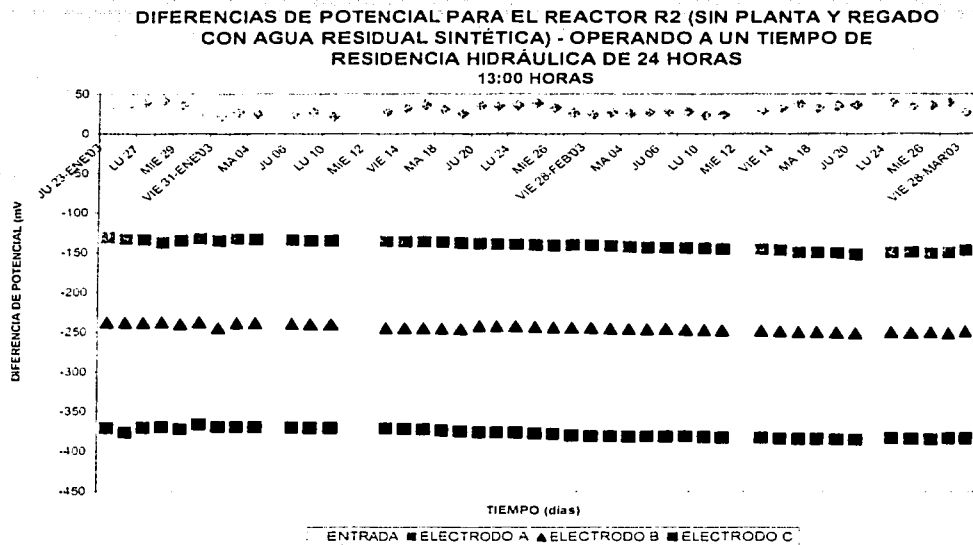


Figura A.3.3.39. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 13:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

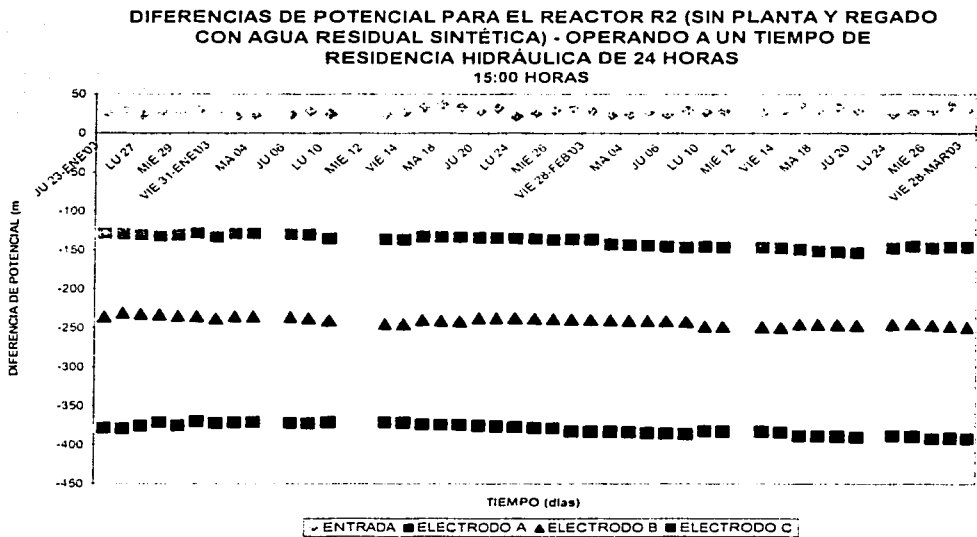


Figura A.3.3.40. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 15:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R2 (SIN PLANTA Y REGADO
CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA) - OPERANDO A UN TIEMPO DE
RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 24 HORAS
17:00 HORAS**

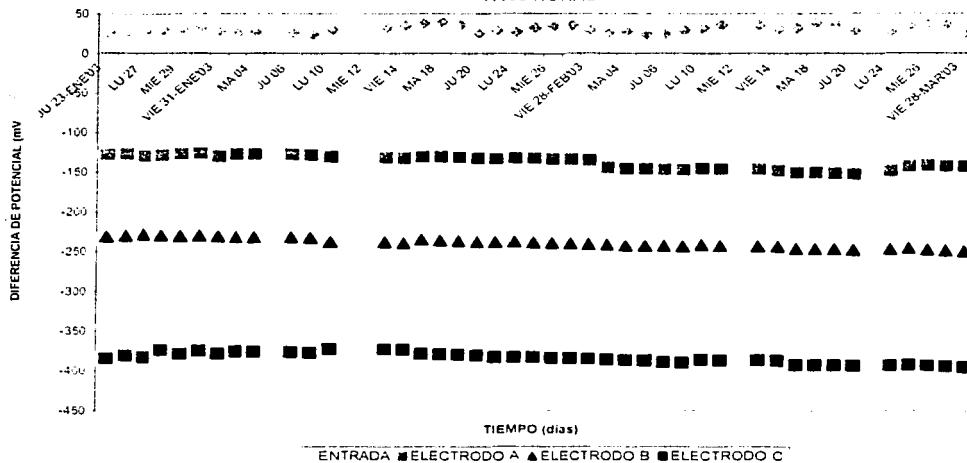


Figura A.3.3.41. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 17:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R2 (SIN PLANTA Y REGADO
CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA) - OPERANDO A UN TIEMPO DE
RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 24 HORAS
19:00 HORAS**

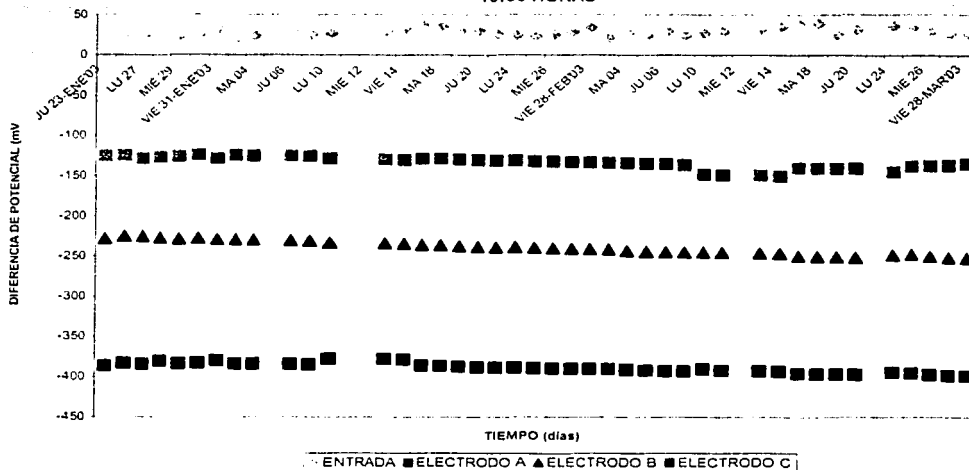


Figura A.3.3.42. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 19:00 horas, en el reactor R2, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R3 (CON PLANTA Y
REGADO CON AGUA CORRIENTE) - OPERANDO A UN TIEMPO DE
RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 24 HORAS
7:00 HORAS**

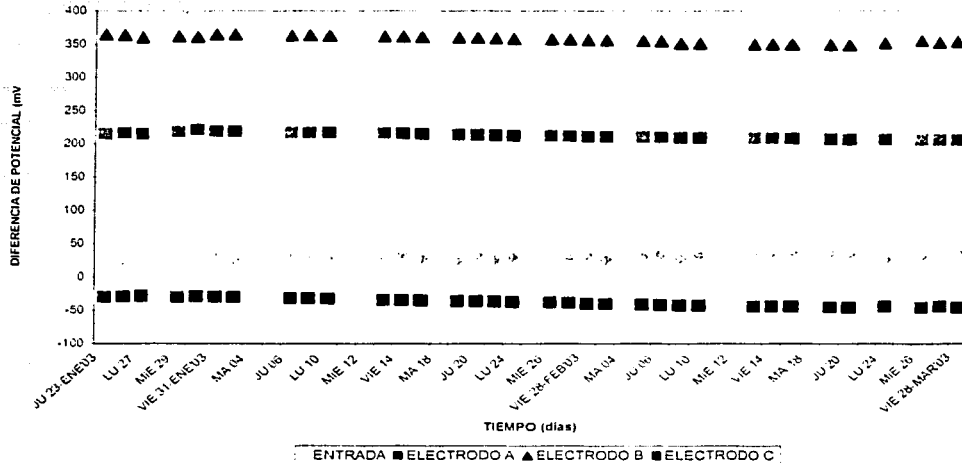


Figura A.3.3.43. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 7:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R3 (CON PLANTA Y
REGADO CON AGUA CORRIENTE) - OPERANDO A UN TIEMPO DE
RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 24 HORAS
9:00 HORAS**

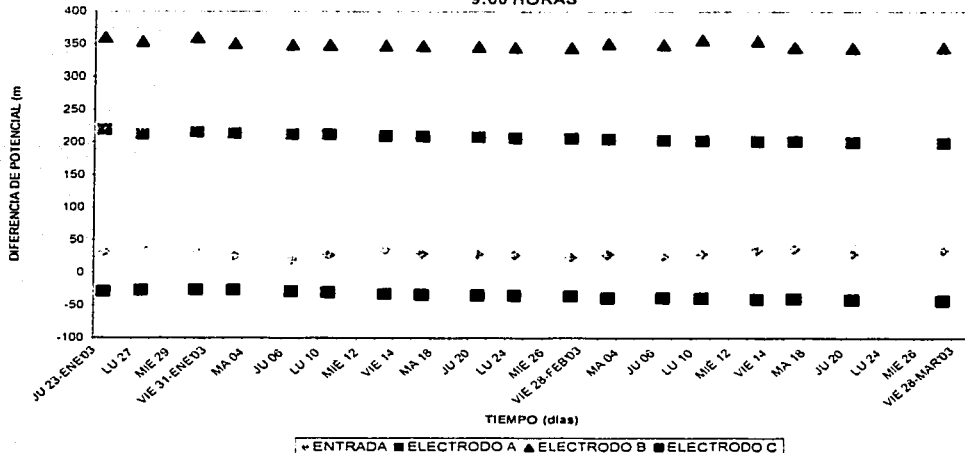


Figura A.3.3.44. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 9:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

TEST CON
FALLA DE ORDEN

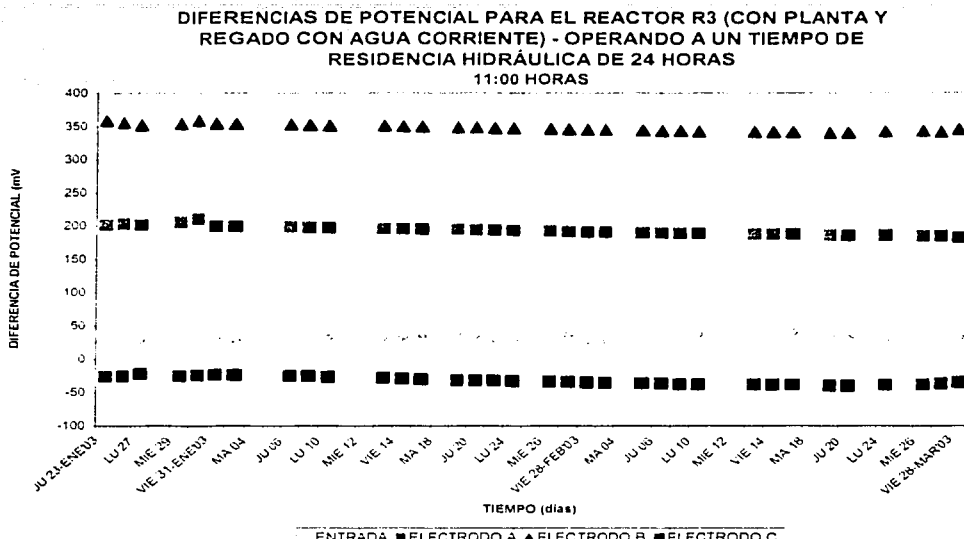


Figura A.3.3.45. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 11:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.

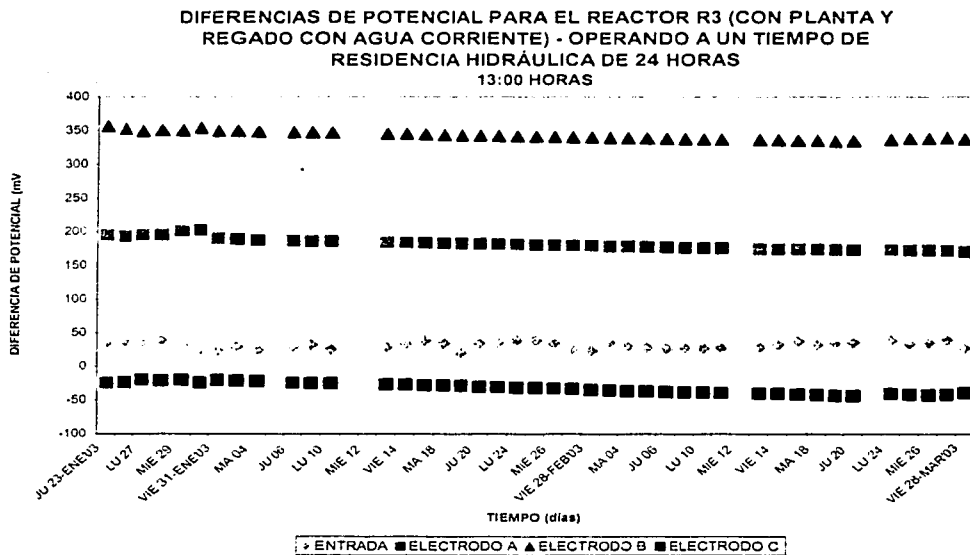
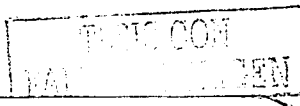


Figura A.3.3.46. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 13:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie.



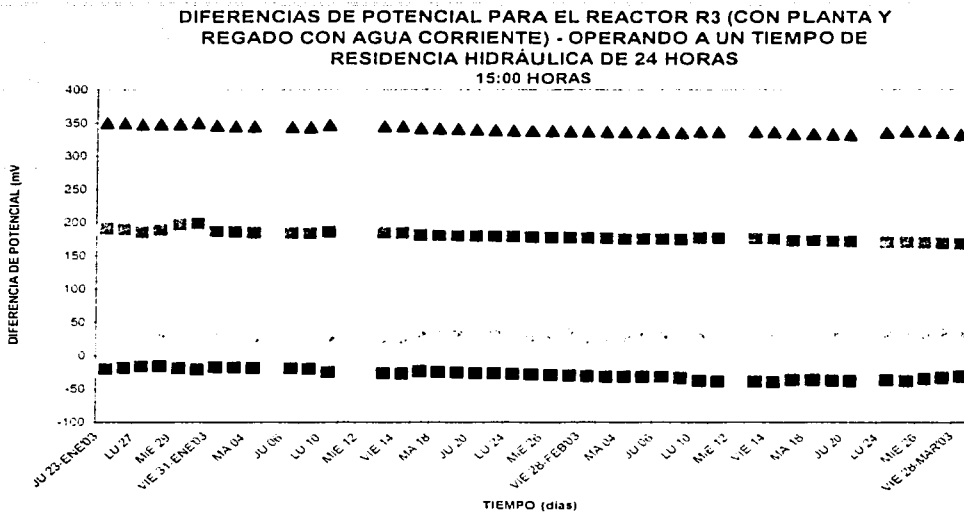


Figura A.3.3.47. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 15:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie

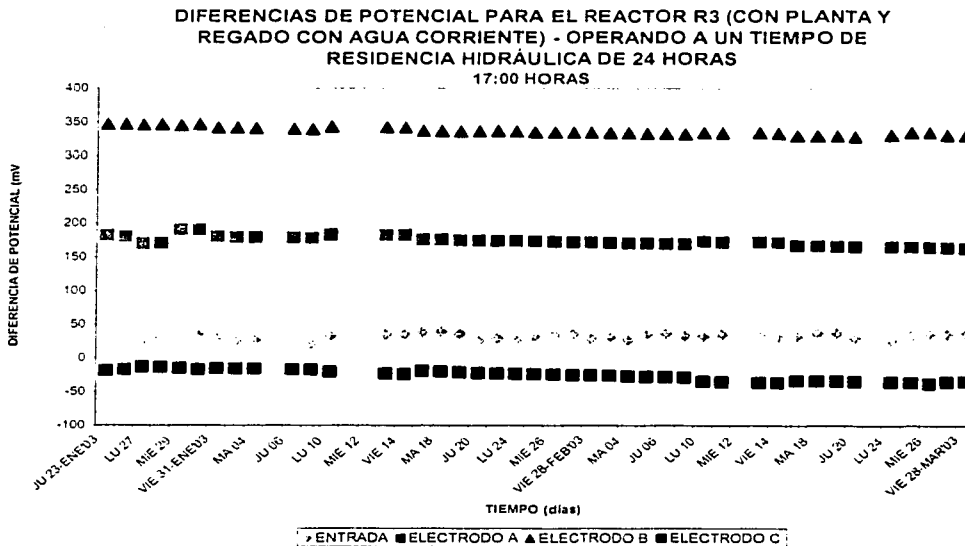
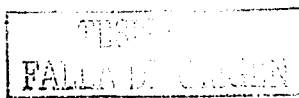


Figura A.3.3.48. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 17:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie



**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R3 (CON PLANTA Y
REGADO CON AGUA CORRIENTE) - OPERANDO A UN TIEMPO DE
RESIDENCIA HIDRÁULICA DE 24 HORAS
19:00 HORAS**

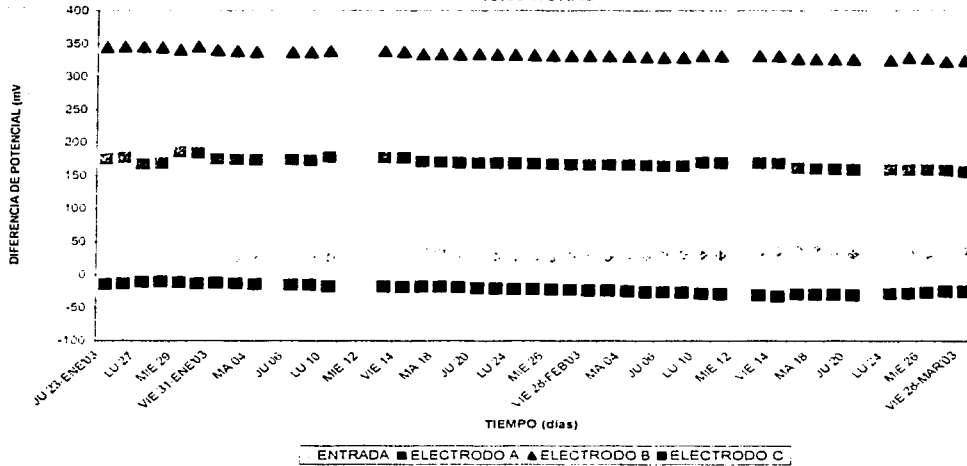


Figura A.3.3.49. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 19:00 horas, en el reactor R3, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R4 (SIN PLANTA Y REGADO
CON AGUA CORRIENTE) - OPERANDO A UN TIEMPO DE RESIDENCIA
HIDRÁULICA DE 24 HORAS
7:00 HORAS**

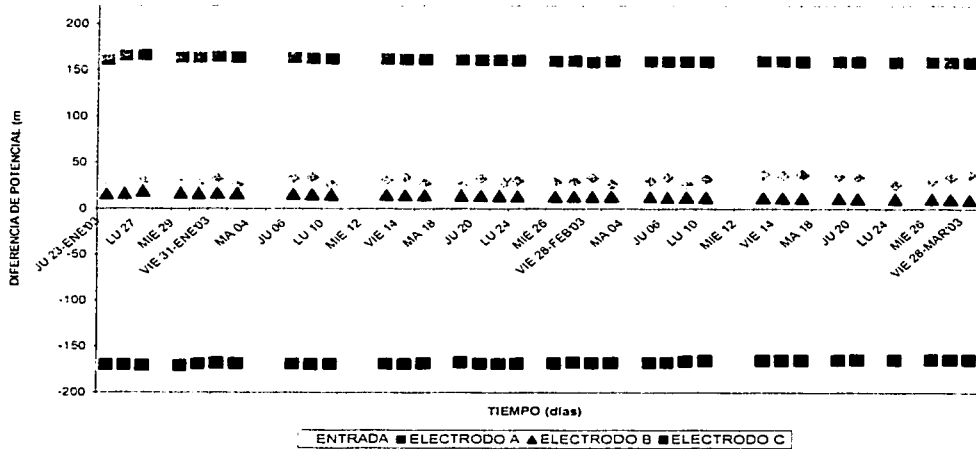


Figura A.3.3.50. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 7:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie

FALLA DE ORIGEN

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R4 (SIN PLANTA Y REGADO
CON AGUA CORRIENTE) - OPERANDO A UN TIEMPO DE RESIDENCIA
HIDRÁULICA DE 24 HORAS
9:00 HORAS**

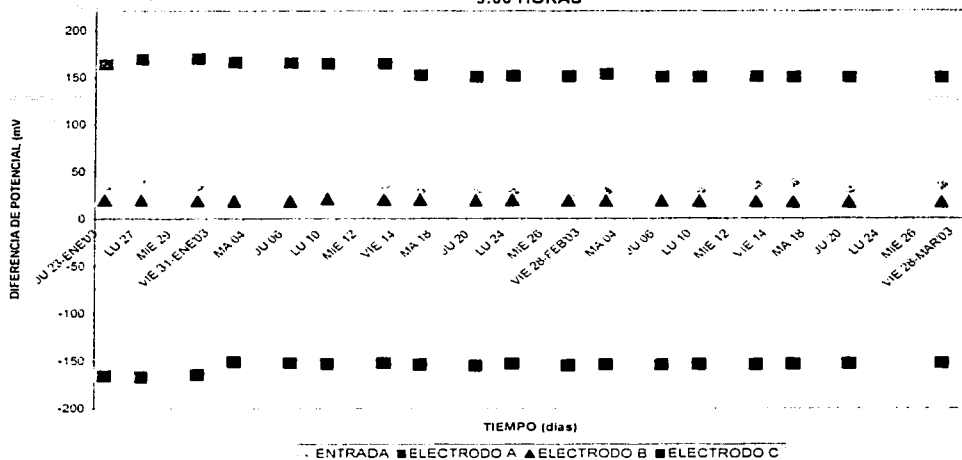


Figura A.3.3.51. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 9:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R4 (SIN PLANTA Y REGADO
CON AGUA CORRIENTE) - OPERANDO A UN TIEMPO DE RESIDENCIA
HIDRÁULICA DE 24 HORAS
11:00 HORAS**

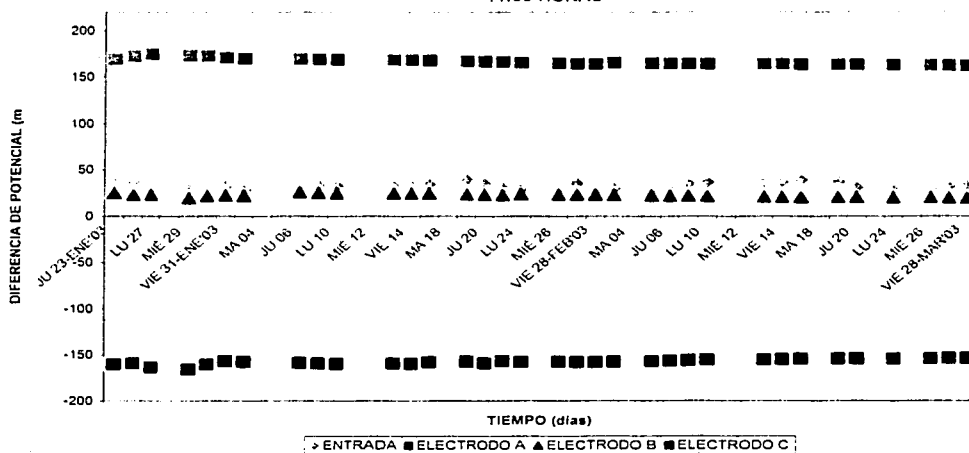


Figura A.3.3.52. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 11:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie

TESIS DE GRADUACIÓN
FALLA DE ORIGEN

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R4 (SIN PLANTA Y REGADO
CON AGUA CORRIENTE) - OPERANDO A UN TIEMPO DE RESIDENCIA
HIDRÁULICA DE 24 HORAS
13:00 HORAS**

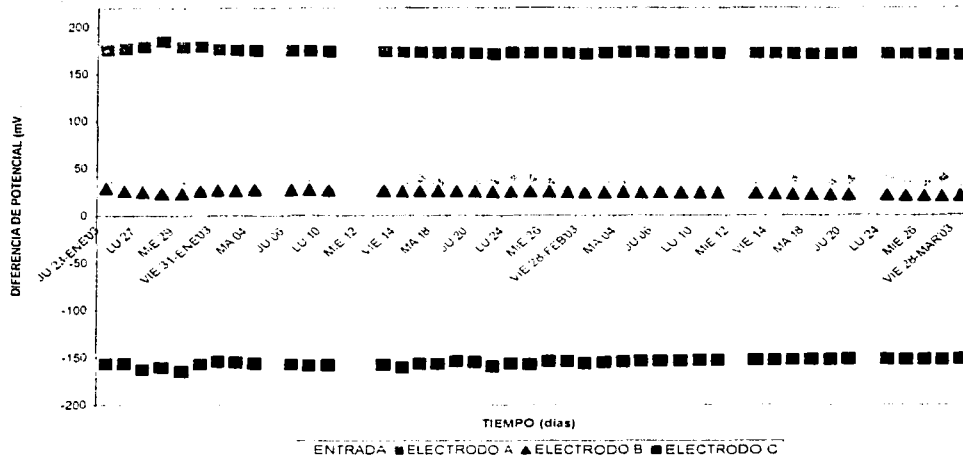


Figura A.3.3.53. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 13:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R4 (SIN PLANTA Y REGADO
CON AGUA CORRIENTE) - OPERANDO A UN TIEMPO DE RESIDENCIA
HIDRÁULICA DE 24 HORAS
15:00 HORAS**

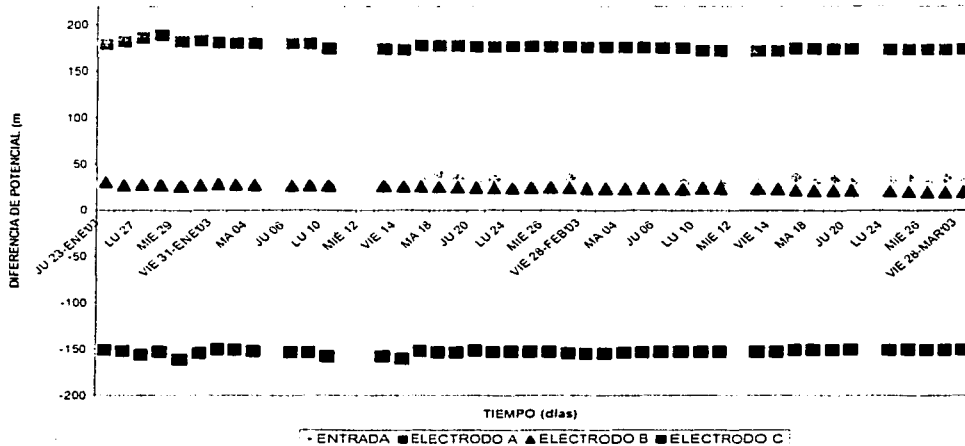
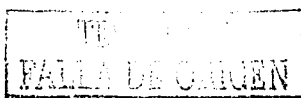


Figura A.3.3.54. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 15:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie



**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R4 (SIN PLANTA Y REGADO
CON AGUA CORRIENTE) - OPERANDO A UN TIEMPO DE RESIDENCIA
HIDRÁULICA DE 24 HORAS**

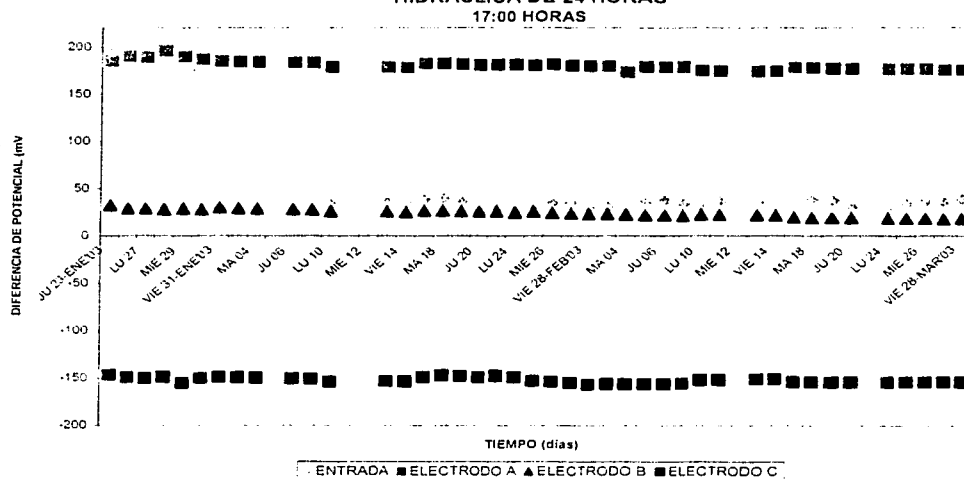


Figura A.3.3.55. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 17:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie

**DIFERENCIAS DE POTENCIAL PARA EL REACTOR R4 (SIN PLANTA Y REGADO
CON AGUA CORRIENTE) - OPERANDO A UN TIEMPO DE RESIDENCIA
HIDRÁULICA DE 24 HORAS**

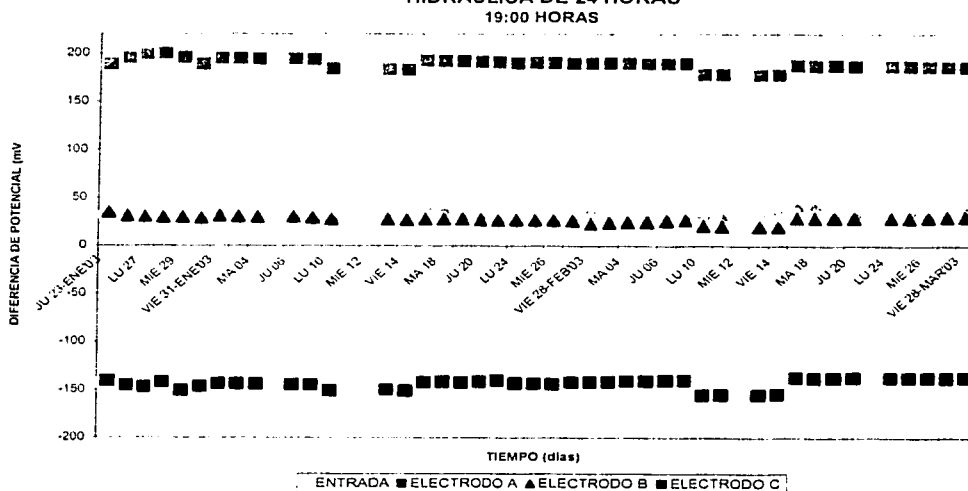


Figura A.3.3.56. Resultados de las mediciones de diferencia de potencial, realizadas a las 19:00 horas, en el reactor R4, a un TRH de 24 horas. Electrodo A, a 2 cm de la superficie; electrodo B, a 10 cm de la superficie y electrodo C, a 30 cm de la superficie



A.4 ACERVO FOTOGRÁFICO

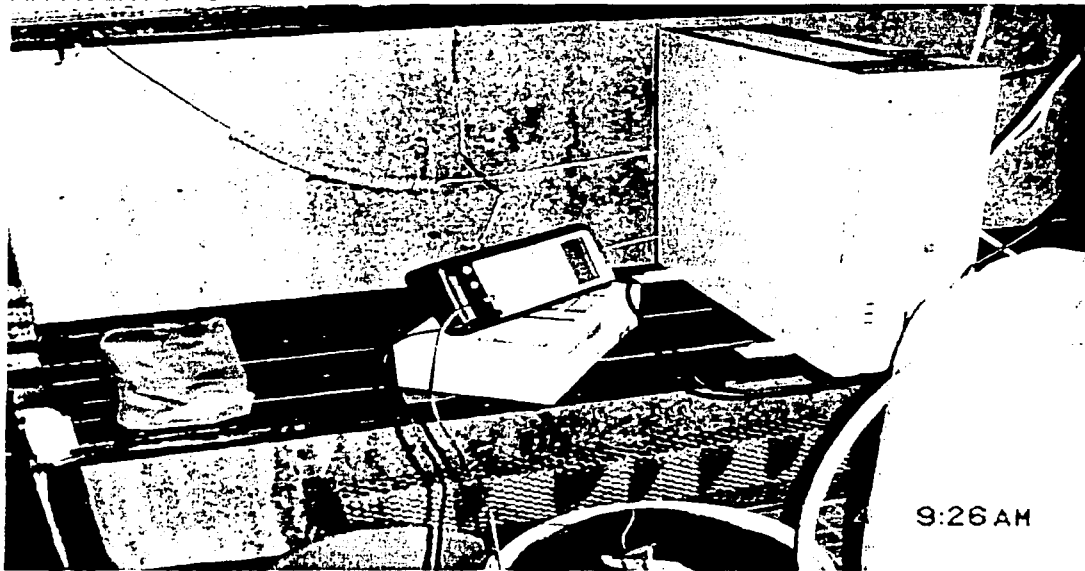


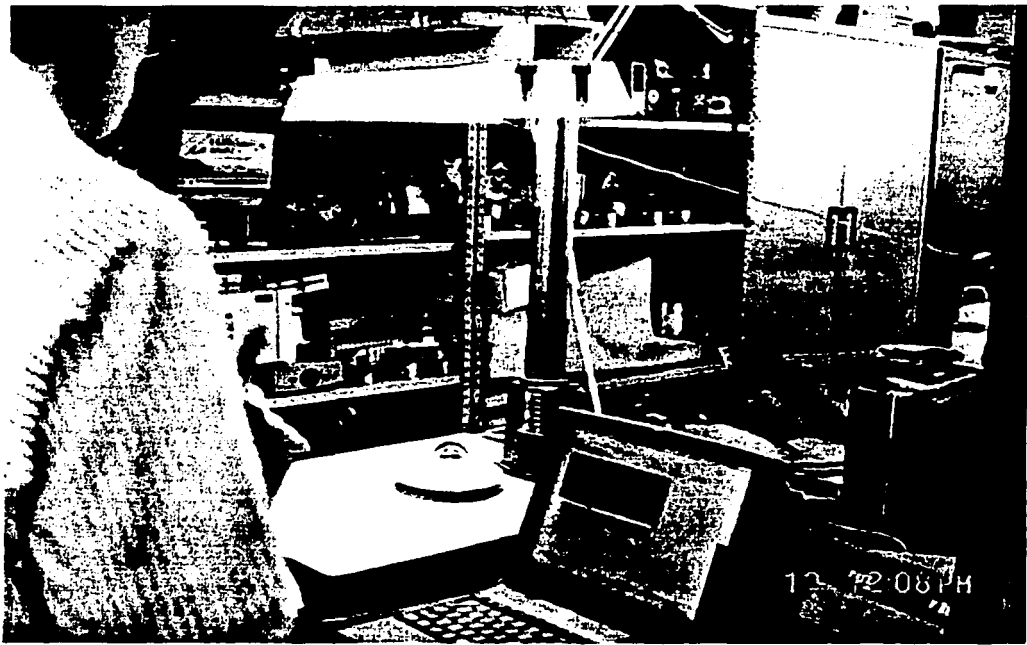
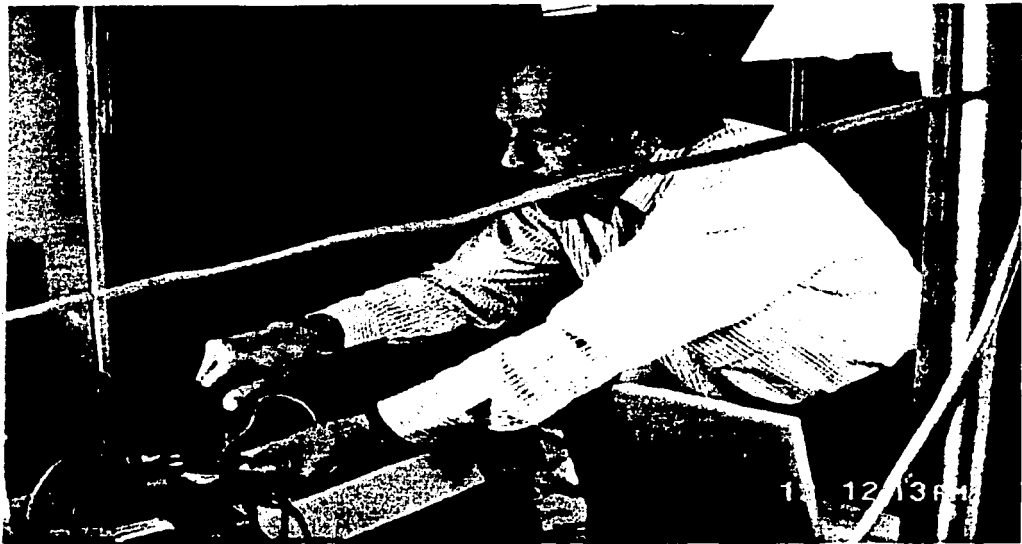
Figura A.4.1 Multímetro digital utilizado



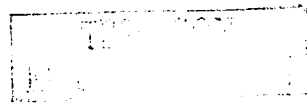
Figura A.4.2 Detalle del empacado de una columna

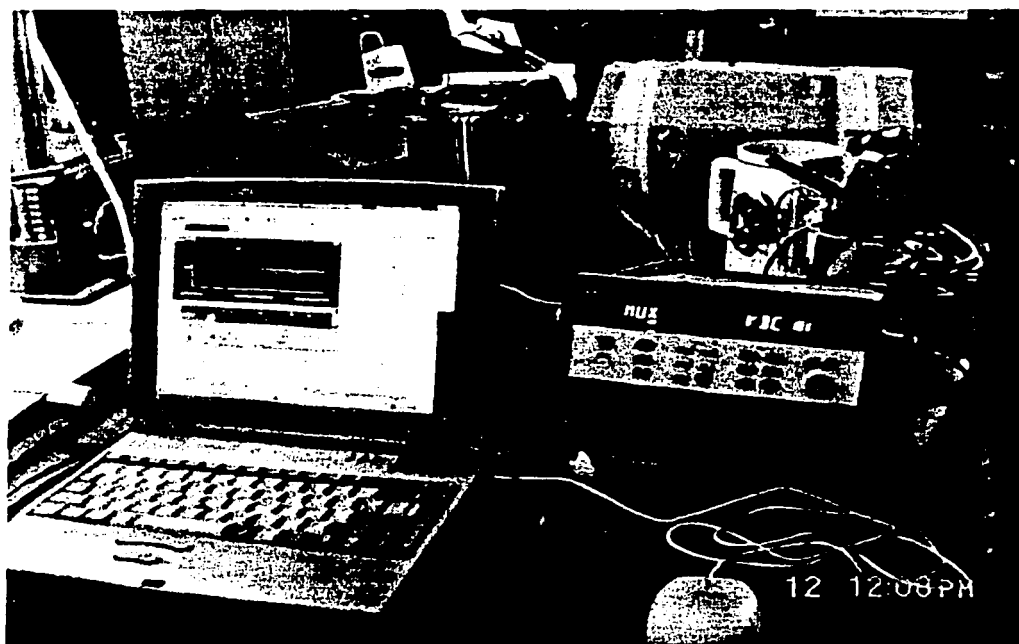


Figura A.4.3 Agua residual sintética en descomposición

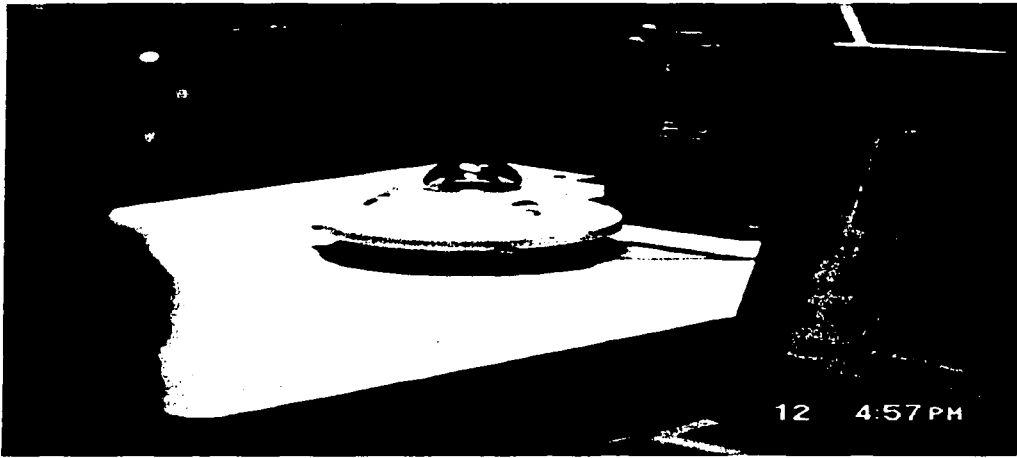


Figuras A.4.4 y A.4.5 Detalles del dispositivo de medición de irradianza





Figuras A.4.6 y A.4.7 Detalles del dispositivo de medición de irradianza



Figuras A.4.8 y A.4.9 Detalle del radiómetro y del dispositivo de medición de irradianza



Figura A.4.10 Reactores R1 (reactor de prueba) y R2 (reactor testigo), regados con agua residual sintética



Figura A.4.11 Reactores R4 (reactor testigo) y R3 (reactor testigo), regados con agua corriente



Figura A.4.12 Vista general del sistema experimental

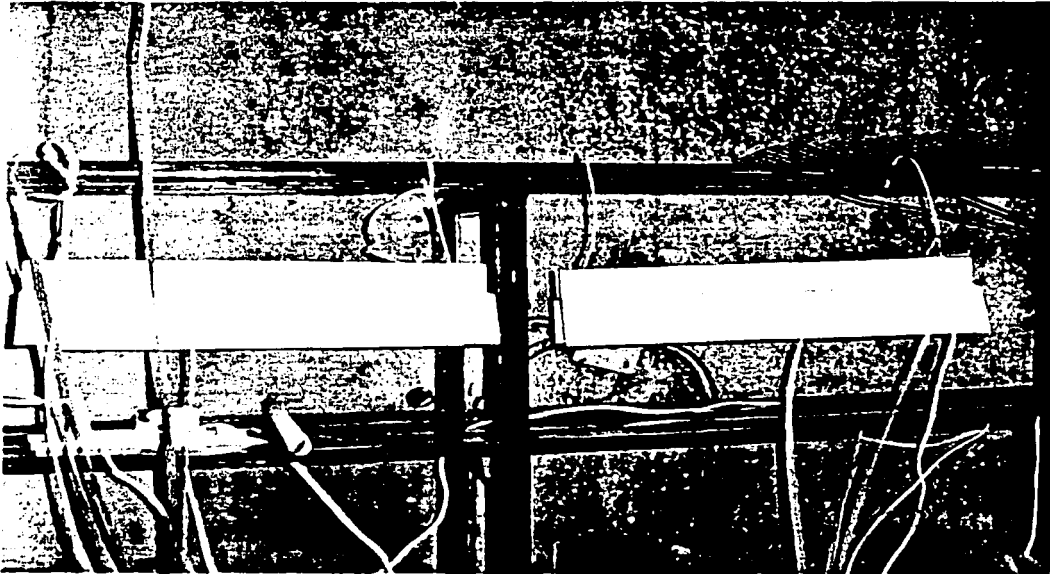


Figura A.4.13 Detalle de dos de las lámparas utilizadas para en el experimento

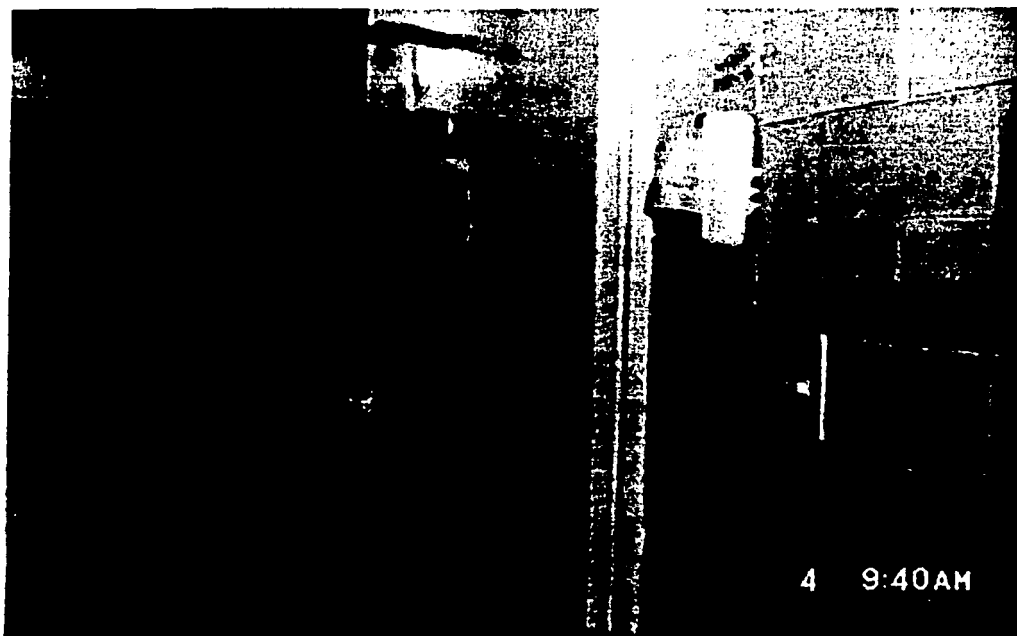


Figura A.4.14 Detalle del sitio en donde se realizó el experimento; la temperatura se mantuvo en un intervalo de $28 \pm 2^{\circ}\text{C}$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Como se comentó en el Capítulo III, se realizó un análisis estadístico basado en el Estadístico "F". Se eligió este tipo de análisis considerando varios puntos: que se trataba de un proceso continuo; que sólo se estaba estudiando una variable (la diferencia de potencial, a su vez relacionada con la cantidad de materia orgánica presente en el sistema y con la DQO_T) y que la cantidad de datos existentes fue muy grande.

El cálculo del estadístico "F" permite demostrar en qué momento se llega a la fase de estabilidad. Es una herramienta que deja ver cuál es la desviación existente en cada uno de los electrodos con respecto a un comportamiento estable.

Para obtener el valor del estadístico F se calcula la desviación estándar de un conjunto de datos obtenidos durante un período de tiempo dado. Se calcula la relación de los cuadrados de las desviaciones estándar inicial y del período actual y, según el número de datos, se obtiene el valor buscado de una tabla estadística (AMTE, 2002).

A continuación se muestra un ejemplo (es el caso del reactor R1 en las mediciones de las 7:00 horas) de los gráficos y las tablas relacionadas con el análisis estadístico de que se habla arriba. Todos los datos obtenidos (de los diferentes reactores y horarios de medición) recibieron el mismo tratamiento estadístico.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla A.5.1

VALORES DE PROMEDIO, RANGO, DESVIACIÓN ESTÁNDAR Y ESTADÍSTICO F PARA LOS VALORES DE DIFERENCIA DE POTENCIAL OBTENIDOS DE LOS ELECTRODOS A, B Y C, DEL REACTOR R1 A LAS 7:00 HORAS, OPERANDO A UN TRH DE 12 HORAS

7 h.

	PROMEDIOS					RANGOS			
	ENTRADA	ELECTRODO A	ELECTRODO B	ELECTRODO C		ENTRADA	ELECTRODO A	ELECTRODO B	ELECTRODO C
SEMANA 1	22.6	64.1	-144.9	17.2	SEMANA 1	4.5	54.3	440.4	210.9
SEMANA 2	25.7	52.8	-128.0	-184.1	SEMANA 2	3.1	74.4	249.7	109.3
SEMANA 3	20.3	27.2	-259.8	-191.6	SEMANA 3	5.1	37.9	289.9	280.1
SEMANA 4	26.3	97.6	-354.6	-306.8	SEMANA 4	10.8	46.8	85.4	52.9
SEMANA 5	26.7	161.1	-368.5	-78.8	SEMANA 5	4.1	22.7	30.5	54.0
SEMANA 6	27.9	150.3	-342.6	-53.7	SEMANA 6	9.4	44.2	38.3	67.3
SEMANA 7	27.1	136.9	-415.6	-167.7	SEMANA 7	6.0	72.1	92.0	284.8
SEMANA 8	25.7	123.6	-302.7	-312.0	SEMANA 8	9.0	104.7	340.7	129.8
SEMANA 9	26.0	84.6	-284.2	-356.8	SEMANA 9	4.0	17.6	103.9	56.0
SEMANA 10	27.9	88.6	-294.8	-327.0	SEMANA 10	9.4	2.9	73.7	131.6
SEMANA 11	27.1	87.5	-351.7	-346.2	SEMANA 11	6.0	4.6	66.5	18.0
SEMANA 12	24.5	86.3	-371.3	-358.3	SEMANA 12	5.0	12.2	57.0	2.0
SEMANA 13	26.9	83.1	-374.2	-353.4	SEMANA 13	6.5	4.9	9.0	9.2
SEMANA 14	28.7	81.9	-371.7	-351.6	SEMANA 14	9.4	3.0	3.6	3.4
SEMANA 15					SEMANA 15				
SEMANA 16					SEMANA 16				
SEMANA 17					SEMANA 17				
SEMANA 18	27.0	80.7	-371.7	-350.3	SEMANA 18	13.0	3.5	4.1	2.6
SEMANA 19	33.3	80.0	-373.8	-347.4	SEMANA 19	15.0	7.0	5.5	4.0
SEMANA 20	24.7	80.2	-375.8	-343.1	SEMANA 20	6.0	4.0	3.5	6.9
PROMEDIO FASE ESTABLE	27.5	81.2	-352.1	-350.0					

7 h.

	DESVIACIONES ESTÁNDAR (S)					ESTADÍSTICO (F)			
	ENTRADA	ELECTRODO A	ELECTRODO B	ELECTRODO C		ENTRADA	ELECTRODO A	ELECTRODO B	ELECTRODO C
SEMANA 1	1 8507	20 9915	182 9608	92 7449	SEMANA 1	1 0	1 0	1 0	1 0
SEMANA 2	1 4477	38 6182	117 1283	173 2457	SEMANA 2	1 6	0 3	2 4	0 3
SEMANA 3	2 3027	15 3575	127 3684	134 3739	SEMANA 3	0 6	1 6	2 1	0 5
SEMANA 4	4 5539	20 5690	34 1576	19 6018	SEMANA 4	0 2	1 0	28 7	22 4
SEMANA 5	1 9103	10 5661	12 6012	23 0291	SEMANA 5	0 9	3 9	210 8	16 2
SEMANA 6	3 7799	16 2761	15 8026	29 1164	SEMANA 6	0 2	1 7	134 0	10 1
SEMANA 7	2 2742	29 5332	37 4206	123 6345	SEMANA 7	0 7	0 5	23 9	0 6
SEMANA 8	3 3139	52 7901	159 3141	57 5819	SEMANA 8	0 3	0 2	1 3	2 6
SEMANA 9	1 7916	8 4960	45 2025	26 3566	SEMANA 9	1 1	6 1	16 4	12 4
SEMANA 10	3 7799	1 0559	28 5999	56 5600	SEMANA 10	0 2	395 2	40 9	2 7
SEMANA 11	2 2742	1 8480	26 9249	8 8268	SEMANA 11	0 7	129 0	46 2	110 4
SEMANA 12	2 0759	6 0213	26 5754	0 9574	SEMANA 12	0 8	12 2	47 4	9383 6
SEMANA 13	2 5589	1 8111	3 5287	3 4843	SEMANA 13	0 5	134 3	2588 3	708 5
SEMANA 14	3 9611	1 5727	1 6840	1 6381	SEMANA 14	0 2	178 2	11804 2	3205 6
SEMANA 15					SEMANA 15				
SEMANA 16					SEMANA 16				
SEMANA 17					SEMANA 17				
SEMANA 18	4 8477	1 3918	1 7615	1 0198	SEMANA 18	0 1	227 5	10787 9	8270 8
SEMANA 19	6 8981	3 3570	2 3958	1 7017	SEMANA 19	0 1	39 1	5831 8	2970 3
SEMANA 20	3 2146	2 0817	1 8930	3 5247	SEMANA 20	0 3	101 7	9341 8	692 4

TESIS CON FALLA DE ORIGEN EN LA TESIS NO SALE LA BEMBOJETA

Figura A.5.1

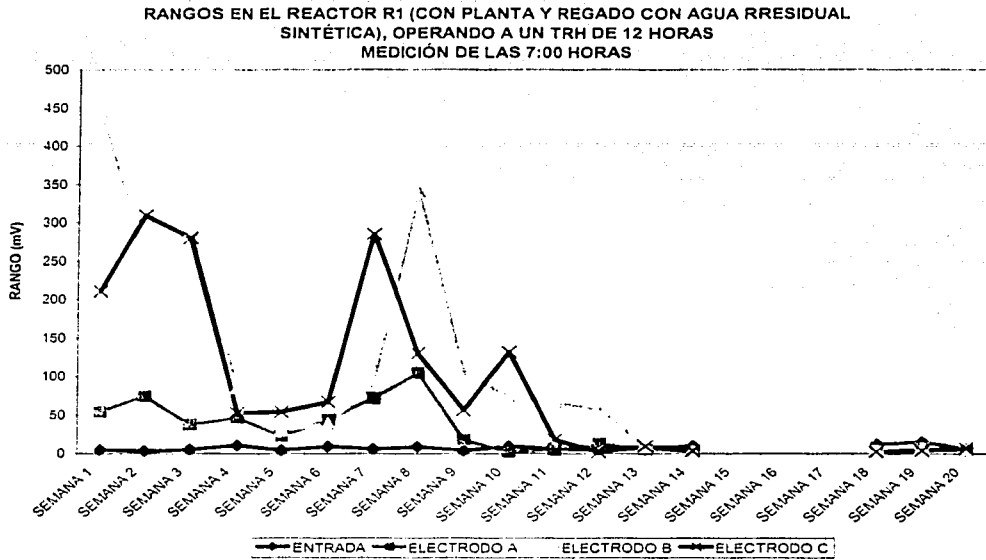
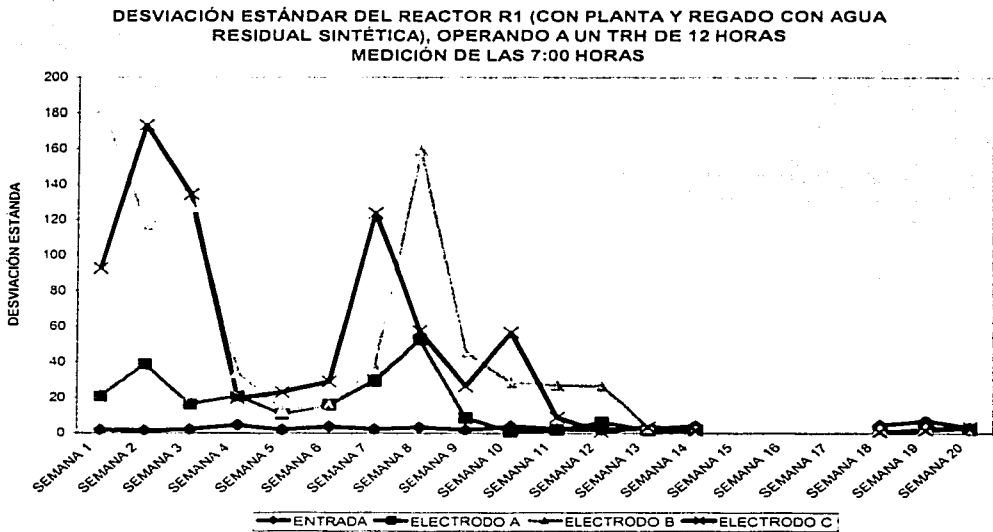


Figura A.5.2



TRONCO
FALLA DE CARGEN

Figura A.5.3

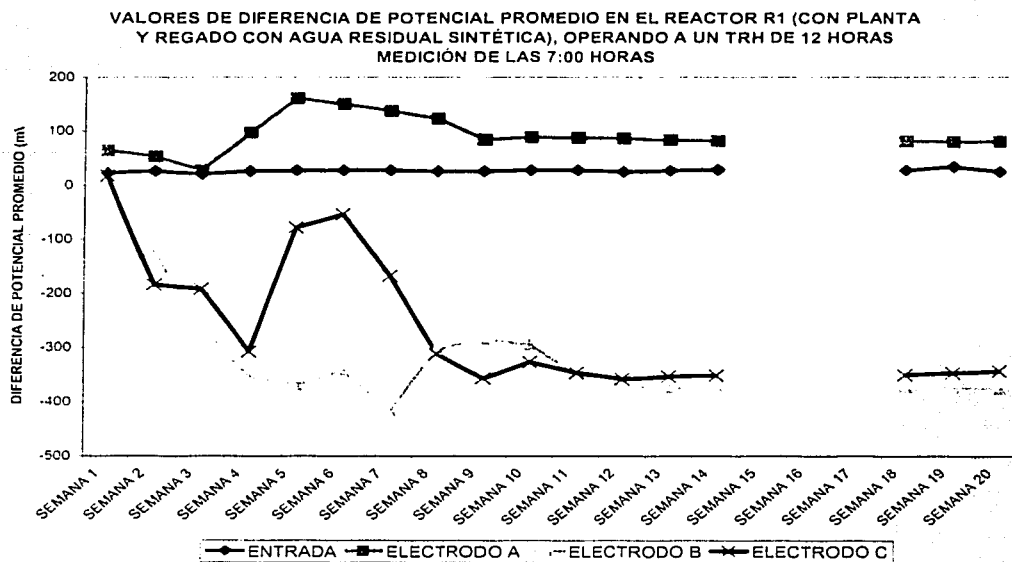
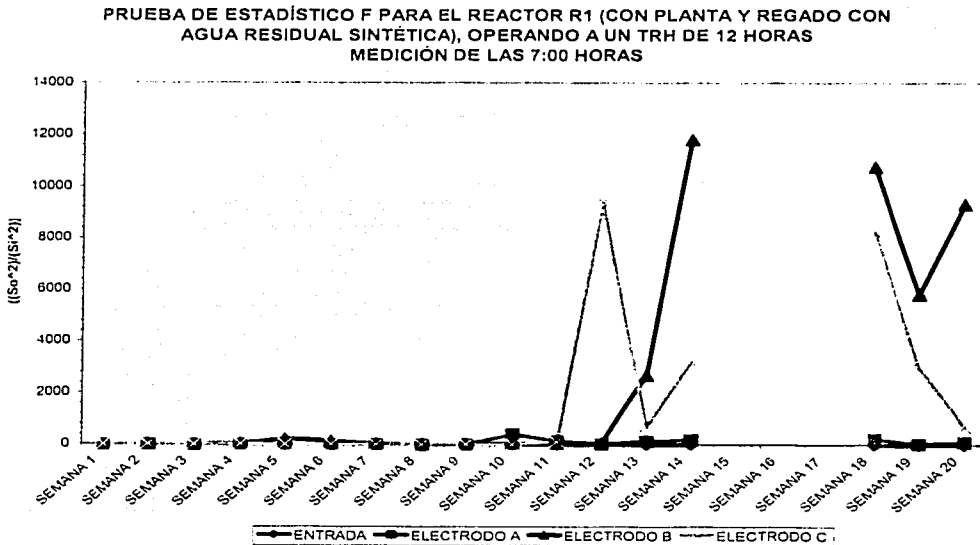


Figura A.5.4



TESIS DE GRADUACIÓN
FALLA DE ...

Figura A.5.5

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PROMEDIO EN EL ELECTRODO A (A 2 cm DE LA SUPERFICIE) EN EL REACTOR R1 (CON PLANTA Y REGADO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA), OPERANDO A UN TRH DE 12 HORAS

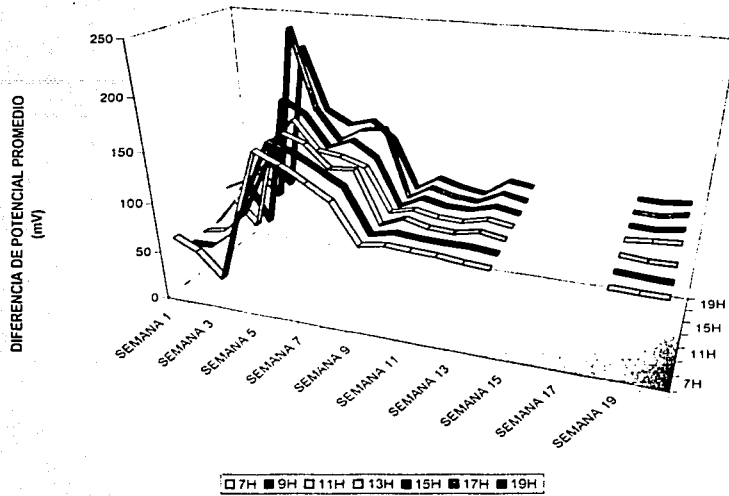
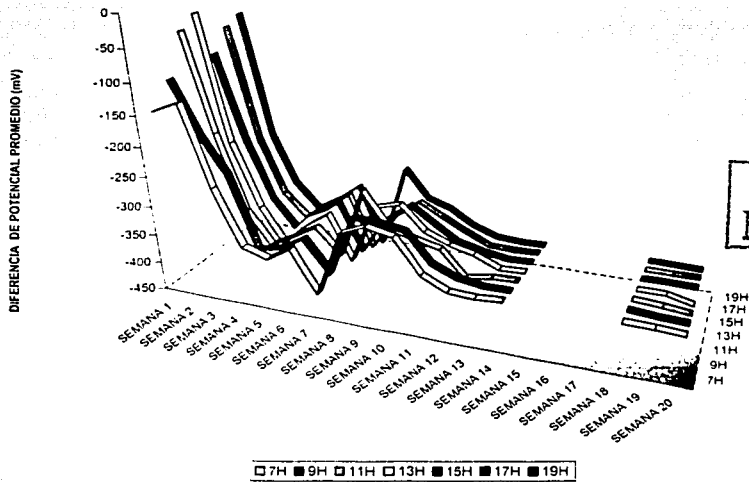


Figura A.5.6

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PROMEDIO EN EL ELECTRODO B (A 10 cm DE LA SUPERFICIE) EN EL REACTOR R1 (CON PLANTA Y REGADO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA), OPERANDO A UN TRH DE 12 HORAS



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura A.5.7

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PROMEDIO EN EL ELECTRODO C (A 30 cm DE LA SUPERFICIE) EN EL REACTOR R1 (CON PLANTA Y REGADO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA), OPERANDO A UN TRH DE 12 HORAS

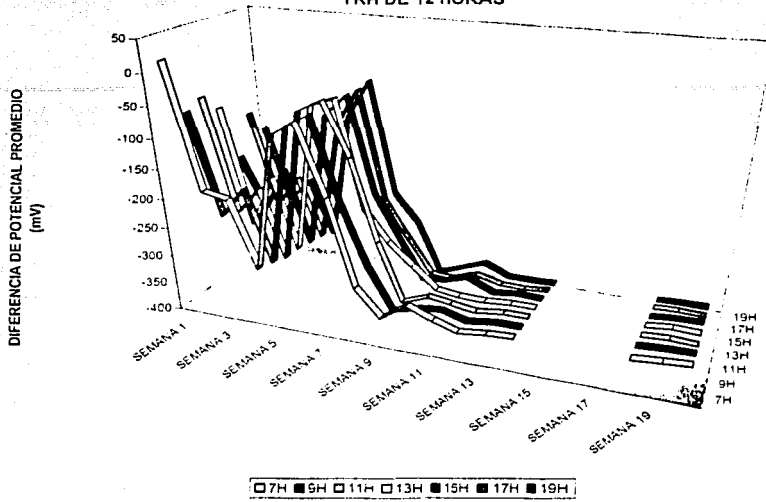
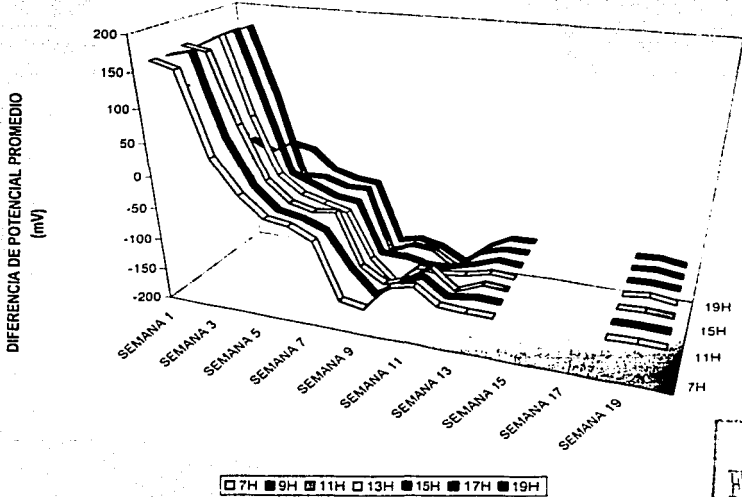


Figura A.5.8

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PROMEDIO EN EL ELECTRODO A (A 2 cm DE LA SUPERFICIE) EN EL REACTOR R2 (SIN PLANTA Y REGADO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA), OPERANDO A UN TRH DE 12 HORAS



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura A.5.9

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PROMEDIO EN EL ELECTRODO B (A 10 cm DE LA SUPERFICIE) EN EL REACTOR R2 (SIN PLANTA Y REGADO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA), OPERANDO A UN TRH DE 12 HORAS

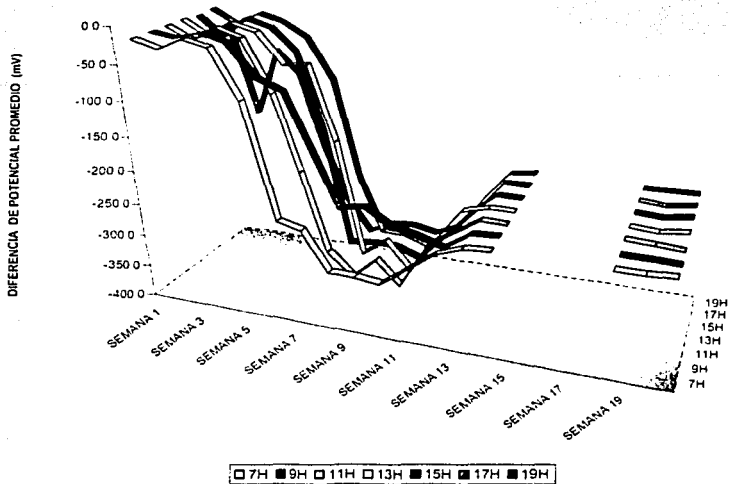
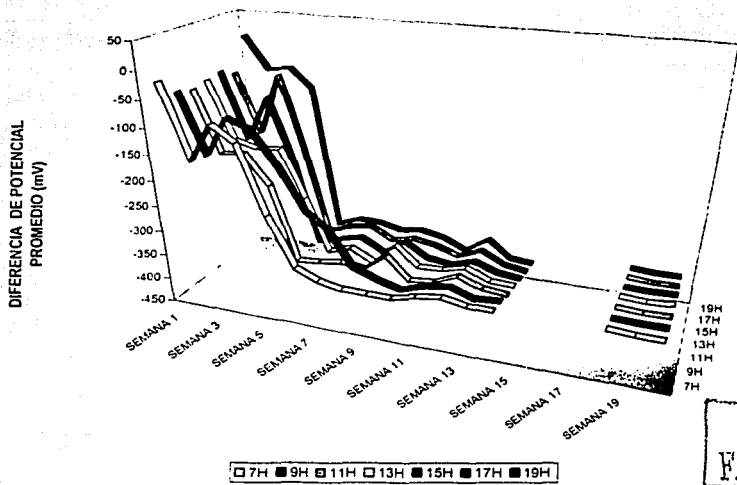


Figura A.5.10

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PROMEDIO EN EL ELECTRODO C (A 30 cm DE LA SUPERFICIE) EN EL REACTOR R2 (SIN PLANTA Y REGADO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA), OPERANDO A UN TRH DE 12 HORAS



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura A.5.11

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PROMEDIO EN EL ELECTRODO A (A 2 cm DE LA SUPERFICIE) EN EL REACTOR R3 (CON PLANTA Y REGADO CON AGUA CORRIENTE), OPERANDO A UN TRH DE 12 HORAS

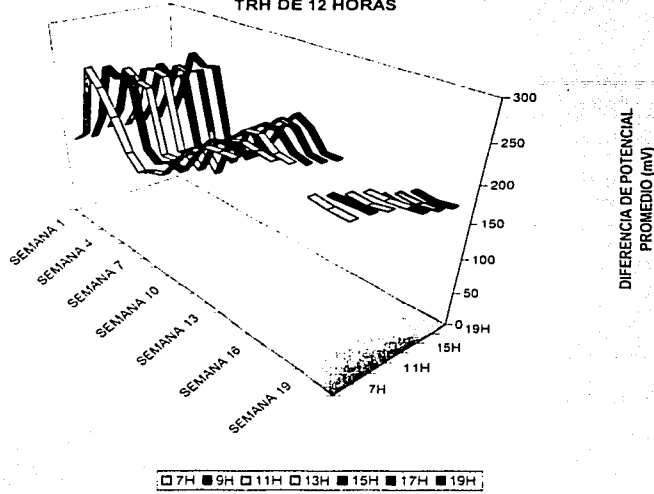
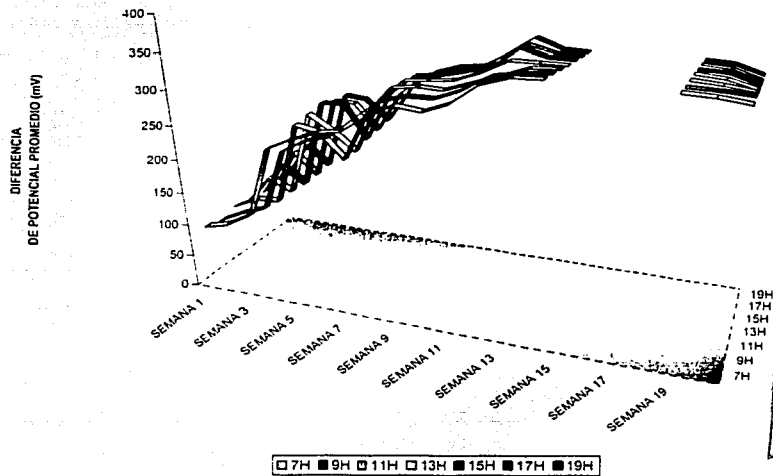


Figura A.5.12

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PROMEDIO EN EL ELECTRODO B (A 10 cm DE LA SUPERFICIE) EN EL REACTOR R3 (CON PLANTA Y REGADO CON AGUA CORRIENTE), OPERANDO A UN TRH DE 12 HORAS



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura A.5.13

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PROMEDIO EN EL ELECTRODO C (A 30 cm DE LA SUPERFICIE) EN EL REACTOR R3 (CON PLANTA Y REGADO CON AGUA CORRIENTE), OPERANDO A UN TRH DE 12 HORAS

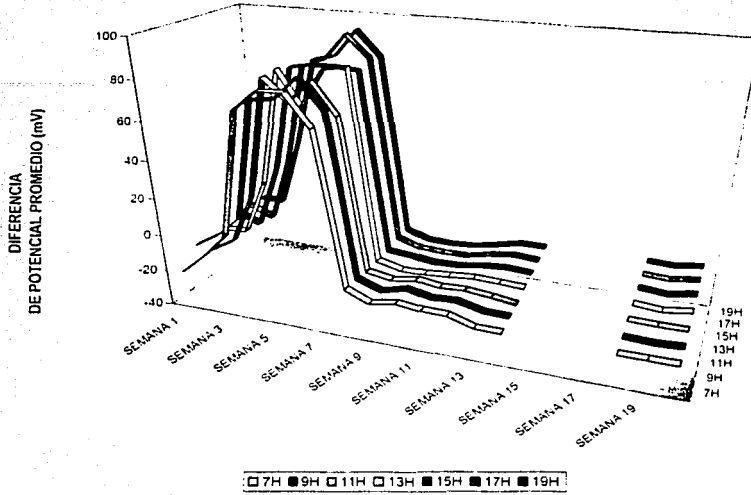
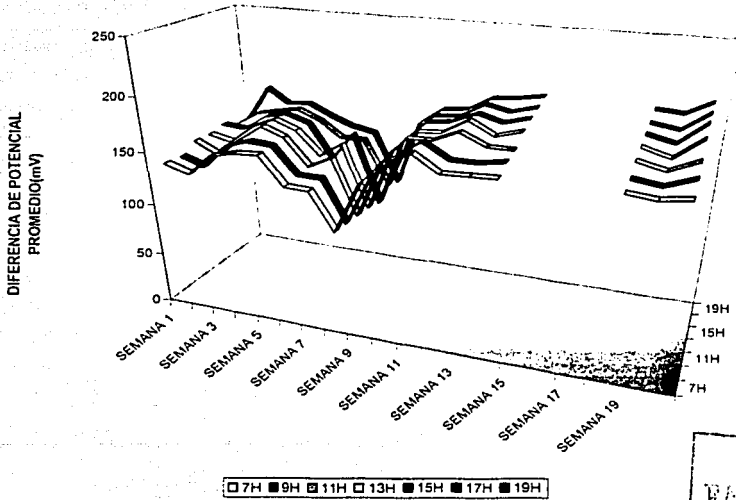


Figura A.5.14

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PROMEDIO EN EL ELECTRODO A (A 2 cm DE LA SUPERFICIE) EN EL REACTOR R4 (SIN PLANTA Y REGADO CON AGUA CORRIENTE), OPERANDO A UN TRH DE 12 HORAS



TESIS CON
FALLA DE CUBIEN

Figura A.5.15

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PROMEDIO EN EL ELECTRODO B (A 10 cm DE LA SUPERFICIE) EN EL REACTOR R4 (SIN PLANTA Y REGADO CON AGUA CORRIENTE), OPERANDO A UN TRH DE 12 HORAS

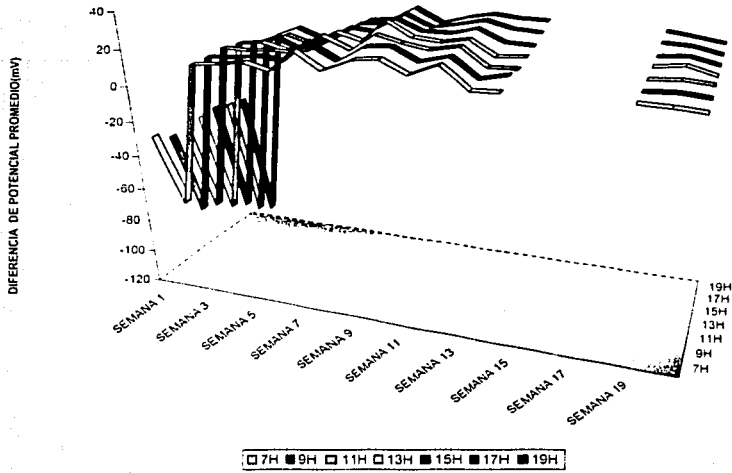
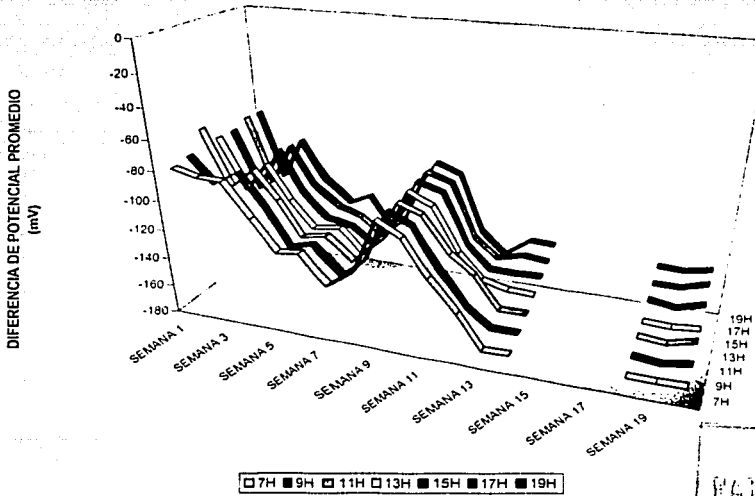


Figura A.5.16

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PROMEDIO EN EL ELECTRODO C (A 30 cm DE LA SUPERFICIE) EN EL REACTOR R4 (SIN PLANTA Y REGADO CON AGUA CORRIENTE), OPERANDO A UN TRH DE 12 HORAS



TESIS CON
FALLA DE PLAGIADO

Figura A.5.17

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PROMEDIO EN EL ELECTRODO A (A 2 cm DE LA SUPERFICIE)
EN EL REACTOR R1 (CON PLANTA Y REGADO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA),
OPERANDO A UN TRH DE 24 HORAS

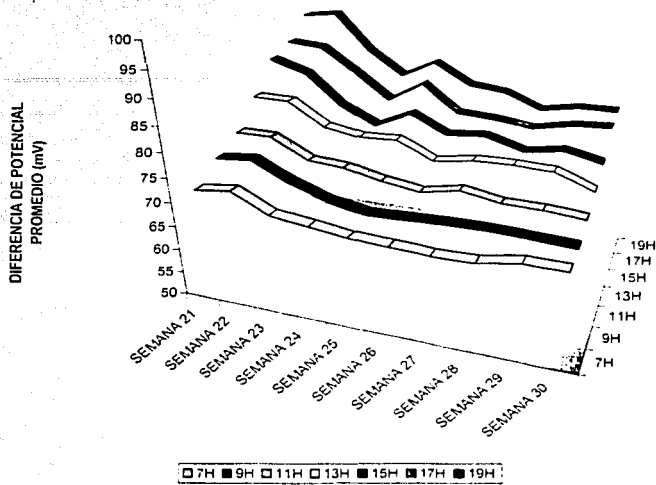
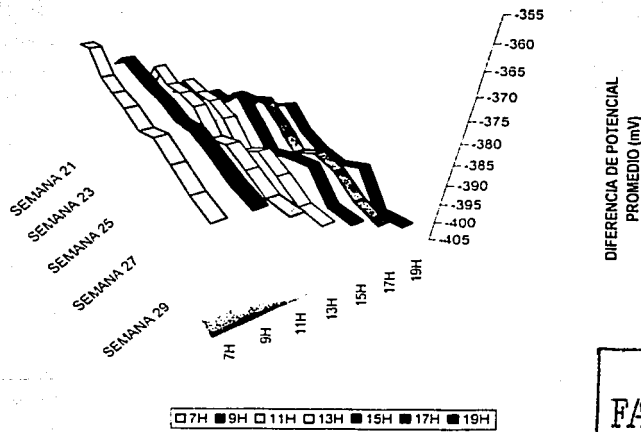


Figura A.5.18

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PROMEDIO EN EL ELECTRODO B (A 10 cm DE LA SUPERFICIE)
EN EL REACTOR R1 (CON PLANTA Y REGADO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA), OPERANDO
A UN TRH DE 24 HORAS



TESIS CON
FALLA DE COPIADO

Figura A.5.19

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PROMEDIO EN EL ELECTRODO C (A 30 cm DE LA SUPERFICIE) EN EL REACTOR R1 (CON PLANTA Y REGADO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA), OPERANDO A UN TRH DE 24 HORAS

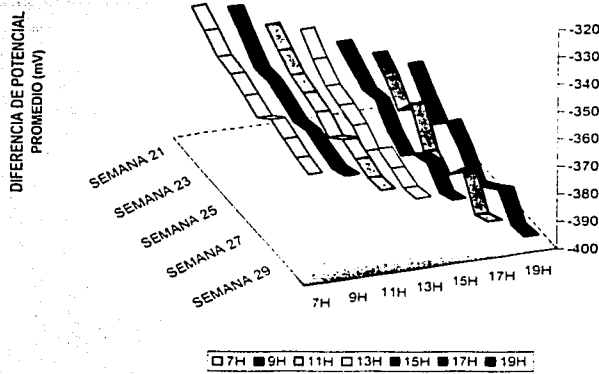
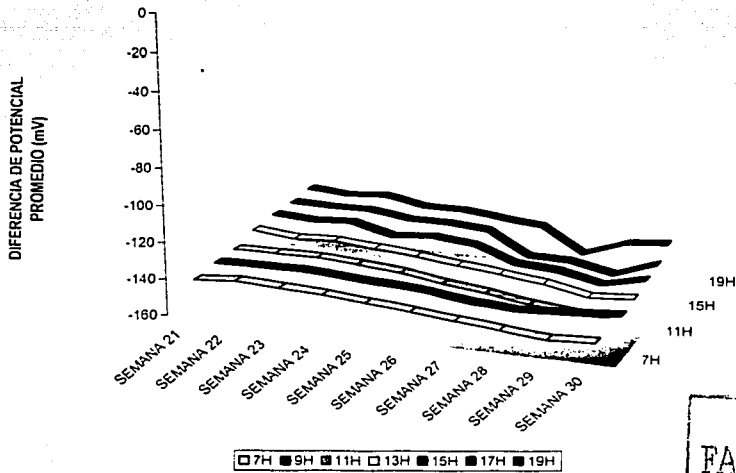


Figura A.5.20

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PROMEDIO EN EL ELECTRODO A (A 2 cm DE LA SUPERFICIE) EN EL REACTOR R2 (SIN PLANTA Y REGADO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA), OPERANDO A UN TRH DE 24 HORAS



TESIS CON
FALLA DE ORDEN

Figura A.5.21

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PROMEDIO EN EL ELECTRODO B (A 10 cm DE LA SUPERFICIE) EN EL REACTOR R2 (SIN PLANTA Y REGADO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA), OPERANDO A UN TRH DE 24 HORAS

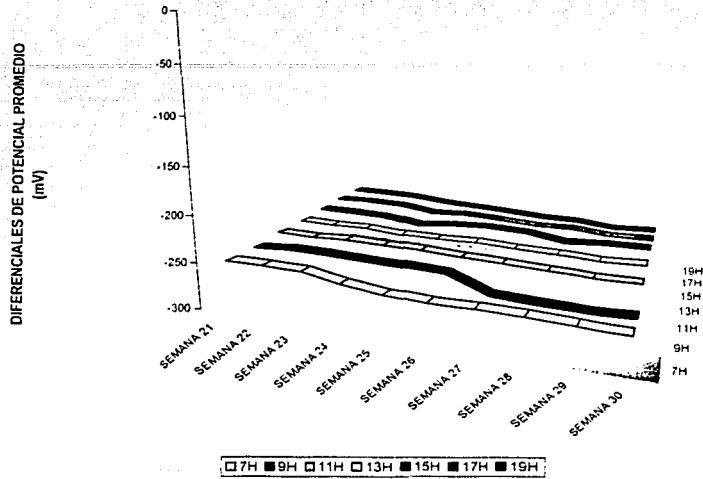
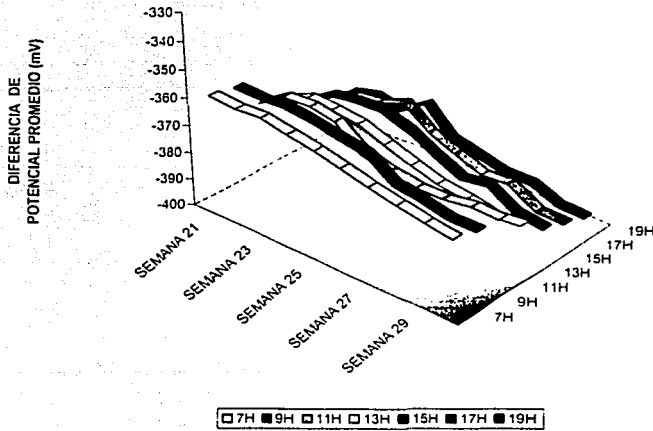


Figura A.5.22

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PROMEDIO EN EL ELECTRODO C (A 30 cm DE LA SUPERFICIE) EN EL REACTOR R2 (SIN PLANTA Y REGADO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA), OPERANDO A UN TRH DE 24 HORAS



TESIS CON
FALLA DE CARGEN

Figura A.5.23

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PROMEDIO EN EL ELECTRODO A (A 2 cm DE LA SUPERFICIE)
EN EL REACTOR R3 (CON PLANTA Y REGADO CON AGUA CORRIENTE), OPERANDO A UN
TRH DE 24 HORAS

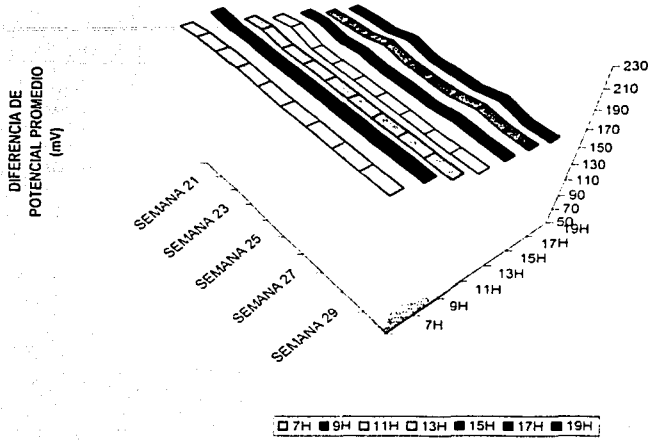
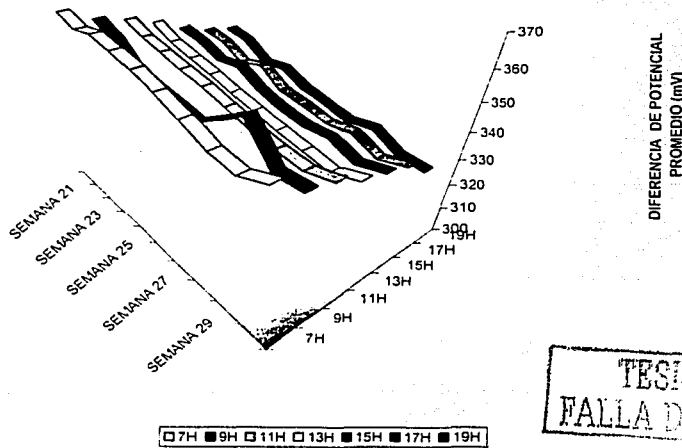


Figura A.5.24

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PROMEDIO EN EL ELECTRODO B (A 10 cm DE LA SUPERFICIE)
EN EL REACTOR R3 (CON PLANTA Y REGADO CON AGUA CORRIENTE), OPERANDO A UN TRH
DE 24 HORAS



TESIS CON
FALLA DE ORDEN

Figura A.5.25

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PROMEDIO EN EL ELECTRODO C (A 30 cm DE LA SUPERFICIE) EN EL REACTOR R3 (CON PLANTA Y REGADO CON AGUA CORRIENTE), OPERANDO A UN TRH DE 24 HORAS

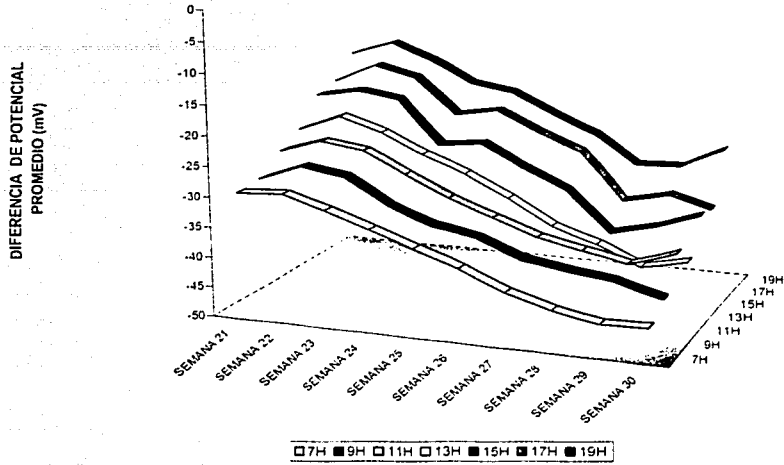
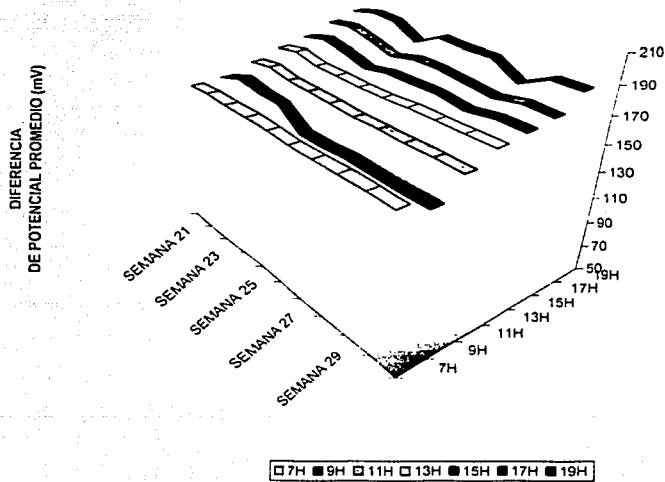


Figura A.5.26

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PROMEDIO EN EL ELECTRODO A (A 2 cm DE LA SUPERFICIE) EN EL REACTOR R4 (SIN PLANTA Y REGADO CON AGUA CORRIENTE), OPERANDO A UN TRH DE 24 HORAS



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura A.5.27

DIFERENCIAS DE POTENCIAL PROMEDIO EN EL ELECTRODO B (A 10 cm DE LA SUPERFICIE) EN EL REACTOR R4 (SIN PLANTA Y REGADO CON AGUA CORRIENTE), OPERANDO A UN TRH DE 24 HORAS

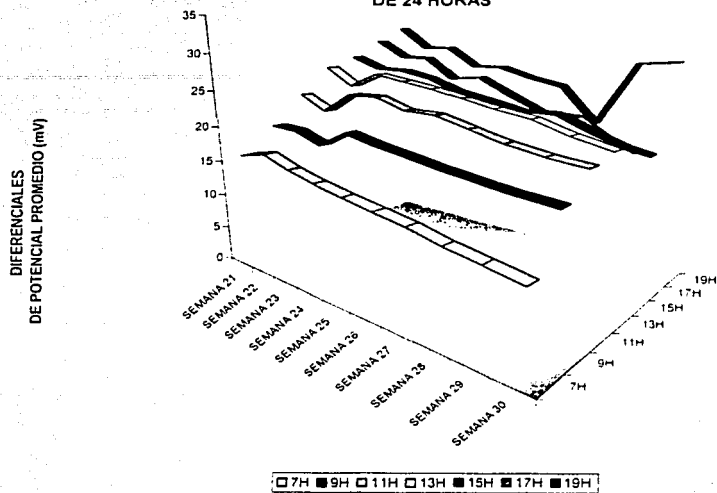
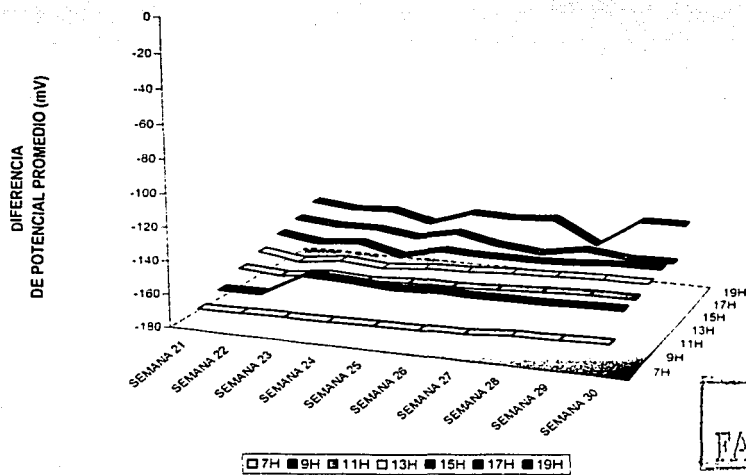


Figura A.5.28

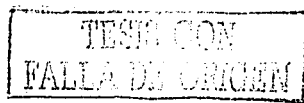
DIFERENCIAS DE POTENCIAL PROMEDIO EN EL ELECTRODO C (A 30 cm DE LA SUPERFICIE) EN EL REACTOR R4 (SIN PLANTA Y REGADO CON AGUA CORRIENTE), OPERANDO A UN TRH DE 24 HORAS



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

BIBLIOGRAFÍA

- APHA (1992). Standard methods for the examination of water and wastewater analysis. 19a. Ed. American Public Health Association. AWWA (American Water Works Association) and WPCF (Water pollution Control Federation). Washington, D.C. EEUUA.
- AMTE (2002). Especificaciones del agua. Asociación Mexicana de Trabajo en Equipo – Círculo de Control de Calidad "Delfines", de Cervecería Modelo, S.A. de C.V. Ganadores. En Memorias del XIII Concurso Nacional de Círculos de Control de Calidad. Acapulco, Guerrero. México.
- Bastian, R. K., Hammmmer, D. A. (1993). Chapter 5: The use of constructed wetlands for wasterwater treatment and reuse. En: "Constructed wetlands for quality water improvement. Editado por G. A. Moshiri. CRC Inc. Pp. 59-68. Boca Raton, Florida. EEUUA.
- Bishop, P.L., Eighmy, T.T. (1989). Aquatic waste water treatment using *Elodea nuttalli*. J. WPFC, 61(5):641-648.
- Brix, H. (1993). Wastewater treatment in constructed wetlands: System design, removal process and treatment, performance. En "Constructed wetlands for water quality improvement". Editado por G. A. Moshiri. Lewis Publishers. Michigan, EEUUA.
- Campbell, R. (1987). Ecología microbiana, Tr. Javier Jiménez Ortega. Ed. Limusa, Caps. 2, 3, 4 y 5, 264 p. México, D.F. México.
- CNA. (2003). Estadísticas de plantas de tratamiento de aguas residuales. Comisión Nacional del Agua. México, D.F., México.
- Conley, L.M. (1991). An assessment of the root zone method of wastewater treatment. JWPCF, 63:239.
- Cooper, P., Green, B. (1995). Reed bed treatment systems for sewage treatment in the United Kingdom - the first ten years experience. Wat. Environ. Res., 32(3):317-327.
- Durán-de-Bazúa, C., Luna-Pabello, V.M., Ramírez-Carrillo, H.F. (1998). Humedales artificiales de flujo horizontal y vertical. Patente 1998/010668. Registro ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. México D.F. México.
- Fenoglio, F.E. (2003). Transferencia y difusión de oxígeno en sistemas que simulan humedales artificiales. Tesis de grado. Maestría en Ciencias (Ciencias Químicas, Química Ambiental). UNAM, México, D.F. México.



- Fenoglio, F.E., Genescá, J., Durán-de-Bazúa, C. (2002). Reduction-Oxidation potentials evaluation as an indirect measurement for dissolved oxygen in artificial wetlands lab models. En PROCEEDINGS 8th INTERNATIONAL CONFERENCE ON WETLANDS 2002. International Water Association. Ashora, Tanzania. Sept. 11-19, 2002. Pp. 606-614.
- Haberl, R. (1997). Humedales construidos en Europa con énfasis en Austria. En "Tercer seminario internacional de expertos en tratamiento de efluentes industriales y residuos". Editado por C. Durán-de-Bazúa, L.I. Ramírez-Burgos. Pub. PIQAYQA, Facultad de Química, UNAM. Lid Impresores. ISBN 968-36-5876-8. México, D. F. México.
- Haberl, R., Perfler, R. (1991). Nutrient removal in a reed bed system, Wat. Sci. Tech., 23: 729-737.
- Hammer, D. A. (1993). Design constructed wetlands system to treat agricultural nonpoint source pollution. En "Created and natural wetlands for controlling nonpoint source pollution". Capítulo 4. US EPA. Editado por R. K. Olson, C. K. Smoley. Pp. 71-111. Washington, D.C. EEUUA.
- Hammer, D. A., Bastian, R. K. (1989). Capítulo 2: Wetlands ecosystems: Natural water purifiers?. En "Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural". Editado por D. A. Hammer. Lewis Publishers Inc. Pp. 5-19. Boca Ratón, Florida, EEUUA.
- Hu, K. (1991). Overview: design of subsurface flow constructed wetland systems. Shangai Environ. Sci., 8(9): 7-12.
- Lord, R. D. (1982). Uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales, Recopilación. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. Serie Bibliográfica No. 1. T. S. Schoor, Ed. México, D.F., México.
- Luna-Pabello, V. M., Durán, C., Ramírez, H., Fenoglio L., Sánchez, H. (1997). Los humedales artificiales. Una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales. Anuario Latinoamericano de Educación Química, ALDEQ. Pp. 51-56. San Luis, Argentina.
- Manahan, S. E. (2002). Introduction to Environmental Chemistry. Curso de Posgrado Intensivo. Material didáctico. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas y PIQAYQA, Facultad de Química, UNAM. México, D.F., México.
- Miranda, R. M. (2000). Desarrollo, situación actual y aplicaciones de los humedales artificiales de flujo horizontal en México. Tesis de licenciatura. Facultad de Química, UNAM. México, D. F., México.

- Muhlia, A. (2002). Comunicación personal. Laboratorio de Radiación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. México D.F. México.
- Perfler, R., Haberl, R. (1994). Actual experiences with the use of reed bed systems for wastewater treatment in single households, *Wat. Sci. Tech.*, 28(10): 141-148.
- Perfler, R., Haberl, R. (1995). Reed bed systems for water pollution control in rural areas, 3rd. Intl. Conf. Appropriate Waste Mgmt. Technologies for Developing Countries, NEERI, Nagpur, India.
- Ramírez, H., Fenoglio L., Durán, C., Luna-Pabello, V. M. (1997). Evaluación de la conductividad eléctrica y eficiencia de remoción de materia orgánica en columnas empacadas con grava. En: Memorias del Tercer Seminario Internacional de Expertos en el Tratamiento de Efluentes Industriales y Residuos. Editado por C. Durán-de-Bazúa, L.I. Ramírez-Burgos. Pub. PIQAYQA, Facultad de Química, UNAM. Lid Impresores. ISBN 968-36-5876-8. Pp. 191-196. México, D. F. México.
- Rivera, F., Calderón, A. (1993). Biotratamiento de aguas negras, *ICYT*, 15(203):12-15.
- Robles, E., Gallegos, M., Calderón, A., Sainz, G. (1993). Sistema de tratamiento de lechos de raíces: Remoción de materia orgánica, *ICYT*, 15(203):26-28.
- Reed, S.C. (1992). Constructed wetland design – the first generation. *Wat. Environ. Res.*, 64(6):776-782.
- Rodríguez-Monroy, J. (2003). Remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales de flujo vertical a escala de banco. Tesis de licenciatura en revisión. Facultad de Química. UNAM. México D. F. México.
- Rodríguez, A. y Varela, E. (2003). Estudio del comportamiento de humedales artificiales como reactores de flujo pistón: alcance de la estabilidad. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores, Zaragoza. UNAM. México D. F. México.
- Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P.F., Haberl, R., Perfler, R., Laber, J. (1998). Removal mechanisms and types of constructed wetlands. En "Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe". Backhuys Publishers, Leiden The Netherlands. Pp. 17-66.
- Zirschky, D., Reed, S.C. (1988). The use of duckweed for wastewater treatment. *J. WPFC*, 60(7):1253-1258.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN