## EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE MATERIALES ESTRUCTURADOS: METÁLICO, POLIMÉRICO Y CERÁMICO, PARA EL TRATAMIENTO DE GASES ÁCIDOS

Araceli SALAZAR<sup>1,2</sup>, Rosa Hilda CHÁVEZ<sup>1\*</sup>, Óscar OLEA<sup>2</sup> y Dora SOLÍS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. Carretera México-Toluca s/n, La Marquesa, Ocoyoacac, Edo. de México, C.P 52750, México.

<sup>2</sup> Facultad de Química, UAEM. Toluca, Estado de México, CP 50200 México

\*Autora responsable: rosahilda.chavez@inin.gob.mx

(Recibido junio 2012, aceptado enero 2013)

Palabras clave: materiales contactores líquido-gas, propiedades fIsicoquímicas, empaques estructurados

### RESUMEN

Se estudian las propiedades fisicoquímicas de tres materiales estructurados: metálico, polimérico y cerámico, de la marca Sulzer Brothers Limited, para la separación de gases ácidos, mediante un proceso de absorción en solución acuosa de monoetanolamina (MEA), al 30 % en peso. Se determinaron las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión, de los materiales, así como la composición química y la morfología del producto obtenido; usando diferentes técnicas de caracterización tales como: 1) mecánica, de acuerdo con el procedimiento normalizado ASTM E384-1990, 2) química, a través de la resistencia a la corrosión en presencia de una celda electroquímica, en solución acuosa de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 1N, mediante ASTM G5-1999, 3) morfológica mediante la microscopía electrónica de barrido y 4) separación, mediante la técnica de cromatografía de gases para determinar la absorción del CO<sub>2</sub> por la MEA. El material cerámico resultó ser el más duro con valor de 700 HK y resistencia a la tensión de 90 MPa; así mismo presentó resistencia a la corrosión de 10.28 mpy, eficiencia de separación del 74 % de CO<sub>2</sub>, a los 10 minutos. El material metálico presentó dureza de 190 HK y fue el más resistente a la tensión, con 831 MPa y resistencia a la corrosión de 780.4x10<sup>-6</sup> mpy (milésimas de pulgada por año); así mismo promovió una eficiencia de separación de CO<sub>2</sub> del 90 % durante los 10 minutos de operación. El material polimérico presentó dureza de 20 HK y tensión de 35 MPa, y no sufrió cambio superficial con el ataque electroquímico de 282.4x10<sup>-6</sup> mpy y eficiencia de separación del 88 %. Por lo anterior el polimérico resultó ser el más dúctil, con superficie lisa y de mayor resistencia al H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. El material metálico fue el de mayor resistencia a la deformación plástica y con mayor superficie corrugada y el segundo en resistencia en presencia del H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Por todo lo anterior, se recomiendan el material metálico por su mayor separación en la reducción de los gases ácidos y al material polimérico por su mayor resistencia química.

Keywords: liquid-gas contactor materials, physicochemical properties, structured packing

#### A. Salazar et al.

#### ABSTRACT

In this work the physicochemical properties of three structured materials: metallic, polymeric and ceramic, from Sulzer Brothers Limited brand, are studied in order to removal sour gases, by absorption process, in aqueous solution of Monoethanolamine (MEA), at 30 % weight. Mechanical properties, chemical composition, morphology and corrosion resistance were determined, using different characterization techniques, such as: 1) mechanically, according to standard procedures ASTM E384-1990, 2) chemically, by the corrosion resistance in the presence of an electrochemical cell, in aqueous solution of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 1N, by ASTM G5-1999, 3) morphologically by scanning electron microscopy technique, and 4) efficiency of separation, by the gas chromatography technique in order to determine the chemical absorption of CO<sub>2</sub> by MEA. The ceramic material was the hardest with 700 HK value and tensile strength of 90 MPa, likewise showed resistance to corrosion of 10.28 mpy, separation efficiency of 74 % CO<sub>2</sub>, at 10 minutes. The metallic material had a hardness of 190 HK and it was the most resistant of tension, with 831 MPa, and corrosion resistance of  $780.4 \times 10^{-6}$  mpy, likewise promoted CO<sub>2</sub> separation efficiency of 90 % during the evaluation. The polymeric material presented hardness of 20 HK and 35 MPa and it was not suffered surface change with electrochemical attack, with 282.4×10<sup>-6</sup> mpy, and separation efficiency of 88 %. Therefore the polymer was the most ductile, with smooth surface and greater resistance with H2SO4. The metal material was more resistant to plastic deformation and more corrugated surface and the second resistance in the presence of acid medium in aqueous solutions. For all the above, the metallic material is recommended by its greater separation in the reduction of acid gases and the polymer due to its greater chemical resistance.

## **INTRODUCCIÓN**

Actualmente los gases ácidos presentes en la atmósfera se han incrementado debido a las actividades humanas, principalmente por la combustión de carbón, petróleo y gas natural liberando el carbono almacenado de los combustibles fósiles en forma de  $CO_2$  (Legoett 1996, Maceiras *et al.* 2008).

Por lo tanto ya que no se ve factible la reducción en el uso de combustibles fósiles, el reto que la humanidad enfrenta hoy en día, es abatir las emisiones contaminantes a la atmósfera ya que provocan el calentamiento global del planeta y la degradación de los ecosistemas (Sargent 1997, IPCC 2001).

Para saber los límites permisibles de contaminantes gaseosos emitidos a la atmósfera por fuentes fijas, se trabajó bajo el marco definido en la norma NOM-085-SEMARNAT-1994, la que refiere a los límites máximos permitidos de contaminación atmosférica de fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles, sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones.

La disminución de la contaminación ambiental ha establecido la necesidad de cumplir la legislación ambiental, a través de reducir las emisiones contaminantes liberadas a la atmósfera, mediante la mejora de algunos procesos industriales, tal como el proceso de absorción química con materiales de contacto líquido gas del tipo estructurado identificados como materiales de alta eficiencia de separación y resistencia química y mecánica; lo que ha motivado el estudio de los materiales de contacto líquido gas, los cuales son los elementos que van a estar en contacto directo con los gases ácidos y con solución de monoetanolamina (MEA) (Brunnazie 2002, Chávez y Guadarrama 2004, Chavez *et al.* 2005).

En el proceso de absorción, para el tratamiento de los gases ácidos se ha demostrado que la MEA en solución acuosa al 30 % en peso, resulta viable técnica y económicamente (Maceiras *et al.* 2008).

Los materiales estructurados, empleados como internos de columna, se fabrican en materiales metálicos, cerámicos y poliméricos. Éstos ofrecen grandes áreas de contacto, alta porosidad, baja caída de presión y buena transferencia de masa para la separación de mezclas gaseosas (Chávez y Guadarrama 2004).

En el tratamiento de los gases ácidos se presentan importantes problemas de corrosión en los materiales de contacto líquido gas, tales como desgaste y desprendimiento de material, provocando taponamiento y deterioro en la operación de separación, disminuyendo la eficiencia en el proceso de absorción (Kladkaew *et al.* 2009).

No se disponen de estudios previos que caractericen los distintos materiales en la reducción de contaminantes liberados a la atmósfera, ni que evalúen la interacción de los materiales en presencia de gases ácidos. En contraste existen estudios sobre la eficacia de la MEA y de otros disolventes para el tratamiento de los gases ácidos en absorción física y química (Jou *et al.* 1995, Lunsford y Bullin 1996).

Para evaluar la interacción de los materiales, de contacto líquido gas, en presencia de gases ácidos, se consideraron dos aspectos: i) la funcionalidad de los materiales en la separación de contaminantes y ii) sus propiedades fisicoquímicas tales como la resistencia al desgaste por abrasión (corrosión) y la resistencia mecánica (dureza), mediante las cuales se determina su tiempo de vida útil y los problemas de corrosión, así como la resistencia a la tensión la cual proporciona información de la deformación y a la ruptura bajo carga y la ductilidad y la plasticidad de los materiales (Askeland *et al.* 2004).

## METODOLOGÍA

Para la separación del bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), se emplearon tres columnas de absorción, empacada cada una con uno de los materiales del estudio. La operación consistió en la recirculación de la solución acuosa de MEA, al 30 % en peso, durante 70 minutos. Se tomaron muestras de la corriente gaseosa en la alimentación al inicio de la operación y en la salida cada 10 minutos durante toda la operación, para evaluar la eficiencia de separación en la reducción del CO<sub>2</sub>. Las muestras se almacenaron en contenedores metálicos, para su análisis mediante un cromatógrafo de gases, marca *Varian*, modelo 3700 m (ver **Cuadro I**). Para determinar la eficiencia de separación con cada material de contacto, se cuantificó la concentración de  $CO_2$  del flujo de alimentación (y<sub>1</sub>) y del de salida (y<sub>2</sub>), aplicando la ecuación 1. El flujo líquido de salida de la columna se depositó en un tanque de almacenamiento y recirculado nuevamente a la columna para la absorción del  $CO_2$  (ver **Fig. 1**). Las columnas son de vidrio *pyrex*, con dimensiones de 0.1016 m de diámetro y 1 m de altura, con área transversal de 0.0081 m<sup>2</sup>. La alimentación se mantuvo constante a un flujo líquido de 5 L/min, de solución acuosa de MEA, al 30 % en peso.

Eficiencia de separación de 
$$CO_2 = \left(\frac{y_1 - y_2}{y_1}\right) \times 100$$
 (1)

Para evaluar las propiedades mecánicas de dureza, y tensión, se realizaron pruebas con base a los procedimientos normalizados de la American Society for Testing and Materials (ASTM), los cuales se presentan a continuación:

#### Dureza

Esta propiedad fue analizada de acuerdo con la Norma ASTM E-384-90, encapsulándose las muestras con material termoplástico *lucita*, en prensa marca *Buehler*, a temperatura de 150 °C y presión de 27.6 MPa (4000 lb/plg<sup>2</sup>). Mediante pulidora de marca *Buehler*, se logró acabado fino con lijas de carburo de silicio de tamaños de grano 240, 320, 400 y 600 milésimas de pulgada (ver **Cuadro II**). Posteriormente se pulieron hasta acabado especular con alúmina, en paño *microcloth*. La medición de dureza se realizó a temperatura ambiente de 23 °C, con un microduróme-

CUADRO I. EFICIENCIA DE ABSORCIÓN DE CO<sub>2</sub>, USANDO MATERIALES DE CONTACTO LÍQUIDO GAS: METÁLICO, POLIMÉRICO Y CERÁMICO

Tiempo en minutos	% de absorción de CO <sub>2</sub> , con material metálico	% de absorción de CO <sub>2</sub> ,con material polimérico	% de absorción de CO <sub>2</sub> , con material cerámico			
1	95	93	84			
5	93	92	80			
10	90	88	74			
20	89	84	70			
30	77	76	68			
40	74	64	62			
50	67	52	50			
60	66	46	44			
70	55	35	32			
Observaciones Superficie rugosa y de may área de contacto en el proce de transferencia de masa.		Material hidrofóbico, con ma- yor tiempo para que se formara la película líquida.	Material poroso, hidrofílico, de fácil humectación, ofrece menor área de contacto entre el líquido y el gas.			



tro de marca *Shimadzu y* un penetrador de diamante para ensayos de microdureza Knoop (HK).

#### Tensión

Para determinar las característica mecánica de tensión, se empleó el procedimiento de ensayo ASTM E8-1998, preparando probetas de 2 pulgadas (0.0508 m) de longitud para cada uno de los tres materiales, utilizando un equipo máquina universal para ensayos de tensión, de marca Monsanto. La velocidad de prueba empleada fue de 5 mm/minuto y capacidad de 0 a 10000 MPa.

#### Corrosión

La resistencia a la corrosión de los tres materiales se analizó mediante una celda electroquímica de 500 mL, modelo K47, de 110 volts, en solución de ácido sulfú-

CUADRO II. MEDIDAS DE TAMAÑO DE GRANO DE LAS LIJAS ABRASIVAS PARA PULIDO

Denominación comercial	Medida del tamaño de grano en 0.001 mm					
180	80					
220	60					
240	55					
280	35					
320	30					
400	17					
500	13					
600	9					

rico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>),1N, empleando un potenciostato-galvanostato marca EG&G, modelo 273-10, de acuerdo con el procedimiento normalizado ASTM G5-1999, con velocidad de barrido de 1 V/s y potencial de barrido de -800 a + 1200 mV. La densidad de corrosión (Icorr) se determinó empleando el método de extrapolación *Tafel*, en el que el potencial de barrido controlado se aplicó a la muestra bajo estudio, a partir del potencial de corrosión aplicado entre ánodo y cátodo, variando el potencial en cientos de milivolts bajo procedimiento desarrollado por el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ): P.SC(LC)-06, 1999.

#### Morfología

El análisis de la morfología de las tres muestras se determinó empleando un microscopio electrónico de barrido (MEB), de marca *JEOL JSM 6510LV*, con electrones secundarios para el material metálico, y electrones retrodispersados, para los materiales polimérico y cerámico. Se empleó una tensión de 5 - 20 kV, antes y después de la prueba de corrosión (ver **Figs. 2a**, **3a**, **4a**, para antes y **Figs. 2b**, **3b**, **4b**, para después). La composición química elemental se determinó en forma puntual por espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDS), acoplada al SEM (ver **Cuadro III**).

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los resultados que se discuten a continuación, se obtuvieron comparando el grado de separación, a



**Fig.2.** Micrografía SEM de la superficie del material metálico a 1000 X, (a) antes, (b) después, de la prueba de corrosión



Fig.3. Micrografía SEM del material polimérico a 1000 X, (a) antes, (b) después, de la prueba de corrosión



Fig.4. Micrografía MEB del material cerámico a1000 X, (a) antes, (b) después, del ensayo de corrosión

las mismas condiciones de operación con todos los materiales.

# 1. Interacción de los materiales empaques estructurados: metálico, polimérico y cerámico para el tratamiento del CO<sub>2</sub>:

### Material metálico

Este material promovió una absorción de  $CO_2$ de 95 % con MEA al minuto de operación; mientras que a los 70 minutos fue del 55 % (ver **Cuadro I**). El material metálico resultó más conveniente en el tratamiento de gases ácidos por lograrse el mayor grado de separación de 90 % a los 10 minutos de iniciada la operación. En este tiempo se presenta la mayor producción de energía térmica por ser un proceso exotérmico.

#### Material polimérico

Este material hizo posible la absorción del 88 % de CO<sub>2</sub> al minuto de operación de la columna, comportándose muy similar al material metálico durante los primeros 30 minutos de operación de la columna y disminuyéndose el grado de absorción a los 40 minutos, por lo que a los 70 minutos, se absorbió el 35 % del gas. Esto es debido a su propiedad hidrofóbica (ver **Cuadro I**) y a su superficie de rugosidad

CUADRO III. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS TRES MATERIALES

Material de contacto	Al	Mn	S	С	Р	Si	Cr	Ni	K	0	Fe
Metálico (% en peso) Polimérico (% en peso)		0.7	0.02	0.7 87	0.01	0.01	18	13			68
Cerámico (% en peso)	16.6					22.9			1.7	58.8	

Nota: El porcentaje en peso faltante para completar el 100% en el material polimérico, corresponde al elemento hidrógeno, el cual no fue determinado por la técnica de EDS, sino con la prueba de temperatura de fusión a 170 °C.

promedio ( $R_a$ ), de 0.15 mm. La absorción a los 10 minutos de iniciada la operación fue de 88 %.

#### Material cerámico

El cerámico fue el que promovió la menor absorción de  $CO_2$ , en un valor de 84 % al minuto de operación de la columna, disminuyendo a partir de los 10 minutos y manteniéndose por debajo del material polimérico. A los 70 minutos se absorbió el 30 % del  $CO_2$  (ver **Cuadro I**). Lo anterior fue consecuencia de su alta porosidad. Su utilización se restringe a procesos de manejo de bajos flujos, de poco desgaste, ya que se debe evitar la tensión excesiva y los esfuerzos mecánicos, para prevenir la ruptura. La absorción a los 10 minutos fue de 74 %.

### 2. Propiedades fisicoquímicas:

#### Dureza

El material metálico presentó una dureza de 190 HK, el polimérico de 120 HK y el cerámico de 700 HK. La dureza media del material se debe a su composición elemental, favoreciendo asimismo que éste presente baja deformación. El polimérico presentó la mayor resistencia a la ruptura sin dejar sedimentos dentro de la columna, aunque su baja dureza lo hace el más susceptible al desgaste por abrasión. El cerámico fue el más duro de los tres y al mismo tiempo con la mayor susceptibilidad a erosionarse, provocando taponamiento en la columna durante la operación, condición que se comprobó en la prueba de tensión y durante la limpieza de la columna de absorción.

## Morfología

En la **figura 2a** se observa la morfología antes de la inmersión con el  $H_2SO_4$ , presentándose rayado en la superficie del material, en tanto que en la **figura 2b** se observa la superficie del mismo material después de haberse puesto en contacto con el medio ácido, en la última se presenta la superficie lisa debido al ataque con el  $H_2SO_4$ , lo anterior debido a que en este material se formó, durante el proceso de separación, una película líquida delgada en la superficie del mismo y favorece la absorción química de los gases mediante la MEA.

La **figura 3a** muestra la superficie del material polimérico antes de la inmersión en el  $H_2SO_4$  y la **figura 3b** después del contacto en el medio ácido. En éste se aprecia que la superficie del material no presentó cambios sustanciales después del ensayo de corrosión, razón por la cual se mantienen las características de absorción similares a las reportadas en el material metálico.

En la **figura 4a** se aprecia el material cerámico cuya superficie porosa está ocluida con sedimentos antes de la inmersión en el  $H_2SO_4$  y en la **figura 4b** se observa la deformación en los poros del material ya sin oclusión, después del contacto con el medio ácido.

### Tensión

En la **figura 5** se presenta el comportamiento de elasticidad y plasticidad de los tres materiales, así como la carga de ruptura, % de elongación y el módulo de elasticidad. El material metálico resistió 831 MPa con una pequeña zona de deformación elástica de 0 a 700 MPa (0 a 3 % de elongación) y una zona plástica de 700 a 831 MPa (3 a 20 % de elongación), el polimérico resistió 35 MPa, cuya deformación elástica fue de 0 a 15 MPa (0 a 30 % de elongación), deformación plástica de 15 a 30 MPa (30 a 55 % de elongación), el cerámico tuvo leve deformado elástico, su elongación fue tan sólo de 0.15 %, con resistencia a la tensión de 78 MPa. El material metálico fue el más resistente a la tensión.

### Corrosión

Por medio del ensayo electroquímico ASTM G5 1999, se determinó el tiempo en el cual los materiales sufrieron ataque químico al estar en contacto con los gases ácidos y con el cual se estableció el tiempo de vida útil de los materiales. El material metálico resistió 780.4 × 10<sup>-6</sup> mpy (milésimas de pulgada por año), con intensidad de corriente, Icorr= 2.035 mm; el polimérico soportó 282.4 × 10<sup>-6</sup> mpy, e Icorr= 2.035 mm; y el cerámico 282.4 × 10<sup>-6</sup> mpy, e Icorr=10.62 mm.



Fig. 5. Diagrama esfuerzo deformación de los materiales: metálico, polimérico y cerámico

# Composición química

El cuadro III contiene la composición química, en porciento en peso, determinada con una desviación estándar de 1 en un microscopio electrónico de barrido (JEOL JSM 6510LV) técnica MEB-EDS, cuantificada mediante la técnica de EDS, acoplada al MEB, para conocer la cuantificación de los elementos constituventes de cada muestra. En el material metálico se encontraron los siguientes elementos: cromo, níquel y molibdeno; elementos constituyentes del acero inoxidable 316, (ver figura 6a para antes y 6b para después de la inmersión en medio ácido). La composición del material polimérico consta de carbono e hidrógeno; este último no fue detectado por la técnica EDS, por lo que adicionalmente se realizó la prueba de temperatura de fusión a 170 °C, (ver figura 7a para antes y 7b para después de la inmersión en medio ácido). En la composición química del material cerámico se determinaron los elementos: aluminio, silicio, oxígeno y potasio, elementos propios de un aluminosilicato (ver figura 8a para antes y 8b para después de la inmersión en medio ácido).

### CONCLUSIONES

El estudio de la interacción de los materiales de empaque estructurados en el proceso de absorción del  $CO_2$ , en la columna de absorción, permitió determinar que mientras los tiempos de operación sean tan cortos como 10 minutos, los tres materiales permitieron que con la MEA se cumpliera con los niveles máximos de emisiones permitidos bajo la norma NOM-085-SEMARNAT-1994, aunque en procesos reales que utilizan tiempos mayores de operación, el material metálico fue el más adecuado.

El material metálico por su composición química, presentó buena resistencia mecánica, lo hace apto para resistir deformaciones bajo cargas dentro de la columna de absorción, y permitió la mayor absorción de CO<sub>2</sub> de 90 % a los 10 minutos.

El material cerámico es el más duro, pero tiene la desventaja de ser frágil, por lo que deja residuos por erosión debido al trabajo mecánico y provoca mayor frecuencia de limpieza dentro de la columna, así como la sustitución de los materiales de contacto



Fig. 6. EDS, (a) antes y (b) después, de la prueba de corrosión (material metálico)



Fig. 7. EDS, (a) antes, (b) después, de la prueba de corrosión (material polimérico)



Fig. 8. EDS, (a) antes, (b) después, de la prueba de corrosión (material cerámico)

líquido gas, para evitar incremento en la resistencia al paso de los fluidos y taponamiento, generando una absorción de gases ácidos del 74 % a los 10 minutos de operación.

El material polimérico desempeñó también una importante separación de CO<sub>2</sub>, como consecuencia del proceso de transferencia de masa, generando una absorción de gases ácidos del 88 % a los 10 minutos de operación, por lo cual junto con el metálico, son los más eficientes en el proceso de absorción del CO<sub>2</sub>.

El ensayo de corrosión ayudó a evaluar el tiempo de vida útil de los materiales de contacto líquido gas, en presencia de solución acuosa de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 1N, ya que el fenómeno de corrosión limita la vida de servicio de estos materiales estructurados.

#### AGRADECIMIENTOS

Por el financiamiento parcial SEP-CONACyT 2007-CB-01-82987 y EDOMEX-2009-C02-135728; así como al personal de los Laboratorios de Materiales, del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, por el apoyo en la operación y calibración de los equipos de medición y empleo de procedimientos para las pruebas aquí presentadas y al M.A. e Ing. Javier de J. Guadarrama por la revisión y edición del trabajo.

### REFERENCIAS

- Askeland D.R. y Pradeep P. (2004). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. 4a ed. Thompson, México, 1004 pp.
- ASTM E8-1998. Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Materials.
- ASTM E384-1990. Standard Test Method for Microhardness of Materials.
- ASTM G5-1999. Método de Ensayo para Medición de Polarización Anódica Potencioestática y Potenciodinámica.
- Brunnazzie E. (2002). An economical criterion for packed absorption column design. Chem Biochem. Eng. Q. 15, 199-206.
- Chávez R.H. y Guadarrama J.J. (2004). Caracterización experimental de un empaque estructurado de gasa de latón de alta eficiencia. Información Tecnológica-Revista Internacional 15, 17-22.

- Chávez R.H., Guadarrama J.J. y Segovia N. (2005). Removal of sulphur dioxide from exhaust gases using hazardous and structural packing. Int. J. Environ. Pollut. 23, 81-91.
- IPCC (2001). Climate change 2001 the scientific basis. Contribution of Working Group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Reino Unido, 881 pp.
- Jou F.Y., Mather A.E. y Otto F.D. (1995). The solubility of CO<sub>2</sub> in a 30 mass percent Monoethanolamine solution. Can. J. Chem. Eng. 73, 140.
- Kladkaew N., Idem R., Tontiwachwuthkul P. y Saiwan C. (2009). Corrosion behavior of carbon steel in the Monoethanolamine-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-SO<sub>2</sub> System Ind. Eng.Chem. Res. 48. 19, 8913.
- Legoett J. (1996). El calentamiento del planeta. Informe de Greenpeace. Fondo de Cultura Económica. México.
- Lunsford K.M. y Bullin J.A. (1996). Optimization of amine sweetening units. Proceedings of the 1996 AICHE Spring National meeting. American Institute of Chemical Engineers. Nueva York.
- Maceiras R., Álvarez E. y Cancel M.A. (2008). Effect of temperature on carbon dioxide absorption in monoethanolamine solutions. Chem. Eng. J. 138, 295-300.

- Procedimiento ININ P.SC(LC)-06. (1999). Técnica Electroquímica de Extrapolación de *Tafel*. Abril.
- Sargent N.E. (1997). Redistribution of the Canadian boreal forest under a warmed climate, Climatological Bulletin, 22, 23-34.
- SEMARNAT (1993) Norma Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-1993. Contaminación atmosférica, para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre de los equipos de calentamiento directo por combustión. SEMARNAT. Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca. Diario Oficial de la Federación. 25 de noviembre de 1994.