

## USO DEL ANÁLISIS MULTIVARIADO PARA MODELAR EL ASENTAMIENTO DE RSU EN BIORREACTORES CON RECIRCULACIÓN DE LIXIVIADOS

María del Consuelo MAÑÓN-SALAS<sup>1\*</sup>, María del Consuelo HERNÁNDEZ-BERRIEL<sup>2</sup> y Liliana MÁRQUEZ-BENAVIDES<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Baja California, Calle de la Normal s/n, Insurgentes Este, Mexicali, B.C.N., C.P. 2100

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico de Toluca

<sup>3</sup> Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

\*Autora responsable; consuelomanon@yahoo.es

*(Recibido agosto 2011, aceptado diciembre 2011)*

Palabras clave: compactación de residuos, biodegradación acelerada, modelos

### RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue determinar la relación entre la degradación anaerobia acelerada y el asentamiento en los residuos sólidos urbanos (RSU) en biorreactores a escala laboratorio (BLAB), mediante la generación de modelos con análisis multivariado. El asentamiento de los RSU depende de diversos factores, por lo que el análisis multivariado brinda la posibilidad de evaluar una serie de alternativas y seleccionar aquellas que tienen significancia estadística. Los datos para este trabajo se obtuvieron de un diseño experimental con 21 BLAB. El cuerpo de cada BLAB se cargó con un volumen de 412.24 cm<sup>3</sup> de RSU del municipio de Pátzcuaro, Michoacán. Se operaron en tres grupos de siete BLAB a las tasas de recirculación de 40, 60 y 80 % volumen (%V). Se desmontó un BLAB de cada grupo los días: 15, 45, 75, 105, 135, 165 y 201. A los residuos degradados se les determinó: Asentamiento, pH y remoción de sólidos volátiles (RSV). También se dio seguimiento al CH<sub>4</sub> producido, observándose problemas de colinealidad con RSV. El modelo final mostró una fuerte relación entre la RSV y el asentamiento, eligiéndose el modelo lineal por presentar una mayor precisión.

Key words: waste compaction, accelerated biodegradation, models

### ABSTRACT

The aim of this study was to determine the relationship between the accelerated anaerobic degradation and the settlement of municipal solid waste (MSW) in laboratory-scale bioreactors (LAB), by generating models using multivariate analysis. The settlement of MSW depends on several factors, multivariate analysis therefore provides the ability to evaluate a number of alternatives and select those that have statistical significance. Data for this study was obtained from an experimental design with 21 LAB. Each LAB was loaded with a volume of 412.24 cm<sup>3</sup> MSW from the landfill site in Pátzcuaro, Michoacán. Three groups of seven LAB were operated using leachate recirculation rates of 40, 60 and 80 % volume (%V). One LAB was dismantled from each group at day 15, 45, 75, 105, 135, 165 and 201 of experimentation. Refuse was then analyzed for settlement (%), pH and volatile solids removal (SVR); methane in biogas was

also monitored. It was found that CH<sub>4</sub> had collinearity problems related to SVR. The obtained model showed a strong association between RSV and settlement, the linear model with the highest precision was selected.

## INTRODUCCIÓN

La degradación anaerobia (DA) de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU) produce una pérdida de masa que se manifiesta con la generación de biogás y la producción de lixiviados, los cuales si no se gestionan adecuadamente, pueden representar impactos adversos al ambiente (Kjeldsen *et al.* 2002, SERMARNAT 2006).

El manejo de un relleno sanitario (RESA) puede llevarse a cabo de tal forma que represente un *biorelleno acelerado*, ésto se logra mediante la adición sistemática de lixiviados u otros líquidos acondicionados. Su práctica tiene como ventajas principales: el incremento de la tasa de producción de metano ( $\text{m}^3\text{CH}_4 \times \text{d}^{-1}$ ), el tratamiento *in situ* de sus lixiviados, la recuperación de espacio por la compactación y la operación sustentable del sitio de disposición, ya que acorta el periodo de monitoreo posclausura y reduce los costos globales. Sin embargo también presenta ciertas desventajas como: la acumulación de ácidos orgánicos volátiles y nitrógeno amoniacal, inundación, lavado y/o excesivos asentamientos de la matriz de RSU (Pohland y Kim 1999, Reinhart *et al.* 2002).

Con respecto al asentamiento de los RSU, éste se ve afectado por factores como la composición, tamaño de partícula, humedad y capacidad de campo de los residuos; tipo y espesor del material de cobertura; espesor de la celda, densidad de compactación y metodología empleada en el relleno; así como por las condiciones climáticas (Ling *et al.* 1998, Espinace *et al.* 1999, Turcumán *et al.* 2009).

Con estudios realizados a escala laboratorio y campo, pueden distinguirse dos tipos de asentamientos: el primario ocurre en periodos cortos de tiempo una vez que los residuos son depositados, en él se llevan a cabo procesos físicos y químicos; mientras que el secundario se caracteriza porque ocurre en periodos más prolongados, donde intervienen principalmente procesos químicos y biológicos, que tienen como resultado la estabilización de los residuos (El-Fadel *et al.* 1999, Hossain *et al.* 2003, Durmusoglu *et al.* 2005, Sri Shalini *et al.* 2010).

Con el fin de modelar y estimar los asentamientos que se producen en un RESA, diversos investigadores han propuesto modelos matemáticos, que pueden ser agrupados en los que se basan en mecánica de

suelos (Sowers 1973), modelos reológicos (Edil *et al.* 1990), modelos empíricos y modelos que incorporan la biodegradación. Entre estos dos últimos tipos se encuentra el trabajo de Ling *et al.* (1998), donde proponen como herramienta un modelo hiperbólico para simular la relación de los asentamientos con respecto al tiempo, incorporando en una ecuación los asentamientos primarios y secundarios, sin embargo su mayor limitación es que predice valores negativos para periodos cortos de tiempo. Shashi (2007) desarrolla un modelo matemático a escala campo, para calcular la magnitud de los asentamientos debido a la biodegradación, incorporando los efectos de la temperatura, pH y contenido de humedad.

Si bien existen series de modelos reportados sobre el estudio de los asentamientos con diferentes metodologías, son escasos aquellos que involucran diferentes tasas de recirculación de lixiviados. Por otro lado, aunque la escala es un factor importante a considerar en el estudio de asentamientos (Yuen y Styles 2000, Reddy 2006), el modelado con datos de laboratorio puede ser un punto de referencia para establecer o definir relaciones entre las variables disponibles de un sitio dado, lo que ayuda a comprender los fenómenos y a encontrar explicaciones de los mismos. De acuerdo con lo anterior, la presente investigación se dirigió al estudio de los asentamientos asociados a la degradación anaerobia (DA) de RSU con recirculación de lixiviados en biorreactores a escala laboratorio (BLAB), mediante el uso de análisis multivariado.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Montado de biorreactores a escala laboratorio

Se utilizaron 21 biorreactores a escala laboratorio (BLAB), construidos en policloruro de vinilo (PVC) cédula 40. El cuerpo de cada BLAB cuenta con 4.5 cm de diámetro interno y 18 cm de altura (volumen interno de 412.24 mL). Cada BLAB se cargó con 215.19 g de RSU (**Cuadro I**), cuyos subproductos fueron previamente reducidos ( $\leq 1$  cm), se le colocó 32.15 g de suelo como material de cobertura y se le compactó al mismo peso volumétrico que el del RESA del municipio de Pátzcuaro, Michoacán ( $600 \text{ kg/m}^3$ ).

**CUADRO I.** CARACTERIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS DE LOS RSU DE PÁTZCUARO, MI-CHOACÁN

Subproductos	RSU		Subproductos	RSU	
	% p/p	g		% p/p	g
Residuos alimenticios	34.25	73.71	Material de construcción	1.91	4.10
Residuos de jardinería	31.86	68.56	Pañal desechable	1.89	4.06
Papel	5.97	12.84	Material ferroso	1.76	3.78
Plástico de película	4.74	10.20	Material no ferroso	1.31	2.83
Polietileno de alta densidad	3.81	8.21	Envase de cartón encerado	1.21	2.60
Vidrio	3.48	7.49	Cartón	1.07	2.30
Trapo	3.31	7.12	Unicel	0.76	1.64
PET	2.67	5.75	Total	100.00	215.19

Fuente: Hernández-Berriel *et al.* 2009. % p/p, porciento peso base húmeda

### Recirculación de lixiviados y seguimiento de operación

En este estudio la tasa de recirculación (TR) se refiere al porciento del volumen (%V), el cual corresponde al volumen de lixiviado recirculado con respecto al volumen de RSU y suelo cargados inicialmente en el cuerpo de cada BLAB.

Se operaron tres grupos de siete BLAB, utilizando tasas de recirculación de lixiviados de 40, 60 y 80 % V (165, 248 y 330 mL, respectivamente) dos veces por semana a 2 ml min<sup>-1</sup>. Se desmontó un BLAB de cada grupo los días 15, 45, 75, 105, 135, 165 y 201 de experimentación. Una vez abierto cada BLAB, se midió con un vernier en cuatro puntos el nuevo nivel de los RSU y el suelo degradados. Con estos datos se calculó el porcentaje de disminución del nivel dentro de cada cuerpo, correspondiente con su grado de asentamiento.

A los residuos sólidos descargados se les determinó por cuadruplicado la remoción de sólidos volátiles (RSV) con el método 2540G (APHA 1998) y pH según la NMX- AA-25-1984 (SCFI 1984). Se dio seguimiento semanalmente a la generación de biogás durante los 201 días que duró la experimentación y se cuantificó el CH<sub>4</sub> conforme al método reportado por Hernández-Berriel *et al.* (2009).

### Análisis y procesamiento de los datos

Conforme a las características del sistema y al conjunto de información registrada, el modelo a desarrollar fue de tipo empírico, debido a que se sustenta en la identificación de relaciones estadísticamente significativas entre ciertas variables, a partir de datos experimentales.

Dado el objetivo de este trabajo, que consistió en establecer la correspondencia entre el asentamiento (variable dependiente o de salida) y la DA de RSU con recirculación de lixiviados, se establecieron

como variables independientes o de entrada pH, RSV, CH<sub>4</sub> y TR. Las tres primeras variables son indicadores del proceso de la DA (Barlaz *et al.* 1997, Kelly *et al.* 2006) y la TR tiene una relación directa con respecto al grado de DA (Chugh *et al.* 1998).

La captura de los datos se realizó en hojas de Excel. Por medio de controles de calidad se logró la oportuna detección de anomalías, tales como errores en la recopilación de datos y duplicidad de la información. La manipulación de ésta se llevó a cabo con matrices de datos, que fueron importadas a Statgraphics Plus 5.1 ®, donde se realizó el análisis estadístico. Se partió del diseño de histogramas y diagramas de caja para cada variable, con el fin de obtener su distribución, grado de variación, valores mínimos y máximos. Además se incluyeron medidas de tendencia central, de variabilidad y de forma (Cakmakci 2007).

Posteriormente se empleó el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de Tukey HSD con un nivel de confianza del 95 %, para verificar la hipótesis nula (H<sub>0</sub>) sobre la existencia de diferencias significativas en las variables pH, RSV, CH<sub>4</sub> y Asentamiento con respecto a la TR, debido a que ésta fue una variable manipulada (Salvador y Gargallo *et al.* 2003).

Finalmente, se determinó el tipo de relación y dependencia entre las variables con el análisis de la matriz y el factor de correlación (*r*) (Ojeda *et al.* 2008).

### Selección de variables

Debido a la importancia que tiene la selección de las variables significativas en el modelo, existen técnicas que secuencialmente agregan o suprimen una variable independiente en la ecuación de estimación (modelo). La razón principal para suprimir una variable independiente de un modelo, es que se

puede mejorar la precisión en la estimación de la variable dependiente con las variables retenidas, aún si alguna de las variables suprimidas es importante (Gualdrón 2006).

Los métodos de selección escalonada básicamente son tres: eliminación progresiva (*Forward*), eliminación regresiva (*Backward*) y por pasos (*Stepwise*). En este trabajo se empleó *Stepwise*, que combina los métodos *Forward* y *Backward*. Utiliza como criterios de selección los estadísticos *t* y *valor p*, donde la variable es significativa para valores de  $t > 2$  y *valor p*  $< 0.05$ , para  $t < 2$  y *valor p*  $> 0.05$  la variable no aporta información y se descarta. Como criterio de evaluación de la bondad de ajuste, se consideró el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el cual proporciona la cantidad de variación total en la variable dependiente, explicada por las variables independientes (Gurijala *et al.* 1999, Navarro 2009).

### Construcción y verificación del modelo

La construcción del modelo consistió en formular los modelos para su análisis y encontrar uno que fuera capaz de representar la esencia del problema. Las funciones matemáticas comúnmente empleadas en modelos empíricos son: logarítmica, hiperbólica, potencia y regresión lineal múltiple (Reddy 2006).

Debido a la dificultad del uso de teorías sobre el asentamiento de residuos y que su estudio involucra diferentes factores, se decidió utilizar el análisis de regresión, que permite buscar la mejor estimación empleando parámetros empíricos para construir una aproximación cercana de la variable dependiente. Se determinaron entonces n-tuplas  $(x_i, y_i)$  para  $i=1, \dots, n$ , donde  $x_i$  es el vector de mediciones de las variables independientes para la *i*-ésima observación (Gurijala *et al.* 1999, Ojeda *et al.* 2008); también se consideró el *Principio de parsimonia*, cuya idea principal menciona que si existen dos modelos que explican suficientemente bien un conjunto específico de datos, se debe de escoger el modelo más simple de los dos (Gualdrón 2006).

La verificación es el proceso de comprobar que los resultados aportados por el modelo para las variables dependientes no son muy diferentes a los medidos en la realidad. Para asegurar que este requisito se cumpla, existen índices que permiten cuantificar el grado de ajuste entre los datos medidos y los resultados del modelo. Para ello se usó el  $R^2$  y la raíz cuadrática media (RMSE). El  $R^2$  (Ecuación 1), presenta valores que oscilan entre 0 y 1 y representa el porcentaje de varianza en los datos observados explicado por el modelo.

$$R^2 = \frac{\text{cov}(o,m)^2}{\text{sd}(o) \text{sd}(m)} \quad (1)$$

Donde  $\text{cov}(o,m)$  es la covarianza entre los valores observados (*o*) y los devueltos por el modelo (*m*),  $\text{sd}(o)$  es la desviación típica de los *o* y  $\text{sd}(m)$  es la desviación típica de los resultados del *m*.

La RMSE está dada por la ecuación 2, que se emplea para contrastar en qué medida los valores predichos se acercan a los valores observados, lo que significa que a menor valor de RMSE se tiene mayor precisión.

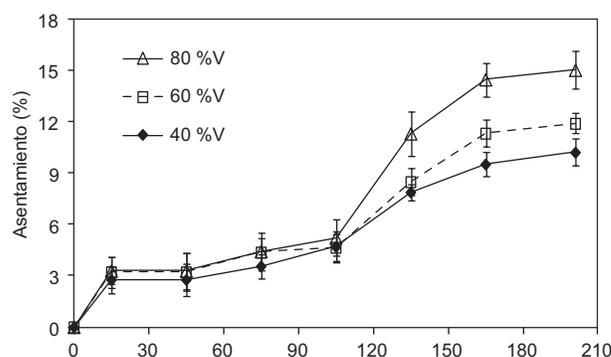
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_p - P_o)^2}{N}} \quad (2)$$

Donde  $P_p$  es el valor pronosticado por el modelo,  $P_o$  es el valor observado o medido y *N* es el número total de datos (Gurijala *et al.* 1999, Cakmakci 2007).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis exploratorio de los datos

Debido a que las determinaciones se hicieron por cuadruplicado, se calcularon las medias con respecto al día y a la TR, obteniendo para cada variable bajo estudio tres datos para cada día: 0, 15, 45, 75, 105, 135, 165 y 201. La **figura 1** muestra los resultados del Asentamiento con respecto al tiempo.



**Fig. 1.** Asentamiento de residuos sólidos con recirculación de lixiviados

La primera variable que se analizó fue TR, presentando una distribución normal (asimetría=0), mientras que RSV,  $\text{CH}_4$  y Asentamiento mostraron valores altos con mayor frecuencia que valores bajos (distribución sesgada a la derecha), pH reveló mayor frecuencia en valores bajos que en valores altos, lo

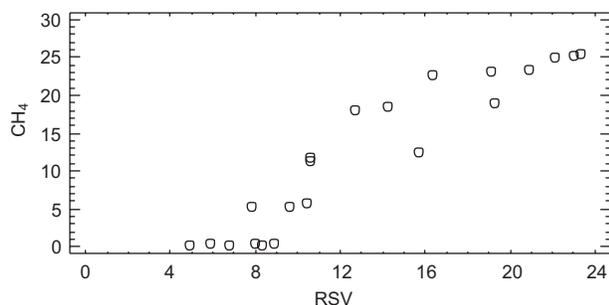
**CUADRO II.** RESULTADOS DEL ANÁLISIS UNIVARIADO

Variabes	TR	RSV	pH	CH <sub>4</sub>	Asentamiento
Mínimo	40 %V	4.97 %	4.92	0.0 l/kg RSU	2.78 %
Máximo	80 %V	23.36 %	7.83	25.4 l/kg RSU	15.04 %
Media	60 %V	13.3 %	6.7	11.9 l/kg RSU	6.9 %
Varianza	280	36	0.9	98.8	16.7
Desviación estándar	16.7	6	0.9	9.9	4.1
Asimetría	0	0.79	-1.74	0.08	1.3
Curtosis	-1.5	-1.15	-0.7	-1.58	-0.8
Coefficiente de variación	28 %	45 %	14 %	83 %	59 %

que confirmó la existencia de un sesgo a la izquierda. Las cinco variables presentaron una curtosis negativa, lo cual significa una distribución relativamente plana (Salvador y Gargallo 2003). Con respecto al coeficiente de variación se observó que la distribución de las variables CH<sub>4</sub>, Asentamiento y RSV presentaron una mayor dispersión en comparación con TR y pH (**Cuadro II**). Conforme a lo anterior se puede prever que existe una mayor relación entre las variables CH<sub>4</sub> y RSV con Asentamiento, que entre esta última con respecto a TR y pH.

Mediante el ANOVA se verificó que no existían diferencias estadísticamente significativas entre ningún par de medias de las variables pH, RSV, CH<sub>4</sub> y Asentamiento con TR de lixiviado, lo cual puede atribuirse a que la DA fue similar a las recirculaciones de 30, 40 y 60 %V, aunque haya sido numéricamente mayor en proporción directa a la TR. Estos resultados fueron indicio que los datos de cada una de las tres tasas de recirculación de una variable dada, podían ser analizados como una sola muestra (Salvador y Gargallo *et al.* 2003, Navidi 2006).

Al evaluar la matriz de correlación (**Cuadro III**), se obtuvo para pH una relación media con respecto a RSV y Asentamiento, así como una buena relación con CH<sub>4</sub>. Las variables independientes CH<sub>4</sub> y RSV presentaron una fuerte relación lineal, corroborándose la existencia de problemas de colinealidad mediante el diagrama de dispersión que se muestra en la **figura 2** (López 1998).

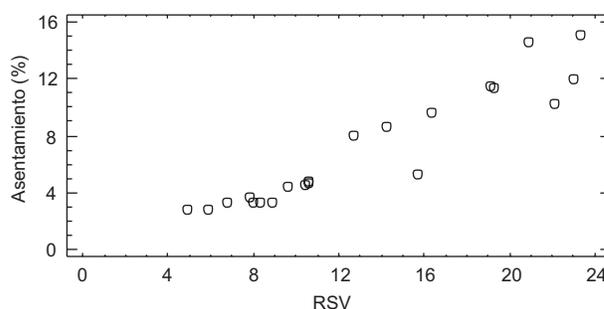


**Fig. 2.** Diagrama de dispersión RSV y CH<sub>4</sub>

**CUADRO III.** MATRIZ DE CORRELACIÓN

r	pH	RSV	CH <sub>4</sub>
pH		0.59	0.75
RSV	0.59		0.94
CH <sub>4</sub>	0.75	0.94	
Asentamiento	0.57	0.94	0.92

Para Asentamiento con respecto a RSV (**Cuadro III**), se observó una fuerte relación con tendencia a la linealidad, ya que la nube de puntos en el diagrama de dispersión, reveló una forma alargada con inclinación hacia arriba (**Fig. 3**). Los Asentamientos menores a 4 % obtenidos los días 15 y 45 (**Fig. 1**) que correspondieron con RSV menores al 10 % (**Fig. 3**), se catalogaron de primer tipo, donde las primeras recirculaciones disolvieron y movieron partículas pequeñas a través de los espacios de la matriz de los residuos, reduciendo los espacios vacíos al impactar las capas superiores de los residuos sólidos (Durmusoglu *et al.* 2005). Los asentamientos posteriores al día 75, donde los asentamientos fueron superiores al 8 % se identificaron como de tipo secundario y pueden atribuirse al efecto combinado de la compresión por la recirculación de lixiviados y a la DA de la fracción orgánica de los residuos sólidos (Hossain *et al.* 2003, Sri Shalini *et al.* 2010), ya que los valores de RSV fueron mayores a 10 %.



**Fig. 3.** Diagrama de dispersión RSV y Asentamiento

**CUADRO IV.** VALORES APLICANDO LA TÉCNICA *STEPWISE*

Variables independientes	1er. Paso			2do. Paso		
	<i>t</i>	Valor <i>p</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>t</i>	Valor <i>p</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
RSV	12.6	0.000	88.76			
CH <sub>4</sub>	10.7	0.000	85.00	1.51	0.147	89.47
pH	3.06	0.0063	29.00	0.27	0.7878	88.18
TR	1.02	0.3116	0.24			

**CUADRO V.** RESULTADO DE LA EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN

Modelo		<i>R</i> <sup>2</sup>	RMSE
Lineal	Asentamiento = $-1.5940 + 0.6416 \times \text{RSVT}$	88.75	1.301
Multiplicativo	Asentamiento = $0.3108 \times \text{RSVT}^{1.1836}$	90.24	1.322
Exponencial	Asentamiento = $\exp(0.5329 + 0.0932 \times \text{RSVT})$	90.94	1.452
Logarítmico	Asentamiento = $-12.6817 + 7.8946 \times \ln(\text{RSVT})$	82.42	1.628

### Selección de variables

En el **cuadro IV** se resumen los resultados de la técnica *Stepwise* y el *R*<sup>2</sup>, así como el orden en que se seleccionaron las variables. El primer paso muestra que RSV fue la primera en elegirse, seguida por las variables CH<sub>4</sub> y pH. Los valores de *t* y *valor p* indicaron que TR no era estadísticamente significativa para el modelo, lo cual corroboró el resultado de la ANOVA, por lo que fue descartada (Navarro 2009).

En el segundo paso (**Cuadro IV**) se incluye RSV y se adicionan individualmente CH<sub>4</sub> y pH. Al adicionar CH<sub>4</sub> se incrementa *R*<sup>2</sup> pero los estadísticos *t* y *valor p* indicaron que esta variable era irrelevante para el modelo. Cabe mencionar que aunque los valores de *t* y *p-valor* hubieran indicado que CH<sub>4</sub> era significativa para el modelo, su inclusión disminuiría la capacidad predictiva de éste, debido a la colinealidad detectada en la **cuadro III** (López 1998, Gurijala 1999). Finalmente, aunque pH es un también un indicador de la DA, su inclusión redujo *R*<sup>2</sup> y los valores de *t* y *valor p* mostraron que no era significativa para el modelo, lo cual puede atribuirse a que el análisis no se realizó por fases (Chugh *et al.* 1998).

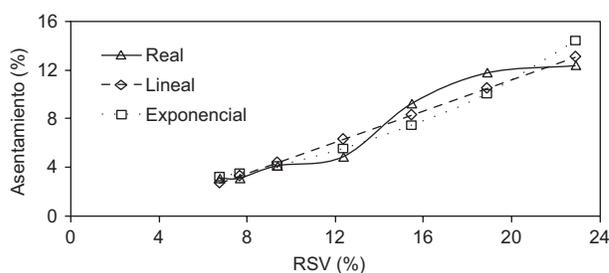
Conforme al análisis multivariado realizado, se determinó que la única variable que debía mantenerse en el modelo para estimar el Asentamiento en los BLAB era RSV. El que el modelo final fuera de regresión simple, puede atribuirse a limitantes de la escala empleada y a las variables consideradas, sin embargo, también señala la posibilidad de utilizar variables sencillas y económicas de determinar, como RSV. Entre las limitantes se tiene que la matriz de los residuos sólidos en los BLAB careció de presión por peso de las capas superiores y que la reducción de tamaño de materiales como plástico, papel y trapo, ofreció una menor resistencia a la compresión (Hossain *et al.* 2003).

### Construcción y verificación del modelo

Debido a que la selección de variables dio como resultado un modelo de regresión simple para estimar el Asentamiento de RSU en BLAB con recirculación y a que la variable independiente RSV está en estrecha relación con la DA de su fracción orgánica (Barlaz *et al.* 1997, Kelly *et al.* 2006), se decidió construir y evaluar los modelos lineal, exponencial, multiplicativo y logarítmico (Reddy 2006).

En el **cuadro V** se muestran los modelos con sus respectivas evaluaciones. El modelo exponencial presentó el mayor valor de *R*<sup>2</sup>, lo que significa que tiene una mayor bondad de ajuste. Sin embargo, considerando el RMSE, el modelo lineal resultó ser el de mayor grado de precisión, por lo que fue seleccionado. En la **figura 4** se grafican los valores reales y los valores obtenidos con los modelos lineal y exponencial, donde puede observarse que ambos presentan un comportamiento similar al real, aunque el último valor del modelo exponencial tiene una desviación mayor.

Palma *et al.* (2000) presentan los asentamientos obtenidos en un lisímetro de laboratorio y en una celda a escala campo, los cuales son de tipo exponencial y reflejan los procesos de degradación (día 150) y de la recirculación de lixiviados (días 150 a

**Fig. 4.** Comparación de valores estimados y reales

180), sin embargo, el asentamiento al día 150 en el lisímetro de laboratorio fue 2.5 veces mayor que en la celda. Esto demuestra que aunque los resultados pudieran tener tendencias similares, deben considerarse particularidades con respecto a la escala. Conforme a lo anterior, los modelos desarrollados lineal y exponencial de este trabajo, pueden sugerir lo que ocurre a otra escala donde la DA se ve acelerada por la recirculación de lixiviados (Espinace *et al.* 1999, Reinhart *et al.* 2002), pero sólo serían aproximaciones, por lo que es recomendable utilizar datos obtenidos en el RESA de Pátzcuaro, Michoacán (México) para desarrollar modelos con un buen grado de ajuste y precisión.

### CONCLUSIONES

El análisis exploratorio realizado mediante herramientas estadísticas permitió la comprensión global del sistema bajo estudio, además de que brindó una vía para asegurar la fiabilidad y validez de los datos.

En la formulación de un modelo la selección de variables es un paso decisivo, donde su complejidad puede ser reducida al determinar las variables significativas que lo integrarán; en este sentido la técnica *Stepwise* demostró ser la más apropiada.

Dadas las características de las variables bajo estudio y la metodología de análisis multivariado empleada, la relación entre el Asentamiento de los RSU en BLAB y la DA como RSV, quedó determinada por un modelo de tipo lineal simple.

Si bien en este estudio fue posible establecer los asentamientos primario y secundario, el modelo desarrollado tiene la limitante propia de los datos a escala laboratorio, por lo que su aplicación a escala campo requiere de la parametrización con datos del RESA de Pátzcuaro, Michoacán.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por las becas 213593 y 62776.

### REFERENCIAS

- APHA (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20a ed. American Public Health Association. Washington, EUA. 1325 pp.
- Barlaz M.A., Eleazer W.E., Odle W.S., Qian X., Wang Y.S. (1997). Biodegradative analysis of municipal solid waste in laboratory-scale landfills. Project Summary. Research and Development EPA/600/SR-97/071 September 1997. Environmental Protection Agency, National Risk Management, Research Laboratory Agency, Research Triangle Park NC 27711, U.S.A. pp 237.
- Cakmakci M. (2007). Adaptive neuro-fuzzy modelling of anaerobic digestion of primary sedimentation sludge. *Bioprocess. Biosyst. Eng.* 30, 349-357.
- Chugh S., Clarke W., Pullammanappallil P. y Rudolph V. (1998). Effect of recirculated leachate volume on MSW degradation. *Waste Manage. Res.* 16, 564-573.
- Durmusoglu E., Corapcioglu M.Y. y Tuncay K. (2005). Landfill settlement with decomposition and gas generation. *J. Environ. Eng.* 131, 1311-1321.
- Edil T.B., Ranguette V.J. y Wuellner W.W. (1990). Settlement of municipal refuse. *Geotechnics of waste fills-theory and practice*. ASTM STP 1070. American Society of Testing and Materials. 225-239 pp.
- El-Fadel M., Shazbak S., Saliby E. y Leckie J. (1999). Comparative assessment of settlement models for municipal solid waste landfill applications. *Waste Manage. Res.* 17, 347-368.
- Espinace R., Palma J. y Sánchez-Alciturri J. M. (1999). Experiencias de aplicación de modelos para la determinación de los asentamientos de rellenos sanitarios. Memoria. XI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones. Foz de Iguazu, Brasil. 8-12 de Agosto, 1999. CD-ROM.
- Gualdrón G.O.E. (2006). Desarrollo de diferentes métodos de selección de variables para sistemas. Tesis Doctorado, Universitat Rovira I Virgili, Tarragona, España, 171 pp.
- Gurijala K.R., Ping SA y Robinson J.A. (1997). Statistical modeling of methane production from landfill samples. *Appl. Environ. Microbiol.* 63, 3797-3803.
- Hernández-Berriel Ma.C., Márquez-Benavides L., Mañón-Salas M.C., Buenrostro-Delgado O. y Sánchez-Yáñez J.M. (2009). Producción de metano mediante la recirculación de lixiviados en residuos sólidos urbanos. Memoria. II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos "La Gestión Sostenible de los Residuos". Barranquilla, Colombia. 24 y 25 de Septiembre, 2009. CD-ROM.
- Hossain M.S., Gabr M.A. y Barlaz M.A. (2003). Relationship of compressibility parameters to municipal solid waste decomposition. *ASCE. J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 12, 1151-1158.
- Kelly R.J., Bradley D., Shearer b, Jongmin K.C., Goldsmith C.D, Hater G.R., John T. y Novak C. (2006). Relationships between analytical methods utilized as

- tools in the evaluation of landfill waste stability. *Waste Manage.* 26, 1349-1356.
- Kjeldsen P., Barlaz M.A., Rooker A., Baun P., Ledin A. y Christensen T.H. (2002). Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A Review. *Critical Reviews in Environ. Sci. Technol.* 32, 297-336.
- López G.E. (1998). Tratamiento de la colinealidad en regresión múltiple. *Psicothema* 10, 491-507.
- Ling H.I., Leshchinsky D., Mohri Y. y Kawabata T. (1998). Estimation of municipal solid waste landfill settlement. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 124, 21-28.
- Navarro O. (2009). Selección de variables en regresión componentes principales. *Energy and Technology for the America: Education, Innovation, Technology and Practice.* June 2-5, 2009, San Cristóbal, Venezuela. CD-ROM.
- Navidi W. (2006). *Estadística para ingenieros y científicos.* Ed. McGraw-Hill Interamericana. Ciudad de México, México. 867 pp.
- Ojeda B.S., Lozano-Olvera G., Morelos R. y Armijo C. (2008). Mathematical modeling to predict residential solid waste generation. *Waste Manage.* 28, S7-S13.
- Palma G. J., Valenzuela T. P., Espinace A. R. (2000). Reducción de los tiempos de estabilización en rellenos sanitarios operados con recirculación de lixiviados tratados. *Memorias. XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.* Porto Alegre, Brasil, 3 al 8 diciembre 2000. CD-ROM
- Pohland F.G. y Kim J.C. (1999). In situ anaerobic treatment of leachate in landfill bioreactors. *Water Sci. Technol.* 40, 203-210.
- Reddy R.K. (2006). Geotechnical aspects of Biorreactor Landfills. *Memorias. IGC 2006.* 14-16 December 2006, Chennai, INDIA. CD-ROM.
- Reinhart D.R., McCreanor P.T. y Townsend T.G. (2002). The bioreactor landfill: Its status and future. *Waste Manage. Res.* 20, 172-186.
- Salvador F.M. y Gargallo V.P. (2003). Análisis exploratorio de datos. [en línea], <http://www.5campus.com/leccion/aed>, 23/05/2011.
- SCFI (1984). Norma Mexicana NMX- AA-25-1984. Establece el método de prueba para determinar pH por el método potenciométrico en suelo y residuos sólidos. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. *Diario Oficial de la Federación.* 10 Diciembre 1984.
- SEMARNAT (2006). *La gestión ambiental en México.* Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Reporte de la SEMARNAT, México, D. F. 468 pp.
- Sowers G.F. (1973). Settlement of waste disposal fills. *Proc. 8th. Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineerings, Moscow.* 2, 207-210.
- Sri Shalini S., Karthikeyana O.P. y Joseph K. (2010). Biological stability of municipal solid waste from simulated landfills under tropical environment. *Bio-resour. Technol.* 101, 845-852.
- Sumedha C. y Shashi M. (2007). Settlement of MSW landfills due to biodegradation. *Memoria. Proceedings of the International Conference on Sustainable Solid Waste Management.* Chennai, India. 5-7 September 2007. CD-ROM.
- Turcumán M., Fiore J.M. y Vázquez G. (2009). Estudio de un vertedero controlado. Análisis de su estabilidad a través de la estimación de la compresibilidad. *Memoria. II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos.* Barranquilla, Colombia. 24-25 de septiembre de 2009. CD-ROM.
- Yuen S.T.S. y Styles J.R. (2000). Settlement and characteristics of waste at a municipal solid waste landfill in Melbourne. *Proceedings of Geo Eng 2000 - International Conference on Geotechnical and Geological Engineering,* 19-24 November 2000, Melbourne. CD-ROM.