

Comportamiento del consumo de fluoruro de aluminio en el proceso de reducción en la empresa CVG-Venalum, Venezuela

Luzardo, Marianela

Marianela Luzardo

Profesora de la Facultad de
Ciencias Económicas y Sociales
de la Universidad de los Andes
nela@ula.ve

Recibido: 13-12-04
Revisado: 02-03-05
Aceptado: 01-06-05

En este trabajo se presentan modelos de análisis de regresión lineal múltiple para explicar el comportamiento en el consumo de fluoruro de aluminio (AlF_3), en función de un conjunto de variables físico-químicas presentes en el proceso de reducción electrolítica para la producción de aluminio primario en los tres complejos de la planta CVG-Venalum, Venezuela. Los mejores modelos de regresión múltiple para cada caso fueron obtenidos a través del procedimiento de búsqueda *stepwise* (paso a paso), para los cuales se verificaron los supuestos de todos los modelos de regresión. Para el modelo de regresión lineal múltiple del complejo I, fueron significativas las variables: nivel del metal (Nm), pérdida por ignición en la alúmina a 300°C (Loi_{300}), finura de la alúmina (F), edad de la celda (E), temperatura del baño electrolítico (Tb) y porcentaje de litio en el baño (Li); para el complejo II resultaron significativas: pérdida por ignición en la alúmina a 300°C (Loi_{300}), porcentaje de sodio contenido en la alúmina (Na), nivel del baño electrolítico (Nb), temperatura del baño electrolítico (Tb), acidez (A) y porcentaje de litio en el baño (Li), mientras que para el complejo III fueron: nivel del metal (Nm), porcentaje de calcio contenido en la alúmina (Ca), pérdida por ignición en la alúmina a 1000°C (Loi_{1000}), porcentaje de titanio-vanadio contenido en la alúmina (Tit) y acidez (A).

Palabras clave: Análisis de regresión lineal múltiple, aluminio, alúmina, producción.

RESUMEN

In this work, models of multiple linear regression analysis appear to explain the behavior in the consumption of aluminum fluoride (AlF_3) based on a set of variables present physical-chemistries in the process of electrolytic reduction for the primary aluminum production in the three complexes of CVG-Venalum plant, Venezuela. The best models of multiple regression for each case were obtained through the procedure search stepwise for which the assumptions of all the models of regression were verified. For the model of multiple linear regression of complex I, the variables were significant: level of the metal (Nm), loss by ignition in alumina to 300°C (Loi_{300}), refinement of alumina (F), age of the cell (E), temperature of the electrolytic bath (Tb) and percentage of lithium in the bath (Li); for complex II they were significant loss by ignition in alumina to 300°C (Loi_{300}), percentage of sodium contained in alumina (Na), level of the electrolytic bath (Nb), temperature of the electrolytic bath (Tb), acidity (a) and percentage of lithium in the bath (Li) whereas for complex III they were: level of the metal (Nm), percentage of calcium contained in alumina (Ca), loss by ignition in alumina to 1000°C (Loi_{1000}), percentage of titanium-vanadium contained in alumina (Tit) and acidity (A).

Key words: Multiple linear regression analysis, aluminum, alumina, production.

ABSTRACT

1. Introducción

El proceso de reducción para la obtención del aluminio, se lleva a cabo en celdas electrolíticas, las cuales realizan la transformación de la alúmina en aluminio. Estas celdas están conectadas en serie, y son controladas y supervisadas por un sistema automático y computarizado, que controla el voltaje, la alimentación de las celdas, los rompecostras y el estado general de la celda. (Manual de CVG-Venalum)

El complejo I está conformado por las líneas I y II, el complejo II lo integran las líneas III y IV y el complejo III está formado por la línea V; cada una de las líneas tiene 180 celdas de reducción electrolítica.

La tecnología que utilizan los complejos I y II se denomina Reynolds P-19 y se caracteriza porque usa un solo rompecostra central colocado en el canal central entre los ánodos, cuya función es romperlo y luego alimentar el baño de alúmina. El sistema de alimentación de alúmina, el cual es dirigido por un sistema centralizado de control de demanda, está compuesto por cuatro alimentadores con su respectivo rompecostra, que operan independientemente. Cada celda usa 18 ánodos con una vida útil de 22 días cada uno de ellos y una producción diaria de 1,1 toneladas de aluminio, es decir, una capacidad útil de producción mensual de 36 toneladas por celda. La temperatura de operación de la celda es 960 °C; la adición de fluoruro de aluminio es manual y el voltaje de operaciones 162 KA. La frecuencia de trasegado es cada 24 horas y la subida de puente es realizada cada 15 días.

Por otro lado, el complejo III, o Línea V, usa la tecnología Hydro Aluminium, que se distingue porque tiene cinco alimentadores de alúmina y uno de fluoruro de aluminio que está situado en el centro de la celda. La alimentación de alúmina es controlada por un sistema de control adaptativo. Cada celda tiene 26 ánodos con una vida útil de 22 días. La producción diaria de la celda es 1,6

toneladas de aluminio, la temperatura de operación es 962 °C y el amperaje es de 223 KA. La frecuencia de trasegado es cada 24 horas y la frecuencia de la subida de puente es cada 15 días.

Según estudios realizados en CVG, Venalum, se ha observado una disminución en la eficiencia de la producción de aluminio cuando los niveles de humedad de la alúmina aumentan.

Se realizó entonces un análisis estadístico, a fin de evaluar si los distintos niveles de humedad de la alúmina y las variables físico-químicas del proceso intervienen en el comportamiento del consumo de AlF_3 .

2. Problemática

En el proceso de reducción electrolítica para la producción de aluminio primario intervienen alrededor de 16 variables físico-químicas. Unas se refieren a la composición de la alúmina necesaria para la producción de aluminio y otras son inherentes al proceso en sí. Por razones de costos, en lo referente a la materia prima foránea, como lo es el AlF_3 , en CVG-Venalum se quiere formular modelos que expliquen el comportamiento en el requerimiento del mismo y ver en qué forma las variables representativas de la humedad influyen en el consumo de AlF_3 de manera directa y positiva.

Las razones anteriores justifican el hecho de obtener modelos que permitan escoger las variables más relacionadas con el consumo de AlF_3 para cada uno de los complejos de producción.

3. Metodología Estadística

El Análisis de Regresión Lineal Múltiple permite desarrollar una ecuación de estimación, en la que se involucran la variable dependiente y la(s) variable(s) independientes, utilizándose la misma, usualmente, para predecir los valores de la variable dependiente. En 1989, Francis Galton introdujo por primera vez la idea de regresión y realizó estudios sobre correlación¹.

¹ Correlación: análisis que permite medir la fuerza o el grado de la relación entre variables.

Los trabajos más importantes de Galton, conectaron sus dos grandes aficiones: el estudio de la herencia y la expresión matemática de los fenómenos vinculados a ella. Fue el primero en asignar un número a un conjunto de variables, y de esta forma obtener una medida del grado de relación existente entre ellas. Sostenía la idea de que personas excepcionalmente altas solían tener hijos de estatura menor a la de sus progenitores, mientras que personas muy bajas solían tener hijos más altos que sus padres; este hecho lo enunció Galton como la regresión a la mediocridad, aplicables a las tallas de una generación respecto de las siguientes. Este principio se considera la primera falacia sobre la teoría de la regresión. La justificación que se da hoy día a este hecho es que los valores extremos de una distribución se deben en gran parte al azar. (<http://es.geocities.com/fisica/>, 18 de abril de 2004).

En esta investigación se emplean técnicas de análisis univariante (medidas descriptivas básicas, tales como la media, la desviación estándar, el mínimo y el máximo) de cada una de las variables involucradas en el estudio, y técnicas multivariantes² como el Análisis de Regresión, con el objeto de conocer el comportamiento en el requerimiento de AlF_3 , como variable dependiente, en cada uno de los complejos de la Empresa. Se estudia también la correlación existente entre éste y las distintas variables involucradas en el proceso.

Dentro del análisis de regresión múltiple se utilizó el método *stepwise* (Neter *et al*, 1985, p. 430-435), el cual consiste en eliminar paso a paso las variables que no sean estadísticamente significativas, es decir, no aportan información alguna sobre la variable dependiente, con una probabilidad de cometer error tipo I de 0,10 como máximo.

Los modelos presentados a continuación cumplen con los supuestos del modelo de regre-

sión lineal (Kelejian y Oates, 1995, p. 225-278); sin embargo, los análisis de los mismos no se ofrecen aquí, debido a la limitación del espacio de publicación.

3.1. Variables bajo estudio: Se presenta a continuación cada una de las variables que fueron objeto de estudio para este informe.

3.1.1. Calidad de la alúmina procedente de Bauxilum: dentro de las variables características de la calidad de la alúmina están: Silicio (Si); hierro (Fe); sodio (Na); titanio-vanadio (Tit), las cuales representan el porcentaje de cada una de ellas contenido en la alúmina; $\text{Loi}(300)$ (Loi_{300})³ y $\text{Loi}(1000)$ (Lmil)⁴ que representan el porcentaje de la cantidad de agua removida a los 300° C y a los 1000° C respectivamente y por último la variable finos (F) que constituye el porcentaje de material de alúmina menor a 0.045mm.

3.1.2. Complejos I, II y III: las variables características del proceso en sí son:

Consumo de AlF_3 : cantidad de AlF_3 consumido en promedio durante el mes. (kg/t-Al)

Temperatura del Baño: (Tb) temperatura promedio del baño en las celdas electrolíticas. (°C)

Acidez: (A) porcentaje de acidez promedio en las celdas electrolíticas. (%)

Nivel de Baño: (Nb) nivel promedio del baño en las celdas electrolíticas. (cm)

Nivel de Metal: (Nm) nivel del metal promedio en las celdas electrolíticas. (cm)

Calcio: (Ca) porcentaje promedio de calcio en las celdas electrolíticas. (%)

Magnesio: (Mg) porcentaje promedio de magnesio en las celdas electrolíticas. (%)

Litio: (Li) porcentaje promedio de litio en las celdas electrolíticas. (%)

Edad de la celda (E) edad promedio de las celdas electrolíticas. (días)

² Análisis de Regresión Multivariante se puede consultar en Mardia, Kent y Bibby (1979, pp. 157-184)

³ Loi_{300} : pérdida por ignición en la alúmina. Se utiliza para monitorear el contenido de humedad en la alúmina a los 300°C.

⁴ Lmil: pérdida por ignición en la alúmina. Se utiliza para monitorear el contenido de humedad en la alúmina a los 1000°C.

4. Análisis de los Resultados

4.1. Análisis Estadístico: Se presenta en esta sección el análisis estadístico descriptivo univariante y multivariante de las variables bajo estudio.

4.1.1. Análisis Descriptivo Univariante: se expresan aquí, para cada una de las variables en estudio, los valores de la media, desviación estándar, máximo y mínimo.

Tabla 1. Estadísticas Básicas Calidad de la Alúmina

	Sil	Fe	Na	Tit	L ₃₀₀	Lmil	F
Media	0,014	0,0084	0,4042	0,0048	1,3158	0,6458	9,306
Des. Est.	0,0016	0,0014	0,0229	0,0013	0,1384	0,046	1,33
Mínimo	0,010	0,006	0,380	0,003	1,05	0,50	6,80
Máximo	0,018	0,013	0,450	0,007	1,63	0,71	14,00

Fuente: CVG-Venalum

Tabla 2. Estadísticas Básicas Complejo I

	AIF ₃	E	Tb	A	Ca	Mg	Li	Nb	Nm
Media	36,829	1071,89	961,06	9,168	4,845	,9894	,464	25,77	28,17
Des. Est.	4,225	33,663	4,088	1,637	,338	,5024	,267	,879	0,845
Mínimo	28,43	1026,0	955,81	5,98	4,23	,49	,21	24,33	26,60
Máximo	46,66	1147,0	972,72	10,66	5,29	1,98	,94	26,97	29,36

Fuente: CVG-Venalum

Tabla 3. Estadísticas Básicas Complejo II

	AIF ₃	E	Tb	A	Ca	Mg	Li	Nb	Nm
Media	37,82	859,06	960,11	10,523	4,9988	0,5721	0,23	25,0670	28,5085
Des. Est.	5,705	28,20	2,66	1,014	0,084	0,086	0,0436	0,7684	0,7738
Mínimo	29,57	818	956,51	8,25	4,82	0,44	0,19	23,43	26,34
Máximo	60,32	917	966,06	12,03	5,12	0,73	0,322	26,73	29,76

Fuente: CVG-Venalum

Tabla 4. Estadísticas Básicas Complejo III

	AIF ₃	E	Tb	A	Ca	Mg	Li	Nb	Nm
Media	28,98	750,61	960,78	10,71	4,90	0,40	0,206	21,43	26,26
Des. Est.	4,606	63,21	3,9128	1,69	0,22	0,082	0,035	1,7762	0,9275
Mínimo	21,24	658,0	955,24	7,50	4,38	0,21	0,15	17,60	24,13
Máximo	45,89	873,0	976,20	12,62	5,14	0,54	0,28	26,70	27,78

Fuente: CVG-Venalum

En el gráfico 1 se aprecia el consumo de AIF₃ en los tres complejos de CVG-Venalum, observando que el complejo III, el que usa una nueva tecnología, consume menor cantidad de fluoruro de AIF₃, seguida por complejo I que está en proceso de cambio de tecnología en una de sus líneas y por último el complejo II. Además se aprecia que en los meses donde el consumo es mayor en las tres líneas, es entre julio y octubre de 2001.

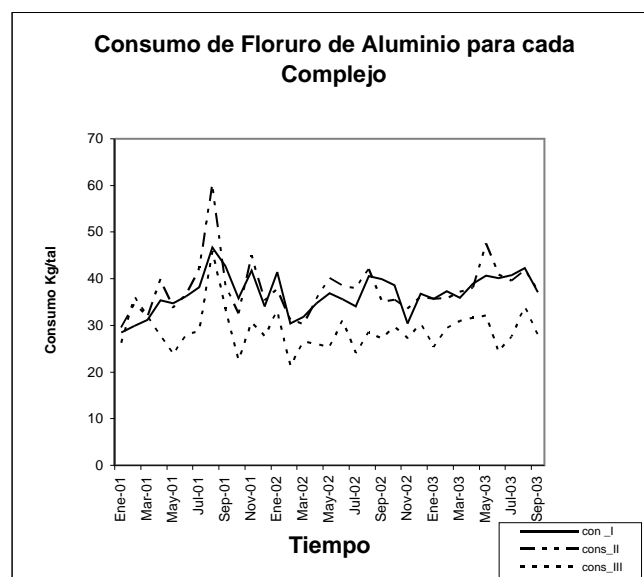


Gráfico 1

Fuente: CVG-Venalum

4.1.2. Resultados del Análisis de Regresión Lineal Múltiple: A continuación se presenta para cada uno de los complejos de CVG-Venalum, un modelo de regresión múltiple, usando como variables dependientes el consumo de AIF₃ por cada complejo y como explicativas o variables independientes, aquellas que permitieron ajustar el modelo ideal.

4.1.2.1. Complejo I. En este complejo se pudo observar, que el consumo promedio de AIF₃, tiene relación directa con la edad promedio de las celdas, la temperatura del baño y el Lo_{i300} y relación inversa con el nivel del metal, el porcentaje de litio y los finos en la alúmina.

El modelo obtenido, que explica el consumo de fluoruro de aluminio, para este complejo es:

$$\text{AlF}_3(\text{kg/tAl}) = -500,40 - 4,92\text{Nm} + 8,12\text{Loi}_{300} - 0,74\text{F} + 0,087\text{E} + 0,618\text{Tb} - 31,07\text{Li}$$

Del análisis, se obtiene lo siguiente:

A medida que el nivel del metal se incrementa en un centímetro, el requerimiento promedio de AlF_3 disminuye aproximadamente en 4,92kg/t-Al. Cuando el porcentaje de finos en la alúmina aumenta en 1% y el de litio en 0,10%, el consumo promedio de AlF_3 desciende 0,74kg/t-Al y 3,17kg/t-Al, respectivamente.

Por otro lado, por cada día que aumenta la edad de la celda, y por cada nuevo grado centígrado ($^{\circ}\text{C}$) en la temperatura del baño electrolítico, el requerimiento medio de AlF_3 se incrementa correspondientemente, en 0,09 kg/t-Al y 0,62 kg/t-Al. Además, al aumentar el porcentaje promedio de pérdida de agua a los 300 $^{\circ}\text{C}$ en la alúmina procedente de Bauxilum en 1%, el consumo promedio de AlF_3 se incrementa en 8,12 kg/t-Al.

Por otro lado, es importante recalcar, que el modelo se ajusta aproximadamente al 72%⁵ de los datos analizados para el Complejo I. El grado de correlación existente entre las variables que constituyen el modelo y el consumo promedio de AlF_3 es de 85%, lo que indica un ajuste del modelo a los datos casi perfecto. (Gráfico 2)

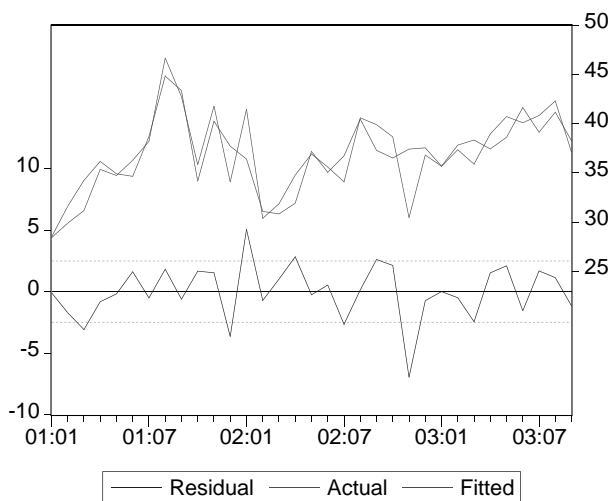


Gráfico 2. Consumo de AlF_3 Complejo I
Fuente: CVG-Venalum

4.1.2.2. Complejo II

Se pudo apreciar, en este Complejo, que el consumo promedio de AlF_3 , tiene relación directa con el nivel y la temperatura del baño, la acidez, el porcentaje de litio y el Loi_{300} y relación inversa con el porcentaje de sodio en la alúmina.

El modelo obtenido, que explica el requerimiento en el consumo de AlF_3 para este complejo es:

$$\text{AlF}_3(\text{kg/tAl}) = -1908,13 + 8,65\text{Loi}_{300} - 90,27\text{Na} + 2,82\text{Nb} + 1,92\text{Tb} + 4,47\text{A} - 62,96\text{Li}$$

De donde:

A medida que se incrementan el nivel del baño en un centímetro y la temperatura del mismo en 1 $^{\circ}\text{C}$, el requerimiento promedio de AlF_3 aumenta en 2,82 kg/t-Al; 1,92 kg/t-Al respectivamente. De manera similar, cuando aumenta el porcentaje promedio de pérdida de agua a los 300 $^{\circ}\text{C}$ en la alúmina procedente de Bauxilum en 1% y la proporción de acidez en 1% la utilización promedio de AlF_3 se incrementa en 8,65 kg/t-Al y 4,47 kg/t-Al cada uno.

Además, se debe recalcar que al disminuir los porcentajes de sodio contenido en la alúmina y el de litio en 0,01% cada uno, el consumo promedio de AlF_3 aumentará en 0,90 kg/t-Al y 0,63 kg/t-Al respectivamente.

Por otro lado, el grado de correlación entre las variables que constituyen el modelo y el consumo promedio de AlF_3 es del 93%, teniendo en cuenta, además, que este modelo se ajusta al 86% de los datos analizados para este complejo, lo cual se aprecia en el siguiente gráfico donde el modelo se ajusta muy bien a los datos.

4.1.2.3. Complejo III

Se puede observar en este complejo, que el requerimiento promedio de AlF_3 , tiene relación directa con el Lmil, la acidez, el porcentaje de calcio y de titanio en la alúmina, y relación inversa con el nivel del metal en las celdas electrolíticas.

El modelo alcanzado, que explica el consumo de AlF_3 para este complejo es:

⁵ Coeficiente de determinación: determina el porcentaje de la variabilidad total que es explicado por el modelo. Se denota por R^2 .

$$\text{AlF}_3(\text{kg/tAl}) = 65,73 - 4,56\text{Nm} + 945,49\text{Ca} + 48,43\text{Lmil} + 1592,4\text{Tit} + 1,6534\text{A}$$

Del análisis se obtuvo lo siguiente:

A medida que el Lmil se incrementa en 0,01% y la acidez en el baño electrolítico en 1%, el comportamiento en el consumo promedio de fluoruro de aluminio se incrementa en 0,48 kg/t-Al y 1,65 kg/t-Al respectivamente.

De igual manera, cuando los porcentajes de calcio y titanio-vanadio contenidos en la alúmina aumentan en 0,001% cada uno, el requerimiento promedio de AlF_3 se incrementa en 0,946 kg/t-Al y 1,59 kg/t-Al respectivamente.

Además, a medida que el nivel de metal en las celdas electrolíticas aumenta en 1cm., el requerimiento de AlF_3 disminuye en 4,56 kg/t-Al.

Por otro lado, el grado de correlación entre las variables que constituyen el modelo y el consumo de fluoruro de aluminio para este Complejo, es de 81%, teniendo en cuenta, además, que este modelo se ajusta al 66% de los datos analizados para el mismo, lo cual se aprecia en el gráfico 4, donde el ajuste del modelo a los datos es bastante aceptable.

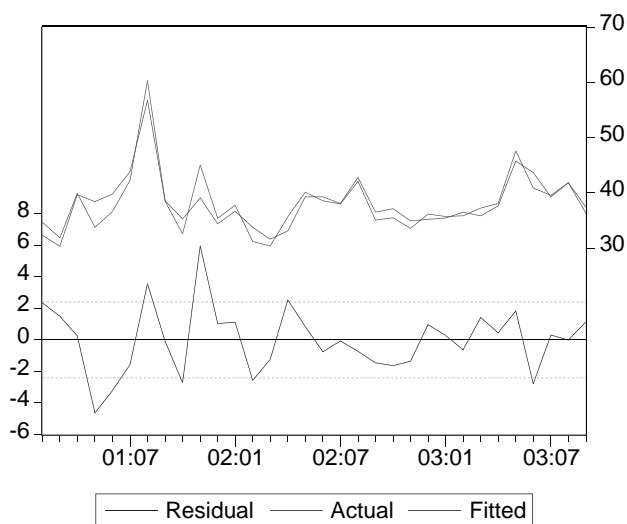


Gráfico 3. Consumo de AlF_3 Complejo II
 Fuente: CVG-Venalum

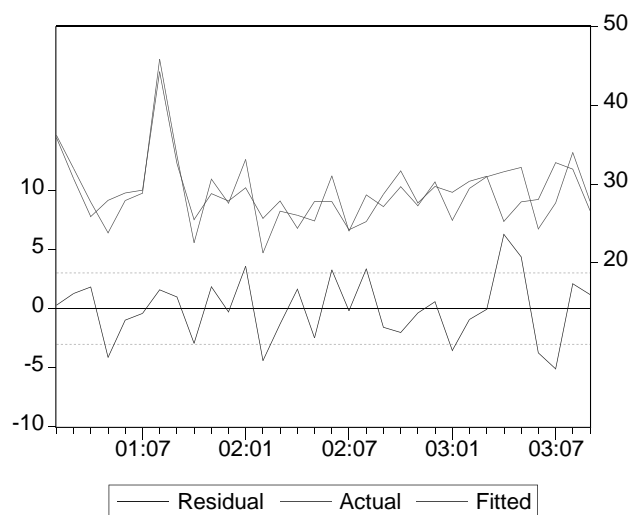


Gráfico 3. Consumo de AlF_3 Complejo II
 Fuente: CVG-Venalum

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones

A través del análisis estadístico anterior se puede observar que los complejos bajo la tecnología Reynolds P-19 (Complejos I y II), tienen en común las variables litio, temperatura de baño y porcentaje de humedad en la alúmina a los 300°C. De donde se puede apreciar que:

- Al aumentar el porcentaje de litio en 0,10%, el requerimiento promedio de AlF_3 disminuye el doble para el complejo II con respecto al complejo I.
- Cuando la temperatura del baño electrolítico se incrementa en 1°C, el consumo promedio de AlF_3 es aproximadamente tres veces mayor para el complejo II que para el complejo I.
- La cantidad de agua removida a los 300°C (Loi_{300}) tiene un comportamiento similar para los dos complejos.

Con respecto al complejo de tecnología hydro-aluminum utilizada por el complejo III con respecto a los complejos I y II, se tiene:

- Al incrementarse el nivel de metal en 1 cm., el comportamiento en el requerimiento promedio de AlF_3 disminuye casi en la misma proporción para los complejos I y III.

— Cuando la acidez aumenta en 1%, el consumo promedio de AlF_3 se incrementa 2,7 veces más en el complejo II que en el complejo III.

Es importante señalar que, en los complejos I y II, la variable representativa de la humedad que fue significativa fue Loi_{300} mientras que en el complejo III fue Loi_{1000} .

Por otro lado, los modelos obtenidos en las ecuaciones (1), (2) y (3), explican 72%, 86% y 66% del Consumo de Fluoruro de Aluminio, para los complejos I, II y III respectivamente.

El grado de asociación entre el Consumo de Fluoruro de Aluminio y las variables que involucran los modelos para los complejos I, II y III es 85%, 93% y 81% respectivamente.

4.2. Recomendaciones

Se recomienda utilizar los modelos obtenidos en este estudio con la finalidad de tomar acciones de tipo preventivo y correctivo relacionados con la humedad en el comportamiento del consumo de fluoruro de aluminio en la Empresa.

Unificar los modelos de los complejos I y II, para obtener un único modelo que me permita explicar y predecir el consumo de fluoruro de aluminio para la tecnología P-19.

Hacer un análisis utilizando el mismo procedimiento visto anteriormente, pero haciendo el ajuste con datos diarios, para obtener así una mayor precisión en los resultados.

Proponer escenarios de rangos sobre las variables independientes o explicativas, para poder efectuar, de esta manera, predicciones sobre el consumo de AlF_3 a lo largo del tiempo.

Referencias Bibliográficas

- Anderson, T., (1984), **An Introduction to Multivariate Statistical Analysis**. New York: *John Wiley & Sons*.
- Jonson, R. y Dean, W. (1982), **Applied Multivariate Statistical Análisis**. Englewood Cliffs, N.J.: *Prentice Hall, Inc.*
- Kelejian, H. y Oates, W., (1995), **Introducción a la Econometría: Principios y Aplicaciones**. New York: *Harper & Row Publisher, Inc.*
- Manual para Ingenieros, (1998), CVG-Venalum.
- Mardia, K., Kent, J. y Bibby J., (1979), **Multivariate Statistical Analysis**. London: *Academic Press, Inc.*
- Neter, J., Wasserman, W y Kutner, M. (1985), **Applied Linear Statistical Models, Regression, Analysis of Variance and Experimental Designs**. Illinois, *Richard D. Irwin, Inc.*
- Sharma, Subhash, (1996), **Applied Multivariate Techniques.**, New York: *John Wiley & Sons*
- SPSS-V-10, Copyright©, *SPSS, Inc.* Disponible En: <http://es.geocities.com/fisical/>, (Fecha de consulta: 18 de abril de 2004).