

# **APLICACIÓN DE UN ANÁLISIS VARIOGRÁFICO EN LA DETERMINACIÓN DE UN PLAN DE MUESTREO EN FLUJOS DE MATERIAL PARTICULADO EN INGREDION COLOMBIA S.A.**

C. Riccio Rengifo<sup>1</sup>

1. *Estudiante de Matemáticas Aplicadas. Pontificia Universidad Javeriana - Cali. criccio35@javerianacali.edu.co*

## **RESUMEN**

El presente proyecto describe una metodología para determinar planes de muestreo en flujos de material particulado, basado en un método estadístico denominado análisis variográfico y cumpliendo con la norma técnica colombiana NTC 5290-2.

El proyecto surgió como una aplicación al proceso de muestreo en flujos de material particulado en la empresa Ingredion Colombia S.A., sin embargo es aplicable a cualquier compañía que realice muestreo de este tipo de material.

La metodología propuesta parte de un muestreo sistemático, donde un muestreador automático toma incrementos de material a intervalos fijos de tiempo durante el proceso de empaque de un lote, obteniendo una muestra final compuesta por estos incrementos. Esta metodología se basa en el comportamiento de la característica de calidad con mayor variabilidad de cada producto. Entre más variable sea un producto, mayor será el número de incrementos y más corto el intervalo de muestreo, permitiendo obtener un espectro suficientemente amplio del comportamiento del lote y por ende una muestra estadísticamente representativa del lote al que pertenece.

En el proceso de muestreo de Ingredion Colombia S.A. una parte de la muestra es utilizada en los análisis de laboratorio y la cantidad restante es enviada a reproceso. La metodología utilizada actualmente para este proceso de muestreo carece de un soporte estadístico que la avale y evidencia un alto nivel de desperdicio debido a la gran cantidad de material reprocesado. Bajo estas circunstancias, la empresa buscaba una metodología de muestreo estadísticamente fundamentada que ayudara a disminuir la cantidad de material reprocesado. La metodología propuesta en este proyecto no solo le da el soporte estadístico al proceso de muestreo de la empresa sino que al aplicarla a dos productos de la compañía, se determinó un plan de muestreo que disminuye la cantidad de material reprocesado por lote en un 66% y 77% respectivamente.

## **INTRODUCCIÓN**

Ingredion Colombia S.A. es una afiliada de la empresa Ingredion Incorporated. La planta Cali de Ingredion Colombia S.A. se dedica a la producción de ingredientes a base de maíz, donde una gran parte de su producción consiste en productos de carácter particulado, es decir, cuyas partes componentes no son distinguibles a nivel macroscópico. Para asegurar la calidad de estos productos al usuario se requiere de un proceso de muestreo. El proceso de muestreo utilizado actualmente en la empresa para este tipo de material carece de un soporte bibliográfico y se desconoce si posee o no un soporte estadístico que lo avale. Adicionalmente se ha evidenciado un alto nivel de desperdicio de material durante este proceso, ya que solo una parte de la muestra es utilizada en los análisis de laboratorio y como contramuestra, enviando a reproceso la cantidad de muestra restante. Por lo tanto en el presente trabajo se ha definido un plan de muestreo para flujos de material particulado, fundamentado en un modelo estadístico. De acuerdo a la Norma Técnica Colombiana 5290-2 se define el tipo de muestreo a utilizar para este tipo de material, se describe la metodología para realizar un análisis variográfico de un conjunto de datos y se diseña un esquema de muestreo rutinario basado en un análisis variográfico, que pueda ser implementado en

empresas de producción de material particulado en corriente continua. Finalmente esta metodología propuesta es aplicada a dos productos de Ingredion Colombia S.A. obteniendo el respectivo plan de muestreo rutinario para cada producto.

## FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### Sobre la NTC 5290-2

La Norma Técnica Colombiana 5290-2 se titula aspectos estadísticos del muestreo de materiales a granel. Parte 2: muestreo de materiales particulados. Es una adopción idéntica (IDT) por traducción de la ISO 11648-2:2003. La parte de esta norma que concierne al presente proyecto es en la que se establecen los métodos básicos para muestreo de materiales particulados a granel provenientes de corrientes móviles en lotes unidimensionales [1].

### Herramientas de control estadístico

El **resumen de estadísticas** comprende todas las herramientas básicas, de estadística descriptiva, que permiten presentar y caracterizar el comportamiento de un conjunto de datos.

La **prueba de normalidad Anderson-Darling** es la prueba de bondad de ajuste más potente a nivel estadístico y sirve para validar el supuesto de que una muestra de datos proviene de una población con distribución normal [2].

Los **gráficos de control** se utilizan en la industria como una técnica de diagnóstico para supervisar procesos de producción e identificar inestabilidad y circunstancias anormales. Representan los datos del proceso en orden cronológico para monitorear el comportamiento de una característica o variable crítica del proceso de producción, ayudando a identificar variaciones naturales o asignables [2].

El **análisis de capacidad** de proceso revela que tan capaz es el proceso de elaborar productos o prestar servicios que cumplan con las especificaciones definidas por las necesidades del cliente [2] y da una idea de cómo mejorar el proceso y mantener dichas mejoras [3].

### Semivariograma

El **semivariograma** es una herramienta que permite analizar el comportamiento espacial de una variable, reflejando en una gráfica la forma en que un punto tiene influencia sobre otro a diferentes distancias de acuerdo al cálculo de la semivarianza  $\gamma(h)$  como se muestra en la ecuación (1).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} Var[Z(x+h) - Z(x)]$$
$$\gamma(h) = \frac{1}{2 N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i+h) - Z(x_i))^2 \quad (1)$$

Donde  $Z(x_i)$  es el valor de la variable en un sitio  $x_i$ ,  $Z(x_i+h)$  es otro valor muestral separado del anterior por una distancia  $h$  y  $N(h)$  representa el número de parejas que se encuentran separadas por una distancia  $h$ .

En palabras, la **semivarianza** es la mitad del promedio de las varianzas de parejas de valores tomados a una misma distancia. Y el **semivariograma** corresponde al gráfico de la semivarianza de las muestras tomadas a una misma distancia contra la distancia  $h$  entre dichas muestras [4].

## RESULTADOS

### Definición del tipo de muestreo

En este proyecto, la población de interés corresponde a lotes de material particulado que fluye en corriente continua por los canales y tuberías que conducen el material terminado a la sección de empaque. El flujo de material tiene una duración determinada para cada lote, por lo que se puede decir que es una población que se extiende en el tiempo. De acuerdo a la NTC 5290-2, el muestreo más adecuado para este tipo de material es el muestreo sistemático, que se aplica para tomar incrementos de materiales particulados durante el transporte, en lugar del muestreo aleatorio simple de materiales particulados estáticos, porque es más fácil de realizar y mecanizar [1]. Es decir que se toman muestras a intervalos fijos de tiempo  $\Delta t = T/n$ , donde  $T$  es el tiempo de duración del lote y  $n$  la cantidad de muestras a tomar.

### Descripción de la metodología para realizar un análisis variográfico

1. Calcular el semivariograma experimental de un conjunto de datos recolectados en orden cronológico.
2. Ajustar los puntos del semivariograma experimental a un modelo teórico de semivariograma denominado modelo esférico.

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left( \frac{3}{2} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{1}{3} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right), & h \leq a \\ C_0 + C_1, & h > a \end{cases} \quad (2)$$

3. Ajustar los primeros puntos del semivariograma experimental a una línea recta  $y = \beta_1 x + \beta_0$ . La NTC 5290-2 establece que, por lo general, en los semivariogramas que ocurren en la práctica pueden aproximarse a una línea recta en sus primeros 4 puntos. Hacer el ajuste lineal con más puntos dependerá del comportamiento del semivariograma teórico, seleccionando los primeros puntos consecutivos que se encuentran por debajo de la meseta.

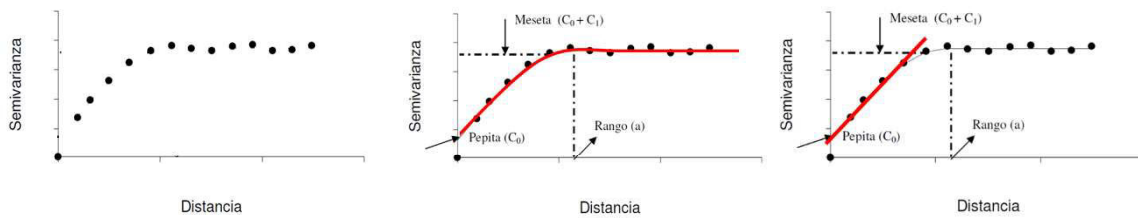


Figura 1. Pasos de un análisis variográfico

### Metodología propuesta para determinar plan de muestreo en flujos de material particulado

- a. Definir el propósito para el cual se tomarán las muestras (verificación de la calidad, monitoreo del desempeño de la planta, control de procesos, etc.)
- b. Identificar el producto y las características de calidad por medir.
- c. Definir el lote, incluyendo su masa ( $M_{lot}$ ) y/o duración ( $T_{lot}$ ).
- d. Verificar que los procedimientos y equipos para toma de incrementos no tengan sesgo significativo, por ejemplo que el tamaño de las boquillas y tuberías del muestreador permitan el paso de la partícula más grande de material; también se debe especificar la masa mínima de incremento ( $m_i$ ), es decir, la cantidad mínima de material que se debe sacar cada que se toma una muestra.

- e. Realizar el muestreo experimental: Tomar un número  $p$  (de 20 a 40 por recomendación de la norma NTC 5290-2) de incrementos individuales del lote y medir todas las características de calidad en cada incremento.
- f. Análisis de los resultados del muestreo experimental.
- Análisis estadístico: A los datos recolectados de cada variable aplicar las herramientas de control estadístico y seleccionar aquellas variables que sigan un comportamiento normal, tengan el menor número de variaciones asignables en los gráficos de control y sean capaces de cumplir con las especificaciones según el análisis de capacidad de proceso.
  - Análisis variográfico: Realizar el análisis variográfico de las variables seleccionadas con el análisis estadístico.
  - Identificar y seleccionar la variable crítica del proceso: Seleccionar la variable con el mayor valor de  $\beta_1$  en el análisis variográfico, es decir la de mayor variabilidad.
  - Especificar la varianza de muestreo requerida ( $S_s^2$ ), es decir, aquella que la compañía considera debe ser la varianza objetivo para la variable crítica seleccionada.
- g. Determinar el número de incrementos  $n$  por tomar del lote con la ecuación (3).

$$n = \frac{\beta_0 + \sqrt{\beta_0^2 + (2/3) \cdot \beta_1 \cdot T_{lot} \cdot S_s^2}}{2 \cdot S_s^2} \quad (3)$$

Dónde  $\beta_0$  y  $\beta_1$  son los coeficientes de la regresión lineal del análisis variográfico,  $T_{lot}$  es el tiempo de duración del proceso de empaque del lote y  $S_s^2$  es la varianza de muestreo requerida.

- h. Determinar la masa mínima de muestra compuesta ( $m_T$ ) con la ecuación (4).

$$m_T = m_I \cdot n \quad (4)$$

Donde  $m_I$  es la masa de cada incremento, es decir la cantidad de material que se debe sacar cada vez que se toma una muestra y  $n$  es el número de incrementos.

- i. Determinar el intervalo de muestreo ( $\Delta t$ ) con la ecuación (5).

$$\Delta t = \frac{T_{lot}}{n} \quad (5)$$

Donde  $T_{lot}$  es el tiempo de duración del proceso de empaque del lote y  $n$  es el número de incrementos.

- j. Tomar el número  $n$  de incrementos primarios calculado en el literal (g), conformando la muestra final. Es decir, durante el periodo total de manipulación del lote ( $T_{lot}$ ), se recolecta un incremento (muestra) cada  $\Delta t$  unidades de tiempo, como se indica en el literal (i), hasta completar  $n$  incrementos.

La secuencia anterior incluye procedimientos de muestreo experimental, tales como el paso (e) y (f), que no son de rutina y se realizan con poca frecuencia, como por ejemplo, cuando existe una alteración importante en las condiciones tales como un cambio en la fuente del material particulado o en el equipo de muestreo, para determinar un nuevo plan de muestreo cada que estas condiciones cambien.

### **Aplicación de la metodología propuesta en Ingredion Colombia S.A.**

La metodología propuesta en este documento se aplicó a dos productos de la empresa Ingredion Colombia S.A. El plan de muestreo resultante para los dos productos (A y B) se muestra en la Tabla 1 donde también se compara estos resultados con la metodología actual.

Tabla 1. Comparación de la metodología de muestreo actual y la propuesta en los productos A y B

Producto	A		B	
Tipo de muestreo	sistemático		sistemático	
Metodología	Actual	Propuesta	Actual	Propuesta
Masa del lote [Ton]	31,5	31,5	6,3	6,3
Duración del lote [min]	302,4	302,4	226,8	226,8
Número de incrementos n	45	33	45	29
Masa del incremento $m_I$ [gramos]	100	30	100	30
Masa muestra compuesta $m_T$ [gramos]	4500	990	4500	870
Intervalo de muestreo $\Delta t$ [min]	7	9	5	7
Masa de muestra utilizada [gramos]	830	830	830	830
Masa de muestra reprocesada [gramos]	3670	160	3670	40
Porcentaje de muestra reprocesada por lote	82%	16%	82%	5%

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El presente proyecto permitió diseñar una secuencia de pasos que puede ser implementada en cualquier industria para determinar planes de muestreo para flujos de material particulado, basado en un análisis variográfico de las características de calidad del material y cumpliendo con la norma NTC 5290-2. La trascendencia del proyecto está en el hecho de que permite garantizar que la toma de decisiones de una compañía, sobre productos de material particulado, esté basada en un método estadístico acorde a la naturaleza del material a muestrear, además del aporte a la investigación y difusión de una técnica de muestreo que hasta el momento ha sido poco estudiada e implementada en empresas que requieren este tipo de muestreo.

Particularmente para la empresa Ingredion Colombia S.A., el plan de muestreo propuesto no solo da un fundamento estadístico al proceso de muestreo, sino que disminuye la cantidad de material reprocesado por lote en un 66% en el producto A y un 77% en el producto B. De manera que si se implementara esta metodología en todos sus productos de carácter particulado, representaría un ahorro potencial aproximado de \$20.000.000 de dólares anuales.

El muestreo en flujos de material particulado es un tema muy amplio que debe seguir estudiándose. Algunos temas para investigaciones futuras pueden ser el estudio de la precisión y el error del muestreo de flujos de material particulado, la implementación de control estadístico de calidad de los productos, profundización en la estimación e interpretación del semivariograma y su uso en el muestreo de materiales particulados [5], o muestreo geoestadístico [4].

## REFERENCIAS

- [1] ICONTEC, NTC 5290-2 Aspectos estadísticos del muestreo de material a granel. Parte 2: Muestreo de materiales particulados, 2004.
- [2] Minitab Inc, «Soporte técnico de Minitab 17,» 2016. [En línea]. Available: <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/>.
- [3] L. E. Vinasco, Guía de laboratorios Control Estadístico de Procesos, Cali: Sello Editorial Javeriano, 2009.
- [4] R. Giraldo, Introducción a la geoestadística: Teoría y aplicación., Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2002.
- [5] L. Petersen y K. H. Esbensen, «Representative process sampling for reliable data analysis - a tutorial,» Journal of chemometrics, vol. 19, n° 11-12, pp. 625-647, 2005.