

METODOLOGÍA DE COMPARACIÓN PARA LA PREDICCIÓN DE LOS ATRIBUTOS DE LAS PELLAS DE PLANTA A PARTIR DE LAS PELLAS DE LABORATORIO

Yunnelio del V. Cedeño^{a, b, c}, Ana C. Cachutt^a, Ruselkis Flores^b, Olga Prado^c

^aDepartamento de Asistencia Técnica de Productos Primarios de SIDOR, C.A. Puerto Ordaz – Venezuela. sircyz@sidor.com; <http://www.sidor.com>

^bUniversidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”. Puerto Ordaz – Venezuela. <http://www.poz.unexpo.edu.ve>

^cCoordinación de Modelos de SIDOR, C.A. Puerto Ordaz – Venezuela. sirhol@sidor.com

Palabras Clave: Ley de los Grandes Números, Metodología de Comparación, Variación del mineral, Pellas.

Resumen. El procesamiento de mineral proveniente de yacimientos heterogéneos en los últimos años en Sidor C.A., ha originado cambios en la calidad de las pellas obtenidas tanto en Planta como en el Laboratorio de Planta Piloto donde se fabrican aglomerados simulando las condiciones industriales con una muestra del 75% de los lotes de material previo a su consumo. Por lo tanto, surge la necesidad de contar con una metodología de comparación entre los atributos de las pellas de ambos procesos que permita predecir los rangos de valores de las propiedades de las pellas producidas en planta según los rangos de variabilidad estándar entre los mismos, con el objeto de realizar ajustes efectivos en planta que aseguren la calidad final de los aglomerados. A través de análisis estadísticos entre los que se consideraron análisis de varianza simples, interacción entre factores, comparaciones de dos muestras, gráficos de control, y fundamentados en la Ley de los Grandes Números, se establecieron rangos de predicción válidos para la mayoría de los atributos, destacando la Resistencia a la Compresión y el Índice de Tambor, por el incumplimiento del postulado de dicha ley. Los atributos de Reducibilidad, Hinchamiento e Índice de Abrasión resultaron semejantes tanto en promedios globales como en tendencias centrales durante el periodo evaluado, siendo estos los que presentan mayor validez en las predicciones obtenidas. La ley de los grandes números es un teorema en probabilidades que describe el comportamiento del promedio de una sucesión de variables aleatorias según el número total de variables aumenta, es decir, describe hipótesis suficientes para afirmar que dicho promedio converge al promedio de las esperanzas de las variables aleatorias involucradas sin considerar influencias de las variables intervinientes en los procesos evaluados, ya que solo considera la predicción de valores de una variable respuesta de interés según los rangos de valores que defina un histórico de dicha variable en una población completa contrastada con los rangos de valores de un historico de la misma variable pero en una muestra al azar de una población de gran tamaño.

1 INTRODUCCIÓN

A grandes rasgos el proceso de obtención de acero en Sidor, C.A., una vez extraído el mineral de hierro, comienza con la recepción y preparación del mismo, que luego debe pasar por la fase de peletización y seguidamente se lleva a reducción para obtener hierro metálico que será usado en el proceso de aceración. En este complejo siderúrgico el proceso continúa hasta la obtención de productos terminados como cabillas y bobinas.

En el proceso de reducción directa se usan aglomerados de mineral de hierro llamados pellas y Sidor, C.A. cuenta con una planta peletizadora que tiene un consumo promedio diario de 20.000t de mineral, en la que las pellas obtenidas son caracterizadas y evaluadas en cuanto al cumplimiento de las especificaciones para garantizar una máxima eficiencia durante la reducción.

Es bien sabido que la calidad de un producto esta directamente relacionada con la calidad de las materias primas e insumos necesarios para obtenerlo. Esta afirmación aplica en el proceso de fabricación de pellas utilizadas en la industria siderúrgica, donde las características de las mismas tienen una directa dependencia con las características del mineral de hierro empleado, por lo que se debe llevar un exhaustivo y completo control de este, pero existe una gran complejidad en establecer relaciones entre el material y su comportamiento en la planta por causa de la heterogeneidad y variabilidad de minerales, así como también por las características de los procesos.

Con el fin de conocer las propiedades de las pellas a obtener en planta según las características del mineral recibido, se diseñó en conjunto con el proveedor, una metodología para establecer la influencia de mineral, procesando una muestra del setenta y cinco por ciento de los lotes en el laboratorio de Planta Piloto y Simulación de Sidor antes que lleguen a planta. Básicamente, se hace un análisis mineralógico del material y además se fabrican pellas a escala simulando en lo posible el proceso y las condiciones a nivel de planta y los aglomerados de mineral obtenidos son sometidos a los mismos ensayos que los obtenidos en planta, a fin de obtener pronósticos confiables y reproducibles. Con la información obtenida en el laboratorio acerca del mineral, se puede sugerir con anterioridad los parámetros operativos que se deben modificar en planta para garantizar las propiedades predichas. Es de gran importancia que se pueda hacer estas predicciones, considerando que cada lote tiene un tamaño aproximado de 150.000t que debe proveer la planta durante siete días según el consumo diario de mineral antes mencionado.

Este estudio tiene por objeto establecer una metodología de comparación que permita predecir el rango de valores de los atributos de las pellas producidas en Planta mediante proyecciones de los atributos de las pellas obtenidas a escala piloto según el rango de variabilidad estándar entre los mismos. De este modo será posible prever el comportamiento del material durante su procesamiento en planta y también poder indicar más rápida y eficazmente los parámetros operacionales que se deben monitorear, es decir, darle un mejor y completo uso a la información obtenida en el laboratorio.

2 PROCEDIMIENTO

Básicamente el estudio es un análisis estadístico en el que se tomaron como muestra los datos obtenidos de las progresivas caracterizaciones de las pellas fabricadas en ambos procesos (Planta y Laboratorio) delimitando el periodo entre May'08 – May'09. Una vez recolectada y organizada la data se hicieron análisis de varianza simples, interacción entre factores, comparaciones de dos muestras y se construyeron evolutivos de los atributos de los aglomerados y mineralogías evaluadas, utilizando como herramienta el paquete estadístico

STATGRAPHICS® en dos de sus versiones; Plus 5.0 y Centurion XV.

Los análisis de comparación se llevaron a cabo mediante la metodología típica, considerando las siguientes pruebas: T de student, F de Fisher, W de Wilcoxon y Kolmogorov y Smirnov, relacionando primeramente los valores promedios por día y seguidamente los valores promedios por pilas obtenidos en planta con respecto a los valores por pila obtenidos en el Laboratorio, de los atributos evaluados. Los resultados de estas comparaciones quedaron anulados por la no normalidad de las distribuciones de los valores. Por lo tanto se desarrolló un procedimiento de comparación basado en la Ley de los Grandes Números, tal como se describe en la Figura 1.

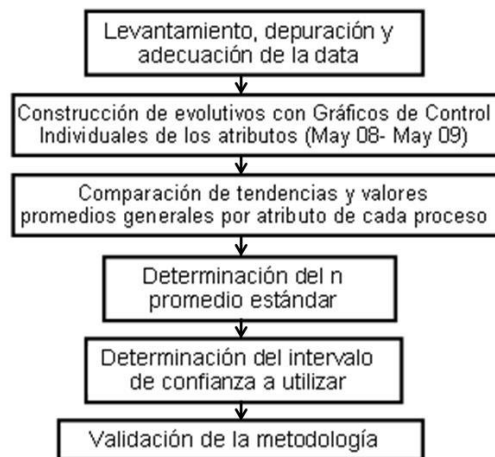


Figura 1. Metodología propuesta

Una vez recolectada la data se procedió a tabular y separar teniendo como criterio la información perteneciente a cada proceso y además cada atributo evaluado. Seguidamente los datos se ordenaron cronológicamente y se eliminaron los valores incongruentes o anómalos de cada propiedad evaluada que pudieran causar dispersión en los análisis estadísticos, utilizando como criterio en este caso los valores muy alejados de las medidas centrales y de las especificaciones. Se eliminaron también los valores correspondientes a periodos de consumo de trenes de mina (que no corresponden a los lotes de mineral evaluados) y los intervalos de valores que comprendieran mezclas de mineral correspondientes a periodos de fin e inicio de pila que pudieran resultar anómalos.

Se construyeron evolutivos en el periodo de estudio, de los atributos de las pellas obtenidas en Planta y en el Laboratorio con gráficos de control individual, empleando como datos los promedios por pila de los atributos de las pellas de planta y los valores únicos por pila de cada atributo de las pellas del laboratorio. Luego se compararon los valores promedios globales del periodo de los atributos de planta, es decir, el promedio de los promedios de los valores de los atributos de cada pila consumida en planta con respecto a la media de los valores de los atributos de las muestras de las pilas procesadas el laboratorio. Estos promedios comparados se obtuvieron con los gráficos de control individuales construidos.

Posteriormente se determinó el valor de “n” para cada atributo, que será el valor de la cantidad de muestras necesarias que se debe establecer para hacer las futuras predicciones. Para esto, basados en la Ley de los Grandes Números y con los valores promedios generales de varianza por cada atributo se empleó la ecuación 1. Para establecer el “n promedio estándar” se promediaron los “n” obtenidos para cada atributo.

$$n = (R_{promlaborat} / R_{promplanta}) ^2 \quad (1)$$

Consecutivamente se determinó el nivel de confianza con el que se harían las futuras predicciones. Para tal fin se elaboró un simulador que permitía evaluar la ecuación 2, considerando $Z\alpha$ ($\alpha=90\%$ conf) = 1,645 y $Z\alpha$ ($\alpha=95\%$ conf)=1,969.

$$\bar{X}_{promlaborat} \pm Z\alpha (R_{promlaborat} / \sqrt{n} \text{ promedio estándar}) \quad (2)$$

Una vez obtenidos los rangos de valores, se procedió a construir gráficos de capacidad de procesos, estableciendo como límites de especificación los valores máximos y mínimos de los rangos obtenidos y evaluando la cantidad de valores que quedaban fuera de rango según el nivel de confianza.

Finalmente para validar la metodología se evaluaron las pilas consumidas en el periodo de estudio y se verificó el cumplimiento del postulado de la ley mencionada, definido en la Ecuación 3.

$$X_{planta} \in [\bar{X}_{laborat} \pm Z\alpha (R \text{ promedio estándar laborat} / \sqrt{n} \text{ promedio estándar})] \quad (3)$$

3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación se presentan evolutivos de los atributos de las pellas obtenidas en Planta y en el Laboratorio contruidos con gráficos de control individual, considerando como límites de control las especificaciones establecidas para la pella producida durante el periodo de estudio. Los evolutivos no están contruidos con respecto al tiempo si no más bien con respecto a las pilas consumidas ordenadas cronológicamente de acuerdo a su fecha de procesamiento.

El evolutivo obtenido con los promedios por pila calculados de la Reducibilidad (Figura 2), exhibe una variable bastante controlada y centrada, con un promedio que apunta a 94,01%, que en relación al promedio obtenido en el evolutivo de la misma propiedad de las pellas de laboratorio resulta un poco menor, con una diferencia de tan solo 0,12%.

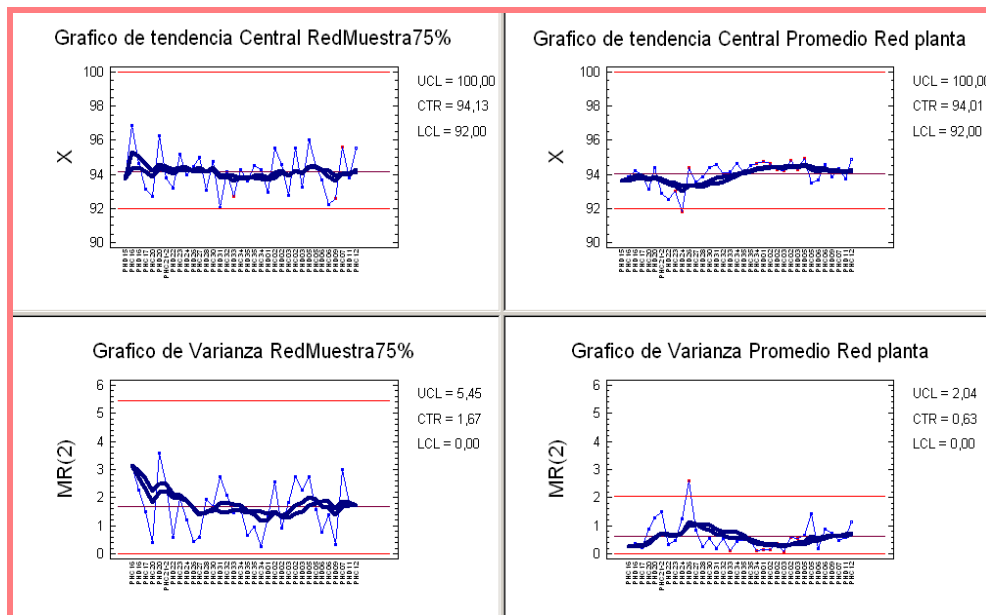


Figura 2. Evolutivos con Gráficos de Control Individuales de la Reducibilidad

Debe destacarse la mayor variación perceptible en los Gráficos de Rango Móvil en los todos los evolutivos de las variables de calidad de las pellas de laboratorio, que puede ser atribuible a que los promedios calculados por pila ocultan las variaciones reales obtenidas

mientras se procesa el material en planta y a que además en el laboratorio se ponen de manifiesto las variaciones debido a las constantes fluctuaciones de las características del mineral sin poder ajustar los parámetros operativos como se hace en planta, sino que deben regirse a las practicas operativas establecidas para llevar a cabo los procedimientos.

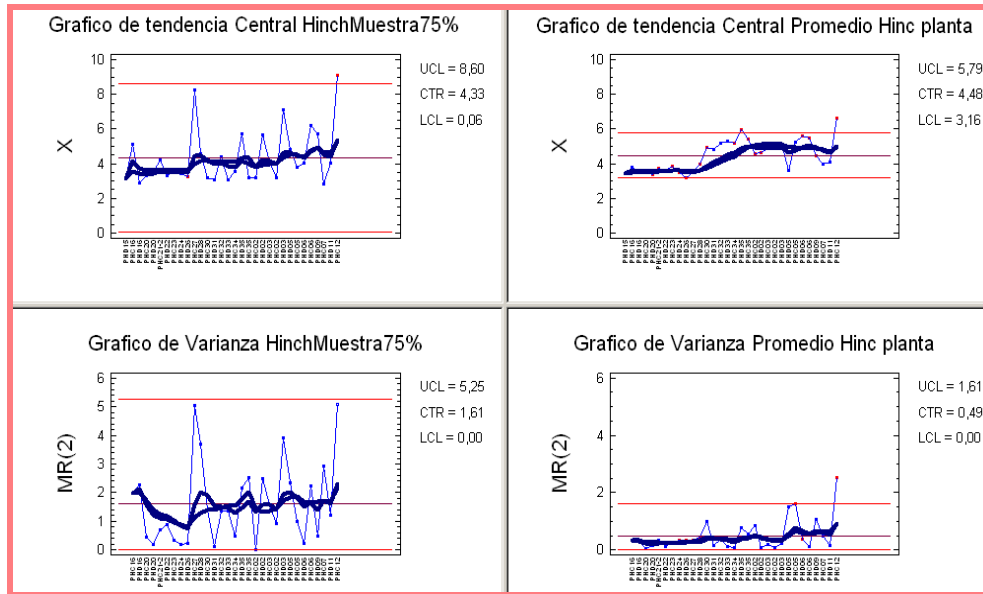


Figura 3. Evolutivos con Gráficos de Control Individuales del grado de Hinchamiento

Concerniente al índice de Degradación a Baja Temperatura (DBT) de los aglomerados, se visualiza en la Figura 4, un comportamiento centrado con respecto a la media que en este caso apunto a 4,83%, en los reportes de las pellas producidas en la planta. Por su parte, el promedio global de los reportes de las pellas producidas en el laboratorio con las muestras del 75% de las pilas evaluadas, apuntó a 4,09%, resultando una significativa diferencia de 0,74% en promedio.

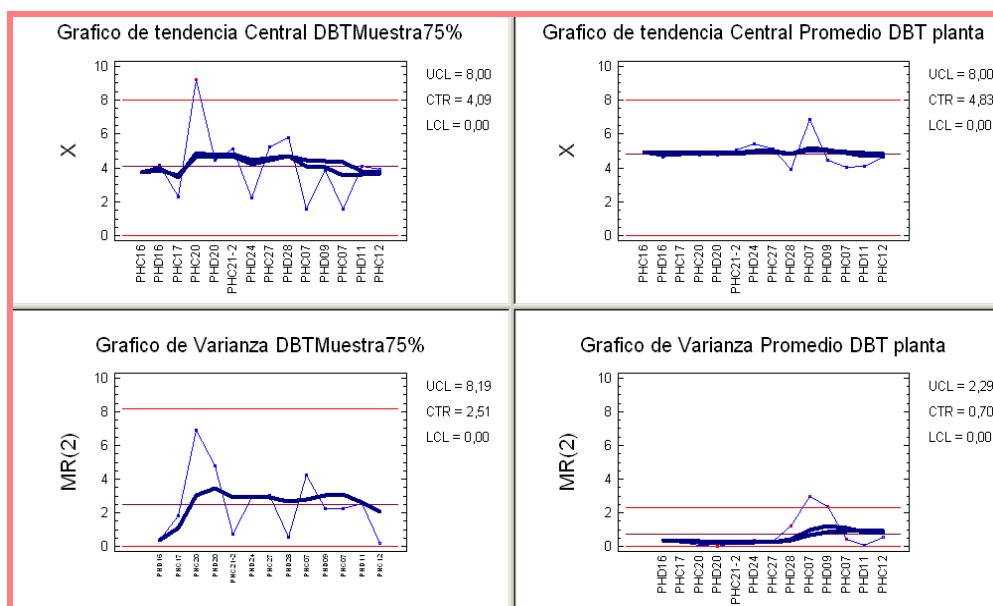


Figura 4. Evolutivos con Gráficos de Control Individuales de la Degradación a Bajas Temperaturas

En lo referente a la Resistencia a la Compresión de las pellas quemadas producidas tanto en Planta como en el Laboratorio, en la Figura 5 se observa una tendencia al incremento hacia finales del periodo evaluado, sin embargo se obtuvo una diferencia entre las medias de 14,15 Kg-f/pella, resultando mayor el valor de planta. Comportamiento analogo se puede apreciar en el comportamiento del Índice de Tambor (IT) de los aglomerados (Figura 6), resultando en este caso una diferencia de 0,59% entre las medias.

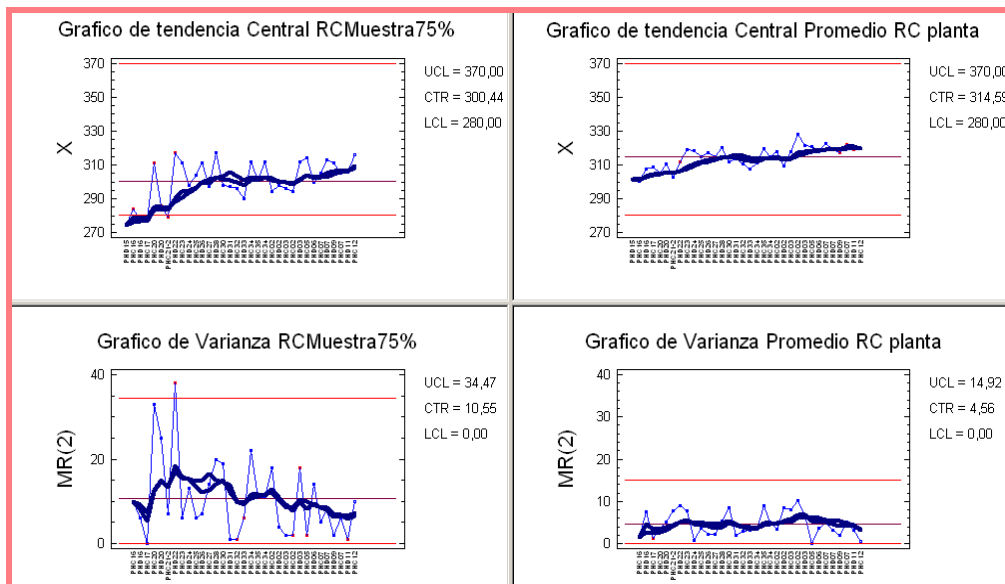


Figura 5. Evolutivos con Gráficos de Control Individuales de la Resistencia a la Compresión

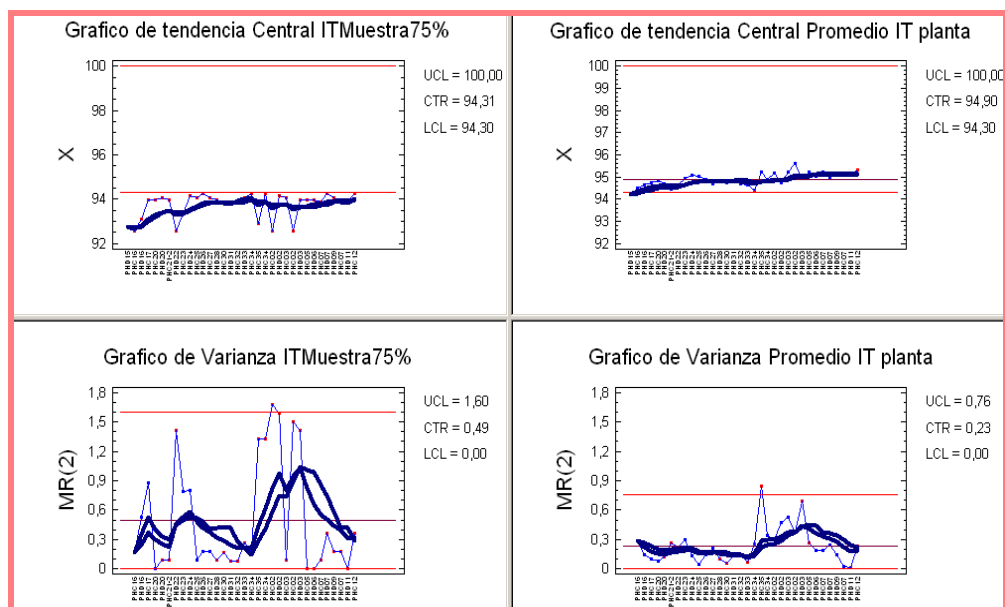


Figura 6. Evolutivos con Gráficos de Control Individuales del Índice de Tambor

Al evaluar el comportamiento del Índice de Abrasión (IA) en la Figura 7, se puede observar que las tendencias de las curvas suavizadas en los gráficos se corresponden al hecho que este atributo es inversamente proporcional al Índice de Tambor (Meyer, 1980), sin embargo destaca una incongruencia al considerar las diferencias obtenidas con los promedios globales

de las pellas obtenidas en los dos procesos evaluados (Planta vs Laboratorio), resultando que para el Índice de Abrasión, no se aprecian distingos significativos (0,05%).

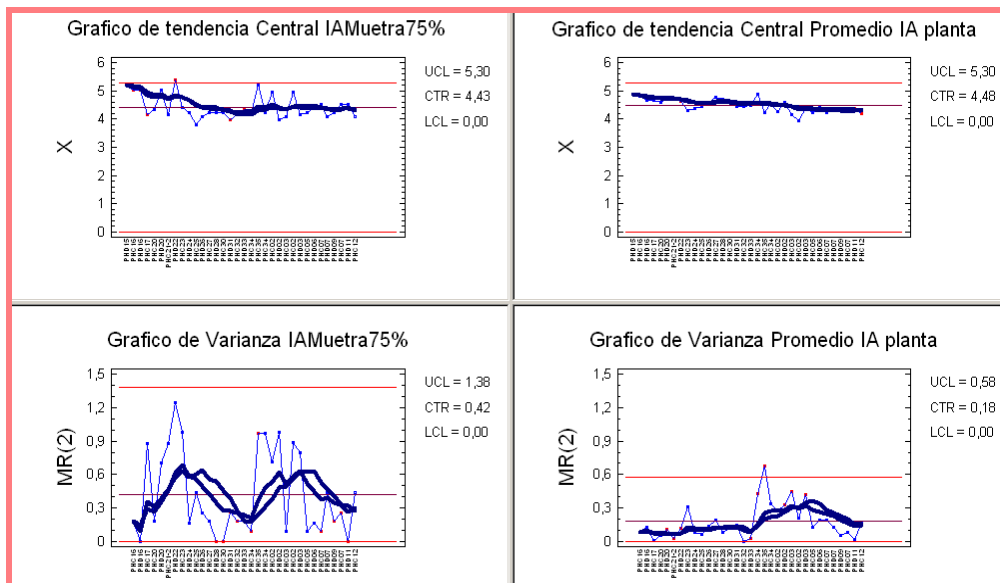


Figura 7. Evolutivos con Gráficos de Control Individuales del Índice de Abrasión

En la Tabla 1, se presenta un resumen donde se contrastan las medias y los rangos promedios de los atributos de planta y del laboratorio obtenidos con los gráficos de control. Destacan como se ha comentado anteriormente las mayores diferencias en el DBT, el Índice de Tambor y la Resistencia a la compresión.

	Valores Promedios		Rangos Promedios	
	Planta	Laboratorio	Planta	Laboratorio
DBT	4,83%	4,09%	0,70%	2,51%
Hinchamiento	4,48%	4,43%	0,49%	1,61%
Reducibilidad	94,01%	94,13%	0,63%	1,67%
IA	4,48%	4,43%	0,18%	0,42%
IT	94,90%	93,81%	0,23%	0,49%
RC	314,59 Kg-f/pella	300,44 Kg-f/pella	4,56 Kg-f/pella	10,55 Kg-f/pella

Tabla 1. Resumen de valores promedio por atributo del periodo evaluado

Considerando los requerimientos de la fórmula planteada para hacer las predicciones, se procedió a calcular “n”, valor que representa la cantidad de datos necesarios para hacer los pronósticos y el cual debe estandarizarse, estableciendo relaciones entre los rangos promedios de los atributos de planta y del laboratorio (Ecuación 1). El “n promedio estándar”, en este caso apuntó a 8 muestras tal como se observa en la Tabla 2.

	Valores de "n"
DBT	12,82
Hinchamiento	10,79
Reducibilidad	7,02
IA	5,44
IT	4,53
RC	5,35
"n promedio estandar"	7,65 = 8

Tabla 2. Resumen de valores “n” por atributo del periodo evaluado

Una vez establecido el “n promedio estándar” se calcularon los intervalos de confianza. Para esto se elaboró un simulador que permitió evaluar la Ecuación 2. Dicha ecuación relaciona el promedio global y el rango promedio del atributo del laboratorio, el valor “n” y un coeficiente ($Z\alpha$) asociado al porcentaje de confianza con el que se decida trabajar. En este trabajo se escogieron los coeficientes asociados a 90 y 95% de confianza, dado que para el caso de tratamientos estadísticos de datos provenientes de procesos con material a granel, son estas las proporciones de confianza típicas. Trabajar con mayores rangos de confianza se traduciría en la inclusión de mayores valores alejados de los intercuartiles definidos por los datos (García, 2002). En la Tabla 3 se presentan los rangos obtenidos al evaluar la ecuación para los atributos tratados.

<i>Atributos</i>	Intervalos de confianza			
	<i>90 % confianza</i>		<i>95 % confianza</i>	
	<i>Limite superior</i>	<i>Limite inferior</i>	<i>Limite superior</i>	<i>Limite inferior</i>
DBT	5,65	2,53	5,96	2,22
Hinchamiento	5,33	3,33	5,53	3,13
Reducibilidad	95,17	93,09	95,37	92,89
IA	4,69	4,17	4,74	4,12
IT	94,61	94,01	94,67	93,95
RC	307,00	293,88	308,29	292,59

Tabla 3. Intervalos de confianza por atributo

Al obtener los rangos se procedió a validar el postulado de la Ley en la que se fundamenta la metodología, el cual establece que el valor promedio de las medias de una población de subgrupos de valores debe pertenecer al rango definido por el promedio de subgrupos de valores de una muestra de dicha población con mas o menos una desviación definida por el rango promedio resultante entre los valores de la muestra. En la mayoría de los atributos evaluados se cumplió el planteamiento para ambos intervalos de confianza, destacando solo la Resistencia a la Compresión y el Índice de Tambor, cuyos valores promedios globales no entraron en los rangos resultantes con ninguno de los porcentajes de confianza.

Ante los resultados obtenidos, se hizo un análisis de comparación de dos muestras para la Resistencia a la compresión de las pellas (Figura 8). Destaca en el grafico de trazas de densidad, una aparente distribución bimodal de los valores del laboratorio. En el gráfico cuantil-cuantil se observa un patrón de puntos paralelos a la diagonal, lo que corrobora que los valores del laboratorio se mantienen a una distancia casi constante con respecto a los de planta. Por esta razón, para este atributo no se podrán hacer predicciones hasta que se obtengan valores del laboratorio más próximos a los de planta.

En lo que corresponde al Índice de tambor, la raíz del problema es el constante desplazamiento que presentan los valores de laboratorio con respecto a los de planta. Este hecho se puede apreciar en los evolutivos presentados anteriormente. No obstante, en la Figura 9 se muestran los gráficos resultantes del análisis de comparación de dos muestras, en los que se puede visualizar la total incongruencia entre los valores de laboratorio y los de planta. Se presume que en el laboratorio se puede estar cometiendo un error sistemático al momento de realizar el ensayo, dado que a lo largo del periodo evaluado, no se logró cumplir con el valor mínimo según la especificación definido en 94,3%. Debido a esto, tampoco se podrán hacer predicciones de los rangos de valores hasta obtener resultados en el laboratorio más cercanos a los de planta.

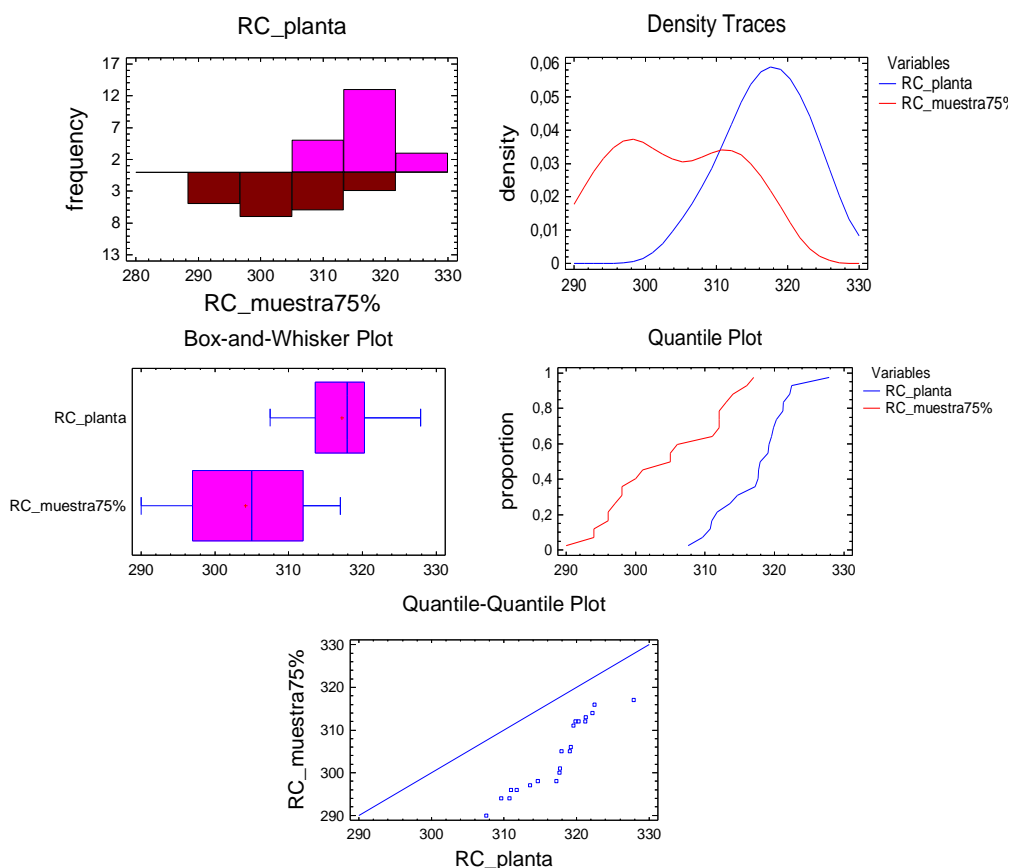


Figura 8. Gráficos resultantes de la comparación de la Resistencia a la Compresión (Promedios de pilas procesadas en Planta vs valores de Laboratorio)

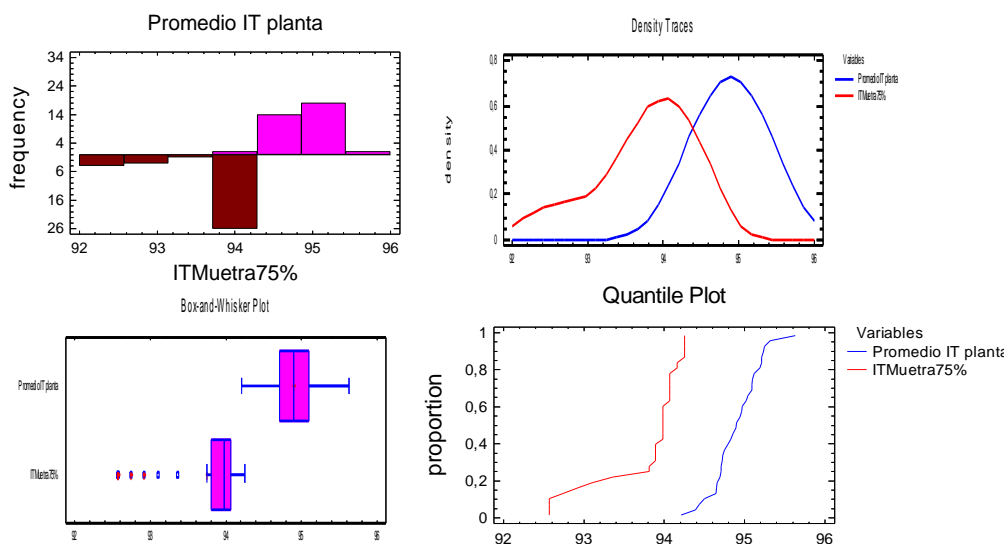


Figura 9. Gráficos resultantes de la comparación del Índice de Tambor (Promedios de pilas procesadas en Planta vs valores de Laboratorio)

Finalmente, se construyeron gráficos de Capacidad de Procesos, en los que los límites de especificación fueron los valores máximos y mínimos de los rangos obtenidos. Se verificó la cantidad de valores que quedaban fuera de rango según el nivel de confianza, obteniéndose que con 95% de confianza se excluyeron menos valores, lo que es lógico dado que es más

amplio el rango. En la Figura 10 se muestran los gráficos de Capacidad de Proceso de la Reducibilidad y de la Resistencia a la Compresión, donde para el primero se ve un aceptable cumplimiento de la predicción del rango para los dos niveles de confianza evaluados, mientras que para el segundo resultado invalido el rango, tal como se esperaba, obteniéndose mas del 80% de los valores fuera de los rangos establecidos. En la Tabla 4, se presentan los valores totales de datos fuera de rango para cada atributo. Se debe considerar el 90% como el intervalo de confianza estándar para hacer las futuras predicciones hasta tanto se hagan estudios con mayor volumen de datos que permitan optimizar la metodología y ampliar este rango al 95%.

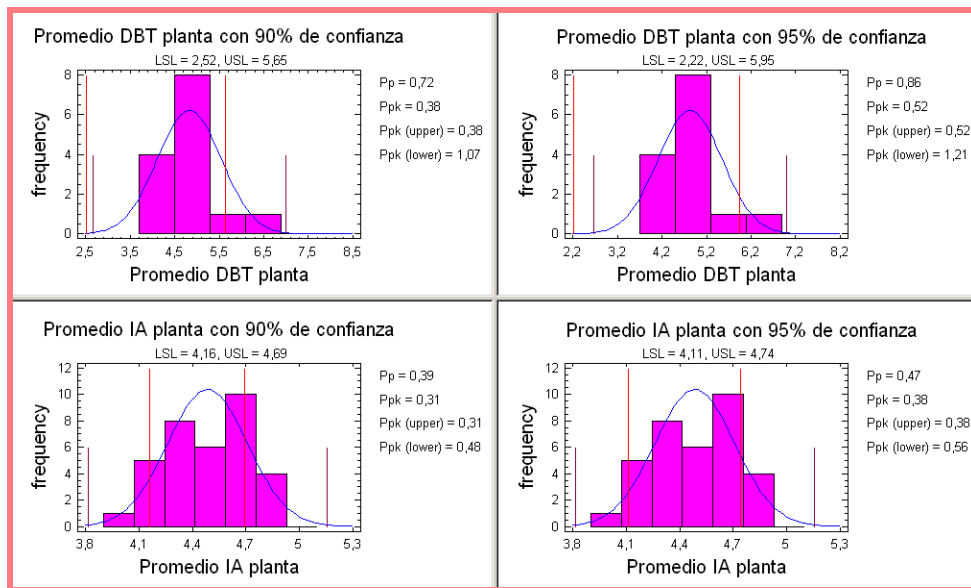


Figura 10. Evolutivos con Gráficos de Control Individuales del Índice de Abrasión

Atributos	Valores totales observados fuera de rango	
	90 % confianza	95 % confianza
DBT	7,14%	7,14%
Hinchamiento	18,75%	9,37%
Reducibilidad	11,42%	8,57%
IA	23,52%	14,70%
IT	88,23%	79,41%
RC	88,23%	82,35%
Num Caidas LA	52,77%	47,22%
Num Caidas LB	61,76%	50,00%

Tabla 3. Intervalos de confianza por atributo

Debe tomarse en cuenta que el desarrollo de modelos matemáticos sustentados en el postulado de la Ley de los Grandes Números, no considera influencias de las variables intervinientes en los procesos evaluados como los modelos estadísticos de correlación, ya que solo considera la predicción de valores de una variable respuesta de interés según los rangos de valores que defina un histórico de dicha variable en una población completa contrastada con los rangos de valores de un historico de la misma variable pero en una muestra al azar de una población de gran tamaño (Miller y Freund, 1985).

4 CONCLUSIONES

La propuesta de metodología de comparación permitió establecer rangos validos para la mayoría de los atributos evaluados, destacando solo la Resistencia a la Compresión y el Índice de Tambor, por el incumplimiento del postulado de la Ley de los Grandes Números en el que se fundamenta el estudio, considerando posible error sistemático en la metodología del ensayo para determinar dichos atributos de las pellas obtenidas en el Laboratorio.

Los atributos de Reducibilidad, Hinchamiento e Índice de Abrasión de las pellas producidas con la muestra del 75% de la pila y las producidas en planta son similares tanto en promedios globales como en tendencias centrales durante el periodo evaluado, siendo estos los que presentan mayor validez en las predicciones obtenidas.

Se recomienda utilizar la metodología como una herramienta de predicción de los rangos de valores de los atributos de las pellas producidas en planta una vez caracterizadas la pellas producidas con la muestra del 75% de la pila e implantar la actualización de esta propuesta como practica operativa que se lleve a cabo cada tres meses tomando como data la información recolectada durante este intervalo de tiempo, para validar las ecuaciones y parámetros estándar obtenidos.

5 REFERENCES

- García, J. *Estadística como ciencia*. Mexico: Avanza. 2002.
- Meyer, K., *Pelletizing of Iron Ores*. Berlin: Springer-Verlag. 1980.
- Miller, I., y Freund, J., *Probabilidad y Estadística para Ingenieros*, 3a. ed. México: Prentice Hall. 1985.