

**MODELOS MULTIVARIABLES PARA PREDECIR EL EXTRACTABLE  
DE NÍQUEL POR LA COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LA MENA  
TECNOLÓGICA  
EN EL PROCESO CARON**

**Multi-variable models to predict the efficiency of nickel reduction by the  
mineralogical composition of lateritic ore on Caron process**

**Antonio R. CHANG-CARDONA<sup>1</sup>, Jorge ARCE-MOLINA, María M. TOIRAC-SUÁREZ**

(1) Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Email: [achang@ismm.edu.cu](mailto:achang@ismm.edu.cu)

**RESUMEN-** La investigación se realizó en una Loza (8 hornos) de la Planta de Hornos de Reducción en la Empresa niquelífera de Punta Gorda, para turnos de 8 horas durante tres meses aproximadamente. Se determinan los modelos que predicen con mayor efectividad el extractable de Ni al variar la composición química-mineralógica de la mena tecnológica que se alimenta a la planta, lo cual constituye la base para el control avanzado del circuito tecnológico Mina- Preparación de minerales- Hornos de Reducción con la finalidad de elevar la productividad, reducir el consumo de energía y disminuir los costos de producción. Las bases de datos y su procesamiento estadístico se realizaron en EXCEL. Como resultado, se obtuvieron varios modelos multi-variables con efectividades de pronóstico del extractable de Ni superiores que 91 % para ser probados en el escalado hacia toda la Planta de Horno; se validó la efectividad del Software COMPRAC para obtener modelos, basados en la composición mineralógica; se demostró la utilidad del método de diagnóstico empleado para detectar las causas de errores subjetivos y seleccionar la información confiable en el circuito tecnológico evaluado; se validó una metodología de investigación eficaz para la modelación empírica a escala de Unidad Demostrativa de Producción, basada en el aseguramiento de la Semejanza técnico-operativa de grandes Plantas con régimen de trabajo continuo.

**Palabras clave:** Modelación multi-variable, Semejanza técnico-operativa, Proceso Caron, Metodología de investigación.

**ABSTRACT-** The investigation was made in a Loza (8 furnaces) of Punta Gorda Plant for turns of 8 hours during three months. The purpose of the paper was to determine the multi-variable models to predict the Efficiency of Nickel reduction with greater effectiveness, when varying the chemistry-mineralogical composition of lateritic ore in the Herreshoff furnace, which constitutes the base for the advanced control of the technological circuit: Mine-Ore Preparation Plant- Reduction furnaces Plant, with the purpose of elevating the productivity, reducing energy consumption and diminishing the production costs. The data bases and their statistical processing were made in EXCEL. As a result, several multi-variable models were obtained, with effectiveness of prognosis superior than 91 %; the efficacy of COMPRAC Software was validated to obtain models based on the mineralogical composition; the utility of the diagnosis method was demonstrated to detect the causes of subjective errors and to select the reliable information in the evaluated technological circuit; An efficient research methodology for the empirical modeling on scale of Demonstrative Production Unit was validated, based in the securing of the technical-operative Similarity of great Plants with continuous regime of operating.

**Key words:** Multi-variable modeling, Technical-operative Similarity, Caron Process, Research methodology.

## INTRODUCCIÓN

El Proceso CARON es el más ineficiente metalúrgica y energéticamente entre todas las tecnologías para el tratamiento de menas lateríticas, por tales razones, desde el año 1988 no se ha construido ni proyectado en el mundo otra planta metalúrgica análoga (Taylor, 1995). Una de sus causas, radica en el empleo de mezclas de minerales del horizonte de Limonita de Balance (LB) con el de Serpentina Blanda (SB) en proporciones másicas no menores que 3:1, lo cual requiere de un complicado y riguroso control de la calidad del producto minado, de una adecuada homogenización y preparación mecánica de la mena tecnológica antes de ser alimentada a los hornos de reducción, que es donde ocurren las primeras transformaciones físico-químicas.

Por tanto, en la Empresa niquelífera "Comandante Ernesto Che Guevara", en Moa, Provincia Holguín, Cuba, conocida mundialmente como Planta de Punta Gorda, se necesita estudiar la evolución cualitativa y cuantitativa de la materia prima en el circuito tecnológico: Mina - Preparación de minerales - Hornos de Reducción, en el cual existen varias fuentes de pérdidas y muestras claves, las cuales se ilustran en la figura 1, la que además incluye la futura operación de Homogenización en la Mina y los nombres de las muestras: SM2 en la Mina, SM8 al finalizar la preparación mecánica y secado de la mena, HR1 a la entrada de los hornos de reducción y HR4 en los tanques de contacto (TK) entre la mena tecnológica reducida y el licor

carbonato amoniacal, por ésta última, se evalúa el resultado final de la reducción de la mena por los Extractables de Níquel (Ni Ext) y Cobalto (Co Ext).

En el inicio de dicho control, se pueden considerar las muestras de campo para análisis rápido con vista a agilizar las decisiones operacionales de explotación geológico-minera que deben reflejarse en la muestra SM2, cuando se trabaja por tiro directo hacia la planta metalúrgica. Sin embargo, por diversas situaciones operativas en la planta de preparación de minerales es necesario almacenar en las galerías parte de la mena que se transporta hacia dicha planta, así como en época de lluvia, es recomendable mantener bajo techo (depósito interior) una reserva apreciable de mena tecnológica para respaldar varios días de inactividad de la Mina.

En tales circunstancias, la muestra SM2 no es representativa, por lo que se requiere de un estricto control de la mena en dichos depósitos (interior y galería). Posteriormente, al pasar por las operaciones de secado y molienda en la planta de preparación de minerales, la mena original sufre algunas pérdidas mecánicas, por chimenea y separación de piedras de serpentina (ver fig. 1) a la entrada y salida del horno de secado, que distorsionan el resultado de SM2 o el de los depósitos.

Por tales razones, la homogenización resultante es controlada en la muestra SM8, la cual debe garantizar el objetivo final, que es la calidad de la mena tecnológica a la entrada de los hornos de reducción (HR1), dicha muestra estará afectada por la adición de minerales reciclados del proceso de reducción, ricos en Magnetita-Maghemita, además de estar desplazada en tiempo respecto a SM8, en correspondencia con los resultados del Reporte Técnico (Chang et al., 2004a). La hipótesis del trabajo consiste en determinar los modelos que predigan con mayor efectividad el Extractable de Ni al variar la calidad de la mena tecnológica en HR1, de tal forma, que si se determina el factor de corrección estadístico de las muestras anteriores respecto de HR1 para cualquier situación, se pueda corregir con suficiente antelación las operaciones de explotación geológico-minera; o en caso de variación inevitable de su calidad, se pueda ajustar con tiempo los parámetros de operación de la planta de hornos con menos consumo de combustible, mejor estabilidad de los Extractables y menor riesgo de averías. Todo ello constituye la base para el Control Avanzado del circuito tecnológico Mina- Preparación de minerales- Hornos de Reducción, el cual permitirá aumentar la productividad y disminuir los costos.

El presente artículo se limitará a tratar el objetivo específico de obtener los modelos matemático-estadísticos para predecir el Extractable de Ni en dependencia de la composición mineralógica de la materia prima alimentada a los hornos de reducción.

Los modelos empíricos del tipo estadístico requieren de una gran cantidad de observaciones (N) en la base de datos sobre el equipo y proceso estudiado, además de una correcta identificación de los aspectos semejantes que deben ser garantizados durante las pruebas.

Los modelos multi-variables son los más útiles, pero al mismo tiempo son los de mayor complejidad científica debido a las numerosas interacciones que se manifiestan entre las variables manejadas, y a la definición de una correcta metodología de escalado para su implementación industrial, lo que demanda de profesionales especializados y de herramientas automatizadas para el procesamiento de las BD experimentales, lo cual se torna más complejo, cuando se trata de la composición mineralógica, por la ausencia de un software que permita determinar el contenido de los principales grupos de minerales sin necesidad de esperar por los resultados de sus análisis, que son mucho más caros, cuando se necesitan para un tiempo menor o igual a un turno de 8 horas durante todo el año. Estas han sido las razones por las que todavía no existan modelos aplicados industrialmente con efectividad.

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

El primer aspecto que se analizará sobre el método de investigación empleado es la selección de la escala experimental. Por cuanto, el objetivo específico está relacionado con la Planta de Hornos de reducción (consta de 24 hornos, divididos en 3 Lozas), entonces se escoge una LOZA (formada por 8 hornos) como Unidad Demostrativa de Producción (UDP), que sería la escala más cercana a la Generalización de los futuros resultados. Esto permitirá controlar mejor los parámetros de operación y las muestras industriales.

El segundo aspecto es la garantía de semejanzas de toda la Planta en las pruebas que se realicen en la UDP, las cuales se analizarán a continuación. En la Loza se aseguran prácticamente sin control las semejanzas: Geométrica, Dinámica (entre fuerzas actuantes), Cinemática o Cinética (de frecuencia de contacto, velocidades de las partículas en el flujo, la transferencia de masa y de calor), y la Semejanza del estado energético del sistema material (de Potencia suministrada por unidad de volumen o masa procesada); aunque las dos últimas requieren de una supervisión diaria de las operaciones durante las pruebas.

En el caso de la semejanza entre los parámetros físicos del sistema material (densidad, viscosidad, temperatura, etc), parte de estos varían con la calidad de la mena tecnológica durante un año típico de trabajo de la Empresa de Punta Gorda, al igual que su composición química y mineralógica, por lo que se considerarán en la *Semejanza técnico-operativa* en la Planta, la cual tiene en cuenta, además, el estado técnico de los equipos y desajustes del sistema de muestreo, el nivel de capacitación, habilidad y disciplina tecnológica del personal que dirige y trabaja en los turnos. En las investigaciones a escala de UDP, esta última semejanza es el centro de atención diaria. Tales factores determinan las tareas siguientes:

- a) Monitorear la Planta de Hornos, basado en un Patrón técnico- operativo que caracteriza la mejor condición actual y de aspiración a mediano plazo, el cual se acuerda con el personal que dirige técnicamente la Planta y la Empresa. Esto permitirá eliminar aquellos turnos y días que no cumplen con el Patrón acordado.
- b) Establecer el tiempo de investigación en la UDP en alrededor de tres meses, siempre y cuando se garantice la variación de la calidad de la mena tecnológica para un año típico de trabajo de la Empresa.
- c) Realizar el muestreo que se ilustró en la figura 1 y el procesamiento de dichas muestras con el personal propio de la Unidad Básica de Servicios Técnicos de la Empresa, manteniendo una supervisión de la disciplina tecnológica sobre el personal en el circuito tecnológico investigado para identificar fallas y corregir desviaciones. Significa, que las Bases de Datos se organizarán por turnos de 8 horas para los días válidos, evitando contaminarlas con muestras dudosas.
- d) Confeccionar un software que permita calcular la composición mineralógica fundamental de la mena procesada en diferentes puntos del circuito tecnológico evaluado, el cual se registró por Arce y Chang, (2004) en el Centro Nacional de Derecho de Autor con el nombre de COMPRAC. La mineralogía base para su confección, se tomó del libro de Laverov, (1985) y se adicionó el sistema Magnetita-Maghemita por los resultados de investigaciones más recientes publicadas por Muñoz, (2004) y Valix and Cheung, (2002).
- e) Tomar los resultados de los Extractables de Níquel y Cobalto, así como los contenidos de Fe, Ni, Co y Humedad en HR1, del Laboratorio Central de la Empresa Punta Gorda para los turnos válidos, los cuales se publican en la INTRANET de la Empresa.

El tercer aspecto está relacionado con los análisis químicos de Ni, Co, Fe, Mg, Si, Al, Mn, Cr; como contenido total en las muestras, además de Fe (II) en forma de FeO, Fe (III) y Si libre,

las que se realizaron en el laboratorio "Elio Trincado" de la Empresa Geólogo- Minera de Oriente, el cual está certificado por las Normas de la serie ISO para análisis de minerales industriales. Se emplearon las técnicas de ICP y análisis volumétrico, según el tipo de elemento.

Para ajustar o validar los resultados del software COMPRAC por Magnetita-Maghemita, Gibbsite, Minerales del grupo de Serpentina y Sílice libre se analizaron más de 100 muestras en el laboratorio de DRX del ISMMM, el cual realiza análisis semi-cuantitativo. La esencia metodológica de dicha validación se publicó en el evento CINAREN 2004 (Chang et al, 2004b).

El cuarto aspecto metodológico consiste en el procedimiento para el análisis de los resultados analíticos y organización de las BD con herramientas computacionales. Las BD que se analizarán serán dependientes de los Extractables de Ni y Co en la Loza y se dividirán en : a) Composición Mineralógica; b) Relación Limonita/Serpentina (R5), las que se denominarán BD Sucias y se compararán los resultados de R5 con la BD del No. Mineral (Relación de los contenidos de  $Fe^* Ni / Mg^*Si$ ), por ser este último, el actual indicador empleado para valorar de calidad de la mena tecnológica en la Empresa Punta Gorda.

La organización de dichas BD y su procesamiento estadístico se realizó en EXCEL con sus herramientas para el análisis de datos, esencialmente: Análisis de Regresión para determinar los diferentes tipos de modelos; Análisis de Correlación par de todas las variables respecto de los Extractables de Ni y Co, así como sus interacciones para comprender mejor los modelos obtenidos en la Regresión, Estadística Descriptiva para establecer los rangos de valores de cada variable que abarcan los modelos, los cuales van a definir su campo de utilización, y por último; los gráficos de dependencia de los Extractables de Ni y Co de las diferentes variables, los cuales se construyen dinámicamente en la BD para determinar sus líneas de tendencias, así como sus ecuaciones polinómicas o lineales y otros indicadores estadísticos.

Los resultados obtenidos en el EXCEL fueron validados por el Software STATGRAPHIC, por lo cual se continuó trabajando con el primero para efectuar la modelación empírica.

El quinto aspecto metodológico consiste en el procedimiento de limpieza de la BD Sucia, debido a la existencia de diferentes fuentes de error desde que se toma la muestra hasta la medición de los contenidos de metales, lo que permitirá definir hasta qué punto o en qué grado los resultados obtenidos son dignos de confianza y cuál es la magnitud del error absoluto por

Extractables de Ni y Co que caracteriza a la empresa en ese momento, de tal forma que se pueda trabajar para disminuir o eliminar sus causas. Por la complejidad de la mena tecnológica se limpiará por intervalos de la Relación Limonita/Serpentina, determinándose los errores absolutos promedio de los Extractables.

Para obtener la BD Limpia se eliminan los turnos que no entren en el intervalo confiable de Extractable de Ni para cada intervalo de confianza de R5 en HR1. Dichos intervalos, constituyen el doble de los valores absolutos promedio para los tres meses de la Loza, ya que estos valores poseen implícitamente el signo ( $\pm$ ). Para su mejor comprensión, se explicará el procedimiento empleado con la BD de composición mineralógica: en esta, el error absoluto de R5 es de  $\pm 0,125$ , lo que significa un intervalo de confianza de 0,25; lo que se debe entender de la manera siguiente: la relación Limonita/Serpentina en dicho intervalo de confianza se considera un mineral de calidad constante, al cual le corresponden diferentes valores de Extractable de Ni, pero si algunos de estos superan la magnitud del intervalo Ni Ext = 5,2 se eliminan. Este principio funciona como si se repitiera el mismo experimento varias veces, eliminándose los valores que superan al error absoluto.

En este caso, se adiciona la condición de exigencia tecnológica respecto a R5, que considera la norma de 3:1, a partir del cual los resultados esperados de Extractables son buenos; lo que determina la decisión de por cual nivel eliminar el valor (inferior o superior), como en el tradicional método de Q-Test. Entonces, cuando R5 sea menor que 3, se esperan bajos Extractables de Ni, y por tanto, se eliminan los valores mayores (nivel superior). A partir del intervalo de R5 que contenga el valor de 3, se cambia el nivel de limpieza. En caso de que no exista una BD de partida para juzgar los resultados puntuales (en cada turno y otras mediciones), se requiere calcular el valor pronóstico del Ni Ext (por el modelo que se obtenga en el presente trabajo), posteriormente se adiciona y sustrae el error absoluto; si el Extractable evaluado se encuentra dentro del intervalo de confianza, entonces se acepta. De esta forma, se crean las nuevas BD Limpias.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los resultados de los análisis químico de los ocho metales y la Humedad libre en HR1 se introducen en el software COMPRAC, obteniéndose dos composiciones racionales: la primera por la mena seca y la segunda por la mena húmeda. Los resultados del COMPRAC salen en

forma de tablas en Delphi y se exportan a EXCEL. Las BD de composición mineralógica se conforman con los resultados de la tabla 1.

En la tabla 2 se muestra la estructura general de las BD Sucias de forma integrada, colocando en las primeras columnas, el número real de la observación (N) que ocupa en la BD, correspondiente, al día inicial y final de cada mes de prueba. En la tabla 3 se ofrece un resumen de los errores absolutos de diferentes variables para cada mes de investigación en la Loza II y sus promedios generales ponderados.

En la tabla 4 se muestran las BD Limpias de forma integrada, con la misma estructura de las BD Sucias, pero se adicionaron las relaciones de contenidos de minerales que se exponen en la tabla 7, razón por la cual, no se repiten los minerales de la tabla 2 y se mantuvieron los Extractables como modo de comprobación (Las BD completas se ofrecen en Chang et al, 2005). En comparación con la tabla 2, se limpiaron 63 turnos poco confiables. Si se tiene en cuenta, que antes de formar la BD Sucia, se dejaron de incluir 9 días (27 turnos) durante el Monitoreo de la Planta y además, cuando se suministraron los datos al Software COMPRAC, se eliminaron 6 turnos, cuyos valores de otros elementos fueron negativos y en dos casos, superaron el 10%, entonces, se demuestra que diariamente los técnicos deben identificar más de un dato erróneo, y por tanto, deben contar con un procedimiento que le permita tomar dicha decisión correctamente.

La comprobación de la calidad de la limpieza efectuada se realiza construyendo los gráficos de Extractables de Ni y Co en función de R5 y No. Mineral para las BD "Sucia y Limpia". Los síntomas de que es correcto el procedimiento son: a) la tendencia de incremento de ambos Extractables se mantiene en cada BD; y b) Los valores del coeficiente de determinación  $R_2$  para la curva polinómica de segundo orden correspondiente al Extractable de Ni se incrementa apreciablemente, y la de Co en menor medida, pero aumenta. Esto se aprecia en las figuras 2 , 3 para R5, y figuras 4 , 5 para No. Mineral.

Los resultados de los coeficientes de correlación par, se muestran en la tabla 5 y el rango de variación de los contenidos de diferentes metales, minerales y demás variables, se ofrecen en las tablas 6 y 7.

En las dos últimas tablas, se observa un amplio rango de variación de los principales metales y minerales, típico para un año de producción de la Empresa, lo cual es importante para comenzar la modelación empírica.



Los indicadores estadísticos de los modelos obtenidos a partir de Bases de Datos industriales son más bajos, que cuando se obtienen de experimentos a escalas de laboratorio, banco, miniplanta e incluso semi-industrial, en las cuales, todas las variables están rigurosamente controladas en un estrecho margen, y el personal que participa se especializa en el muestreo, en la manipulación y tratamiento de pequeñas muestras con relación a la escala comercial. Se considera un modelo estadístico adecuado cuando el valor crítico de Fisher (F) es menor que 0,05. Para una BD Sucia, los valores del coeficiente de correlación múltiple son relativamente bajos, pero superiores a 0,4 en casi todos los casos, mientras que para la BD Limpia supera los 0,6; acercándose en muchos modelos multi-variables no lineales a 0,69 que son valores muy buenos para una BD industrial.

Para la BD de composición mineralógica, los modelos multi-variables individuales con mejores resultados, que se muestran en las tablas 8 y 9, fueron aquellos que no contenían Cromita y Cuarzo, lo cual es común para todos los casos que se tratan en este párrafo. Sin embargo, por la influencia de cada mineral sobre los Extractables y su aceptable correspondencia con los signos de sus coeficientes de correlación par, fueron mejores aquellos modelos, que además, eliminaron la Asbolana y la Nontronita juntas, la Halloysita sola, o la Nontronita y la Halloysita juntas. Entre otras variantes favorables, se encuentran la eliminación de Magnetita y Halloysita juntas, o la Gibbsita sola.

En el caso de los modelos multi-variables simplificados, se determinaron algunas relaciones y sumas de variables, que integran sus resultados, e incluyen a la Cromita y al Cuarzo que fueron eliminados en todos los modelos multi-variables individuales. En este caso, los de mejores resultados para la BD Limpia se muestran en la tabla 10.

La selección final de los mejores modelos se realiza por el cálculo de la Efectividad General del pronóstico del Extractable de Ni sobre las BD industrial "Sucia y Limpia". Para este fin, se organizaron las BD con las variables previstas en los modelos preseleccionados, programándose en cada celda de la hoja de cálculo del EXCEL, en correspondencia con la expresión matemática que se muestra en dichas tablas. Posteriormente, se calcula el valor absoluto de la diferencia (Dif. Pron #) entre el valor real de Ni Ext y el pronosticado, a partir del cual se calcula la referencia respecto al error absoluto del Ni Ext de la LOZA, o sea,  $100 - 2,606 = 97,304$  %, que sería el 100 % de Efectividad puntual, calculada por la expresión:

$$\text{Efect. Puntual (\%)} = (100 - \text{Dif. Pron \#}) * 100 / 97,304.$$

La Efectividad General se calcula como la suma de las efectividades puntuales iguales o superiores que el 100 % (se contabiliza como 1), y dividido por el total de turnos **N** en la BD, expresado en % por la fórmula:

$$\text{Efect. General (\%)} = \text{Total de 1 (Efect. Puntual)} * 100 / \text{N.}$$

Para flexibilizar el intervalo del error futuro respecto a su escalado a toda la Planta, en correspondencia con el mes de noviembre en la tabla 3, se admitieron los valores correspondientes a una efectividad puntual mayor o igual que 99,5 %, equivalente a un límite de error absoluto de Ni Ext = 3,1; mientras que el 99% representa la frontera estimada de su error absoluto (cercano a 4), a partir del cual, la empresa debe trabajar para disminuirlo, porque la dispersión de los datos podrían transformar la calidad del modelo. El resumen del pronóstico se muestra en la tabla 11 para el Ni, en el caso del Co, en la tabla 12. Un ejemplo detallado de todo el procedimiento de limpieza explicado se encuentra en un voluminoso anexo del Reporte (Chang et al, 2005).

En la tabla 11 se observa, que ningún modelo obtenido a partir de la BD Sucia es efectivo para pronosticar la BD Limpia, sin embargo, los obtenidos a partir de la BD Limpia son igualmente efectivos en la BD Sucia, al mismo nivel que los de su origen. Este resultado demuestra la validez del procedimiento de limpieza para manejar los modelos en la producción. La Efectividad general de un 93,4 % en el pronóstico del Ni Ext respecto al error absoluto de 3,1 es bastante bueno, ya que solo en 6 ó 7 ocasiones de cada 100 es posible errar. En las figuras 6-8 se muestran los gráficos comparativos entre los Extractables de Ni en la Loza II y el pronosticado por el modelo 2, para cada turno y día, durante los meses de investigación. En estas, se señalan con puntos rellenos y números del 1 al 9 sobre el gráfico de pronóstico, los días y turnos que superaron el error absoluto de 3,1 en los tres meses muestreados, los cuales corresponden a los fallos del modelo pronóstico respecto al real (LOZA II). También se muestra en dichas figuras, pero sobre el gráfico del Ni Ext Loza, con puntos rellenos, los días y turnos que reflejan un salto, de un turno respecto a su anterior, superior al intervalo confiable de Ni Ext = 5,2 durante la operación normal de la Planta de Hornos, como respuesta a las variaciones bruscas de la calidad de la mena tecnológica. Casualmente, ambos valores son iguales a 9, lo cual se confirmó para el modelo 4. Los modelos multi-variables que se recomiendan evaluar en el escalado a toda la Planta se resumen en la tabla 13 y se incluye un ejemplo de escritura del modelo 2 para ilustrar como se debe emplear el resto, que fueron mostrados en las tablas 8-10.

Las causas principales de los 9 fallos en el pronóstico del Extractable de Ni son: siete por error humano durante el tratamiento de las muestras de HR4 hasta obtener los resultados del Extractable de la Loza, confirmado por la tendencia contraria de los resultados del modelo para los mismos datos de HR1, mostrando en 5 de los 7 casos, valores muy elevados de Ni Ext en la Loza y en los otros dos casos, valores muy por debajo de lo pronosticado; los restante dos fallos, se considera el resultado de factores combinados, en particular, el muestreo no representativo en turnos nocturnos conjugado con indisciplinas tecnológicas encubiertas, como alteraciones en la dosificación del petróleo aditivo, desajuste en la temperatura de los hogares superiores o inferiores, mineral reducido con elevada temperatura, ya sea por problemas en el enfriador o por otras causas.

En el caso de los saltos exagerados de Ni Ext en la Loza, siete de ellos fueron causados por variaciones bruscas de la calidad de la mena, validados por sus valores de R5 y No. Mineral, y dos por los factores combinados explicados en los fallos. Es necesario destacar, que en todos los casos, la comparación de la tendencia de crecimiento o disminución del Extractable de Ni en la Loza, respecto al pronóstico coincidieron en lo cualitativo, pero la magnitud de los segmentos de Ni Ext en la Loza fue superior al del Pronóstico en los nueve casos (ver figuras 6-8).

Por tanto, la causa más generalizada de los fallos y saltos es de carácter subjetiva en todo el circuito tecnológico estudiado, por lo que es posible elevar la efectividad general del pronóstico en un breve plazo.

Al comparar los modelos mono-variable integrados (R5 y No. Mineral) es necesario referirse a la tabla 14, en la cual se muestra los principales indicadores estadísticos y las Efectividades generales de pronóstico del Extractable de Ni para diferentes BD. Para la situación actual de una BD Sucia, ambos modelos son inefectivos, al no superar el 72 %. Al limpiarse esa misma BD por intervalos de R5, los dos modelos alcanzan la misma Efectividad general de pronóstico (91,2 %) para efectividades puntuales mayores o iguales que 99,5 %, pero por debajo del 92 %, que es el valor mínimo de los mejores modelos multi-variables. Estos argumentos refuerzan la decisión de garantizar una BD limpia para el pronóstico del Ni Ext, separado de la BD de producción, así como emplear a R5, como indicador para valorar la calidad de la mena tecnológica producida por la Mina, lo cual debe ser validado en las pruebas de escalado a toda la Planta.

Resulta interesante la comparación de los modelos poli-nómicos para el pronóstico del Ni Ext, mostrada en la tabla 15 para la condición de limpieza por R5, observándose que el modelo del No. Mineral es ligeramente mejor que el de R5, igualando la Efectividad general del modelo lineal de R5-L. Para el 99% de efectividad puntual, ambos modelos alcanzan el máximo valor de efectividad general de los mejores modelos multi-variables, superando a sus homólogos lineales. Tal comportamiento, sugiere la necesidad de evaluar dichos modelos durante el escalado, como medida de vigilancia del indicador de calidad de la mena tecnológica.

Algunas reflexiones generales sobre los modelos de pronóstico de Co para cualquiera de las BD analizadas se pueden realizar a partir de la tabla 15, en la cual se muestran los bajos indicadores estadísticos y Efectividades generales de pronóstico que no alcanzan el 70 %. Esta regularidad hace inviable encontrar un modelo apropiado para el pronóstico del Co.

La causa principal de la gran dispersión de los datos industriales y sus elevados errores radican en la aplicación del mismo procedimiento de tratamiento de las muestras HR4 para calcular los Extractables de Ni, el cual no es compatible con la gran diferencia de inestabilidad de los complejos carbonato-amoniacaes de Co respecto al Ni, que se traduce en una elevada velocidad de hidrólisis, co-precipitación de los iones de Co (II y III) con los óxidos e hidróxidos de Fe formados, además de su intercambio iónico con los compuestos sólidos de los minerales durante la lixiviación bajo aireación (Chang, 2000; Nicol et al, 2004). La solución a dicho problema es cambiar dicho procedimiento por otro que minimice los fenómenos antes expuestos bajo el control de la aireación por los potenciales redox.

### **CONCLUSIONES**

1. Se obtuvieron varios modelos multi-variables con buenas efectividades de pronóstico del Extractable de Ni para probarlos en el escalado hacia toda la Planta de Horno.
2. Se validó la efectividad del Software COMPRAC para obtener modelos basados en la composición mineralógica y determinar la Relación Limonita/Serpentina (R5), importante para la limpieza de las BD Sucias y como indicador de calidad de la mena tecnológica.
3. Se demostró la utilidad del método de diagnóstico empleado para detectar las causas de errores subjetivos y seleccionar la información confiable en el circuito tecnológico evaluado, que permita pronosticar el Extractable de Ni por modelos estadísticos con elevada efectividad.

4. Se validó una metodología de investigación eficaz para la modelación empírica a escala de UDP, centrada en el aseguramiento de la Semejanza técnico-operativa de grandes Plantas con régimen de trabajo continuo.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al colectivo de Dirección de la Empresa niquelífera Cmdte Ernesto Che Guevara por el financiamiento del Mega-Proyecto: Modelación Geo- Tecnológica- Ambiental del yacimiento "Punta Gorda" y reconocen el apoyo brindado por los colectivos de Dirección administrativa y técnica de la Mina, la Unidad Básica de Servicios Técnicos, Planta de Preparación de Minerales y Planta de Hornos, así como al Grupo de Informática de dicha Empresa.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARCE, M. J.; CHANG, C. A., (2004): "SOFTWARE COMPRAC. Composición Racional " Centro Nacional de Derecho de Autor (CENDA). Registro:1767-2004.
- CHANG C. A. R., (2000):"¿Cómo extraer más cobalto sin afectar níquel en la lixiviación carbonato-amoniaca de menas lateríticas reducidas?". *Rev. Minería y Geología*, 17 (3-4 ): 47- 53.
- CHANG, A.; MUÑOZ, N.; CRUZ, I., (2004 a): "Condiciones Técnico-Organizativas en el circuito tecnológico Mina-Preparación de mineral-Hornos de Reducción con la aplicación de un modelo estadístico para predecir el Extractable de Níquel con efectividad". ISMMM, Moa. Reporte Técnico, Parte I del Proyecto: Modelo Geo-tecnológico – ambiental del Yacimiento Punta Gorda. 43 p.
- CHANG, C. A.; ROJAS PURÓN, A; ARCE, M. J , (2004 b): " Metodología para pronosticar el extractable de Níquel por la mineralogía computacional ". Trabajo presentado en la IV Conferencia Internacional de Aprovechamiento de los Recursos Minerales y el desarrollo sostenible CINAREM`2004, 11-13 de Mayo, en ISMMMoa, Holguín, Cuba. Publicado en CD-R con ISBN 959-16-0258-4.
- CHANG, C. A.; ARCE, M. J ; TOIRAC, M.M., (2005) : " Modelos multi-variables para predecir los Extractables de Ni y Co por la composición química y mineralógica de la mena ". Reporte técnico final del Suplemento 1 del Contrato 15/03. Proyecto: Modelo Geo-tecnológico – ambiental del Yacimiento Punta Gorda. ISMMM, Moa, 115 p.
- LAVEROV N. P., (1985): *Yacimientos de minerales metálicos de Cuba*. Ed. Mir, Moscú, 245 p.
- MUÑOZ, N.; CRUZ, I. , (2004): "Monitoreo Geológico y Minero del Yacimiento Punta Gorda". Informe final del Suplemento 4 del Contrato 15/03. Proyecto: Modelo Geo-tecnológico – ambiental del Yacimiento Punta Gorda. ISMMM, Moa, 75 p.

- NICOL, M. J; NIKOLOSKI, A. N; FITTOCK, J. E, (2004): "A Fundamental study of the leaching reactions involved in the Caron Process", in *Proceeding of International Laterite Nickel Symposium*, TMS (The Mineral, Metals & Materials Society), Charlotte, North Carolina, U.S.A., March 14-18, pp. 369- 384.
- TAYLOR A., (1995): "Process Selection", in *Nickel/ Cobalt Laterites Seminar. The How-To's of Project Development*. Melbourne, Australia, Organised by: Alta Metallurgical Services, May 4 - 5.
- VALIX, M. and CHEUNG, W. H, (2002): "Study of phase transformation of laterite ores at high temperature". *Minerals Engineering*, 15 (8): 607-612.

Figura 1. Sistema de control y muestreo en el circuito tecnológico Mina-Preparación de mineral- Hornos de reducción

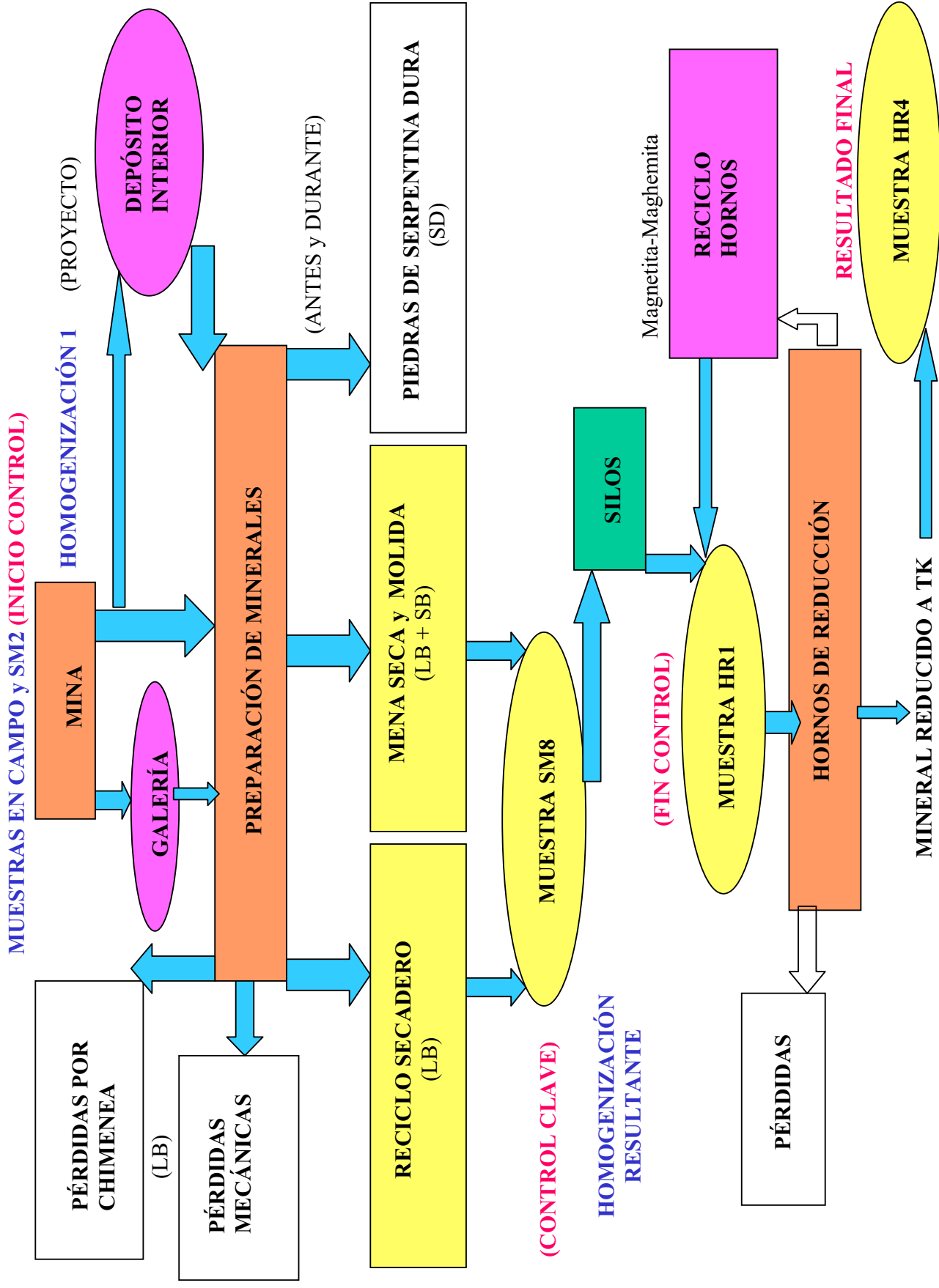


Figura 2. Influencia de R5 sobre los Extractables de Ni y Co. BD Sucia

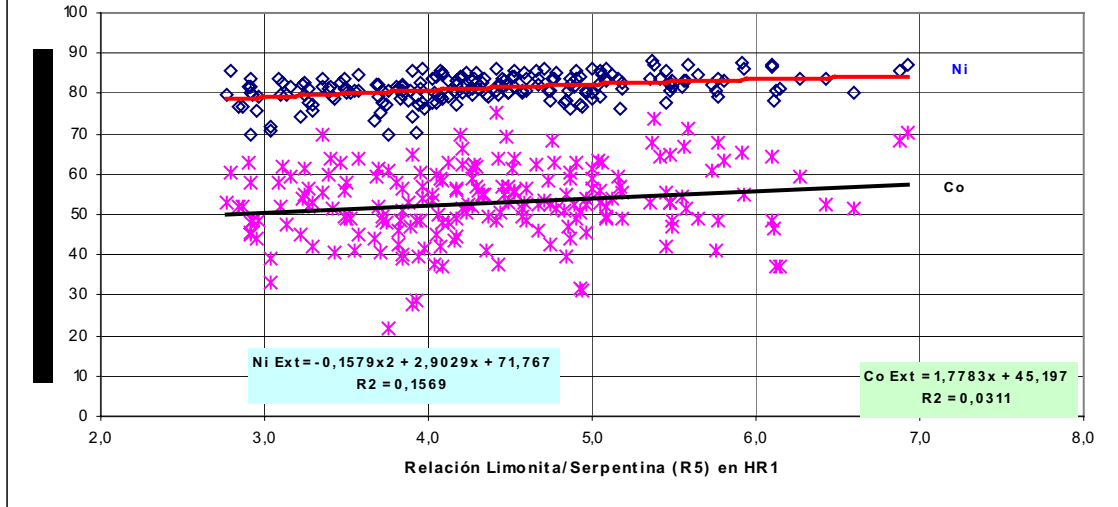


Figura 3. Influencia de R5 sobre los Extractables de Ni y Co. BD Limpia

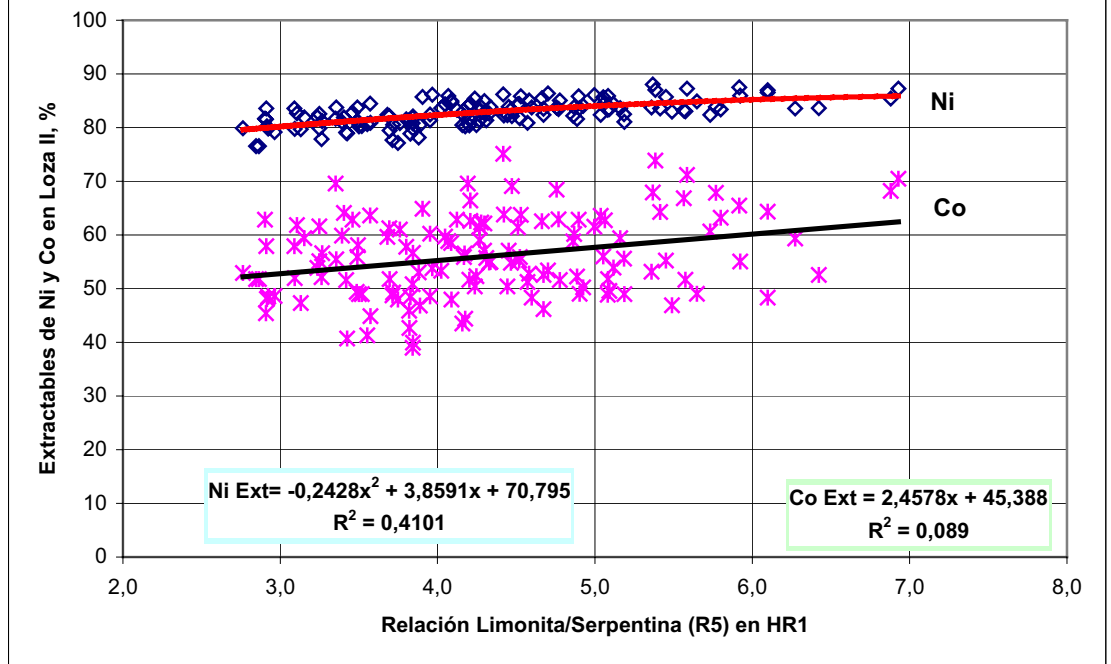




Fig. 4. Influencia del No. Mineral sobre los Extractables de Ni y Co. BD Sucia.

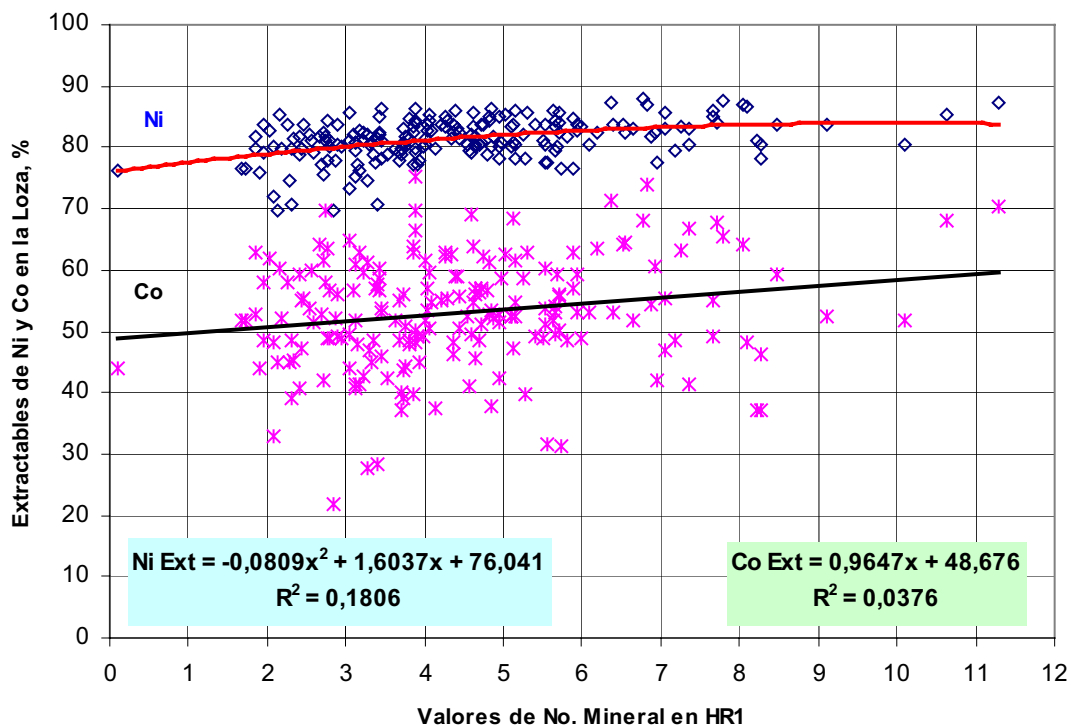
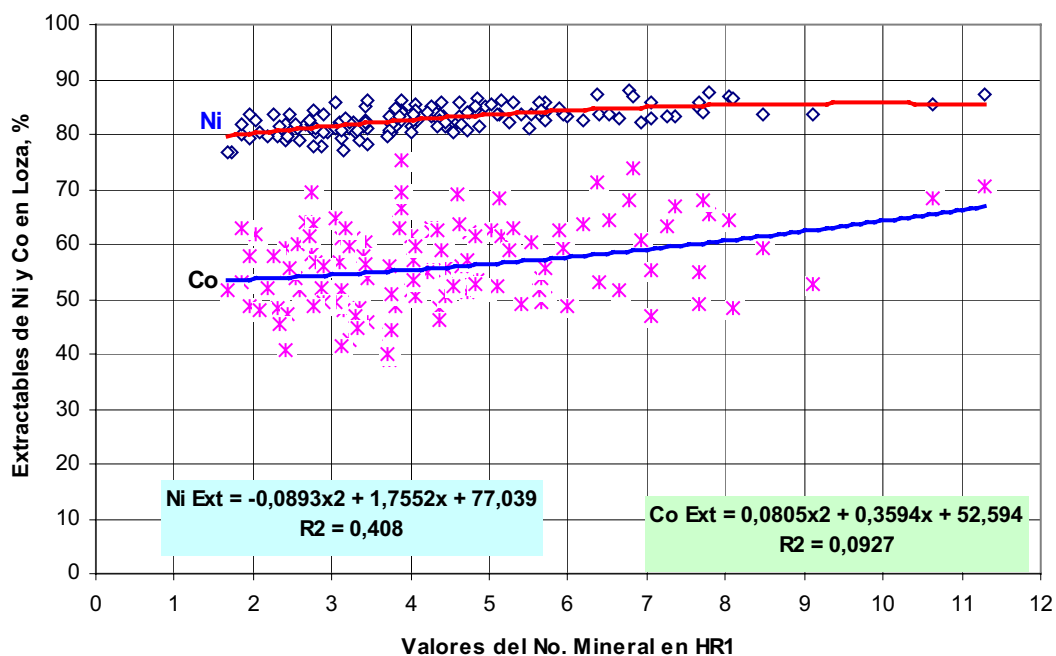
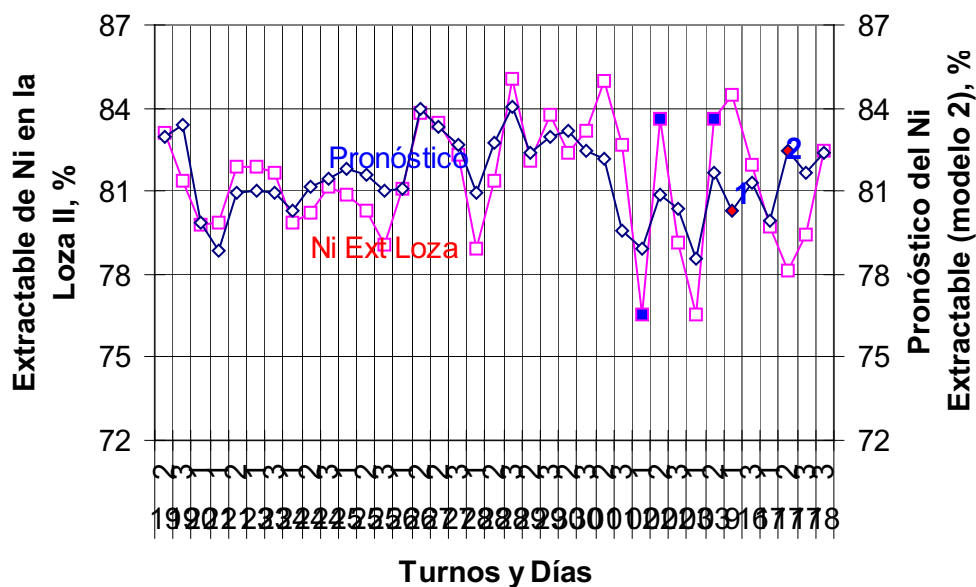


Fig. 5. Influencia del No. Mineral sobre los Extractables de Ni y Co. BD Limpia.



**Figura 6. Comparación entre los Extractables de Ni de la Loza y del modelo 2. Mes Junio-Julio. BD Limpia.**



**Figura 7. Comparación entre los Extractables de Ni de la Loza y del modelo 2. Mes de Octubre. BD Limpia.**

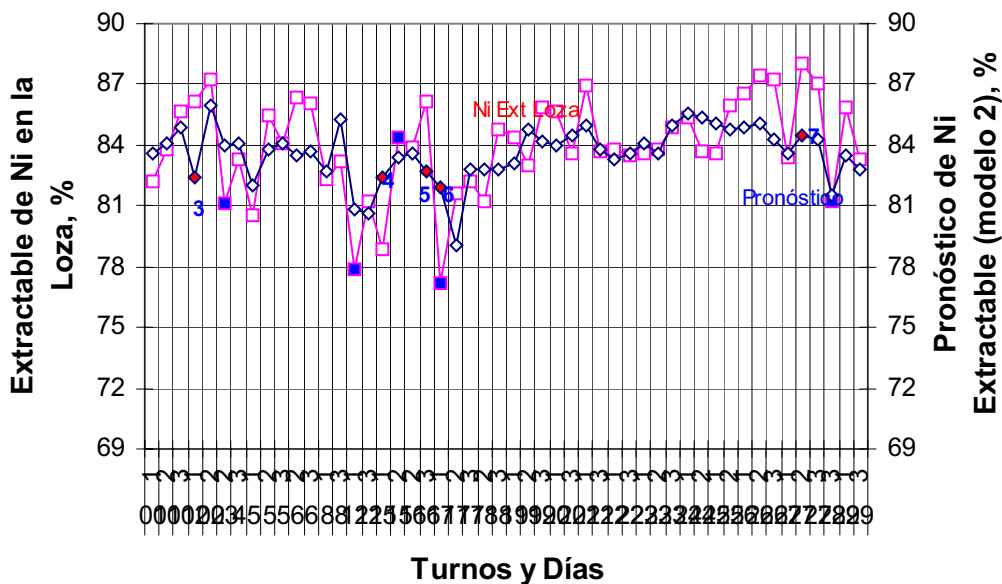


Figura 8. Comparación entre los Extractables de Ni de la Loza y del modelo 2. Mes Noviembre. BD Limpia.

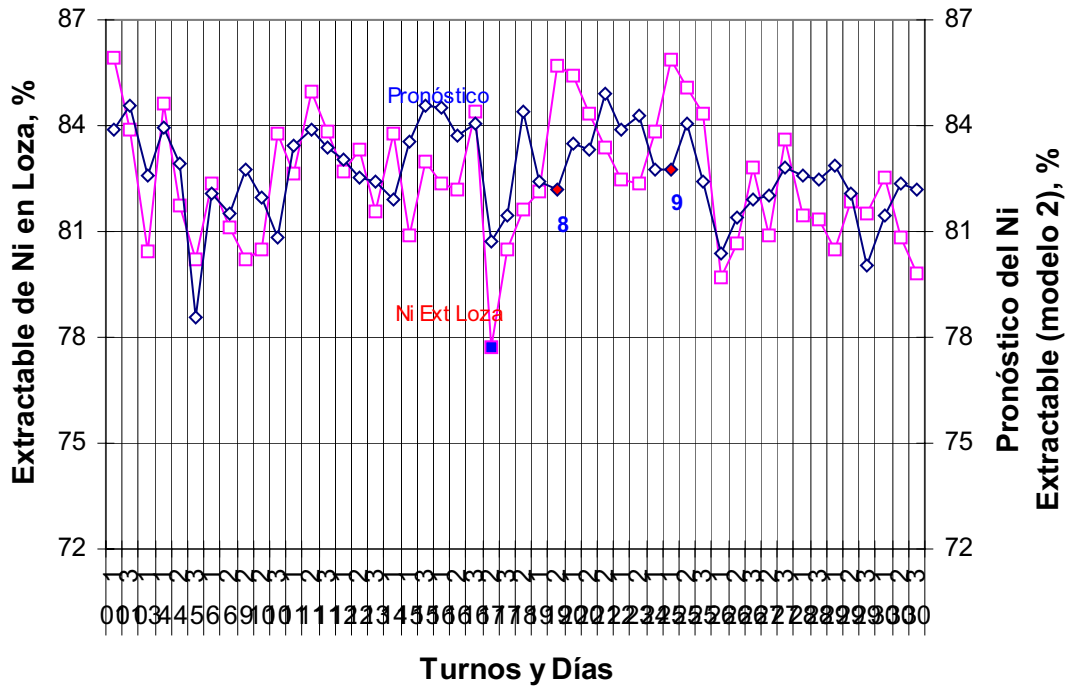


TABLA 1. Ilustración de la salida de los resultados exportados desde la tabla en Delphi hacia el EXCEL.

Para 100 Kg de mena tecnológica absolutamente seca en la muestra HR1, en %.

COMPOSICIÓN RACIONAL MINERAL SECO HORNOS      Procesamiento con COMPRAC ver 2.0: 23/01/2005 9:21:59

Identificación de Muestra: 11 DE NOV.T3

J' de Turno:

Turno:

Mineral	Fe	Ni	Co	Al	Mg	Mn	SiO2	H2O	O	Cr	otros	Total
2FeOOH	32,659							5,258	14,043			51,96
Al2O3·3H2O				2,985				2,987	2,656			8,628
(Mg,Fe)(Cr,Al)2O4	0,918			0,888	0,4				1,052	1,71		4,968
Mg6(Si4O10)(OH)8					2,54		4,164	1,247	1,664			9,615
MnO2						0,8			0,466			1,266
Fe2(Si4O10)(OH)2·H2O	0,775						1,67	0,25	0,334			3,029
Al4(Si4O10)(OH)8·4H2O				0,437			0,973	0,582	0,171			2,163
Fe3O4	6,148								2,344			8,492
SiO2							1,985					1,985
NiO		1,28							0,35			1,63
CoO			0,125						0,034			0,159
Otros											6,105	6,105
<b>Total</b>	<b>40,5</b>	<b>1,28</b>	<b>0,125</b>	<b>4,31</b>	<b>2,94</b>	<b>0,8</b>	<b>8,792</b>	<b>10,324</b>	<b>23,114</b>	<b>1,71</b>	<b>6,105</b>	<b>100</b>

TABLA 2. Base de datos sucia de composición mineralógica, R5 y no. Mineral. Loza II.

N	Día	Turno	Ext.Ni	Ext.Co	Goet.	Gibs	Crom	Serpent	Asbol	Nontron	Hala	Magnet	Cuarzo	R5	No. Mineral
---	-----	-------	--------	--------	-------	------	------	---------	-------	---------	------	--------	--------	----	-------------

1	19 Junio	1	79,466	41,119	51,1	10,348	4,937	9,06	1,218	2,577	3,504	8,262	1,999	4,354	4,574
2		2	83,109	59,023	50,9	10,428	4,968	9,243	1,234	2,684	3,534	8,243	2,018	4,266	4,408
3		3	81,379	55,713	50,2	10,248	4,822	8,961	1,218	2,525	3,529	8,059	1,992	4,311	4,443
27	30	1	80,401	45,702	53,7	11,008	4,88	9,328	1,139	0,466	4,059	8,63	1,895	4,965	4,643
28		2	82,367	46,197	51,6	10,328	4,648	9,347	1,012	0,999	3,742	8,217	1,915	4,673	4,356
29		3	83,142	55,867	50,7	10,168	4,705	10,35	1,028	1,75	3,568	8,099	2,016	4,167	3,726
30	1 Julio	1	79,928	51,836	51,9	10,068	4,676	10,441	1,06	1,581	3,519	8,337	2,006	4,274	3,639
31		2	84,991	58,527	50,5	10,428	4,85	10,897	1,107	1,5	3,638	8,043	2,032	4,087	3,432
32		3	82,659	61,825	50,3	9,468	4,502	15,429	1,044	2,374	3,217	8,046	2,259	3,105	2,022
45	18	1	75,97	43,92	49,42	9,508	4,648	15,535	1,028	3,317	3,118	7,955	2,3	2,947	1,891
46		2	77,95	54,99	49,3	10,268	5,025	9,807	1,297	2,768	3,366	7,898	2,043	4,029	3,683
47		3	82,46	60,23	50,3	9,628	4,735	10,622	1,107	2,583	3,133	8,078	2,061	3,952	3,437
48	1 Oct	1	82,166	69,078	51,04	9,088	4,822	9,431	1,313	2,336	2,643	8,226	1,953	4,472	4,581
49		2	83,758	53,136	54,35	9,1	4,676	8,042	1,297	1,719	2,772	8,869	1,83	5,360	6,392
50		3	85,702	55,25	52,45	9,188	4,618	7,116	1,266	1,901	2,9	8,475	1,794	5,450	7,062
116	31	1	78,068	54,766	54,46	9,028	4,648	9,239	1,234	2,015	2,752	8,917	1,926	4,836	5,158
117		2	77,228	49,123	52,12	8,928	4,589	10,722	1,266	2,285	2,727	8,438	2,025	4,171	3,897
118		3	80,497	56,318	52,49	9,648	4,822	9,147	1,266	2,238	3,069	8,527	1,956	4,600	4,703
119	1 Nov	1	85,914	51,772	53,4	9,5	4,763	8,035	1,281	2,095	3,019	8,706	1,876	5,083	5,635
120		2	77,685	42,115	52,25	9,8	4,794	6,76	1,186	2,022	3,232	8,456	1,803	5,452	6,949
121		3	83,895	67,866	54,7	9,648	4,85	6,207	1,202	2,512	3,044	9,023	1,794	5,769	7,719
198	30	1	82,54	61,592	47,62	8,9	4,358	12,023	1,139	3,965	2,9	7,609	2,193	3,248	2,727
199		2	80,829	38,986	50,33	8,9	4,241	10,72	1,06	2,824	3,004	8,081	2,074	3,842	3,732
200		3	79,798	39,929	50,81	8,948	4,269	10,454	1,091	3,236	3,024	8,221	2,087	3,843	3,692

TABLA 3. Resumen de los errores absolutos de los Extractables de Ni y Co, R5 y No. Mineral para cada mes de investigación en la Loza II de Planta de Hornos

	EXTRACTABLE		HRI			INDICADOR		TURNOS	
	Ni Ext	Co Ext	Fe	Ni	Co	No Mineral	R5	N	
Jun-Jul	1,787	4,720	0,911	0,039	0,004	0,252	0,108	47	
Octubre	2,326	7,400	0,620	0,030	0,009	0,324	0,125	71	
Noviembre	3,297	6,771	0,549	0,042	0,058	0,333	0,134	84	
Promedio Ponderado	<b>2,604</b>	<b>6,515</b>	<b>0,658</b>	<b>0,037</b>	<b>0,028</b>	<b>0,311</b>	<b>0,125</b>	<b>202</b>	
Error General del Laboratorio ECG			0,800	0,030	0,010				

**Leyenda**

ECG-Empresa Che Guevara

TABLA 4. Base de datos limpia por composición mineralógica, R5 y no. Mineral.

N	Día	Turno	Co Ext	Ni Ext	Los mismos Minerales	R5	No. Min	S3	R6	R8	R11	R12	R13
1	19 Jun	2	59,023	83,109	de la BD Sucia	4,266	4,408	6,218	1,659	8,451	3,300	0,118	3,338
2	19	3	55,713	81,379	con sus	4,311	4,443	6,054	1,671	8,414	3,249	0,119	3,261
23	30	2	46,197	82,367	valores	4,673	4,356	4,741	1,768	9,257	2,774	0,108	1,350
24	30	3	55,867	83,142	correspondientes	4,167	3,726	5,318	1,721	9,113	2,914	0,110	2,329
25	01 Jul	2	58,527	84,991	a los días	4,087	3,432	5,138	1,658	8,463	2,879	0,118	1,943
26	01	3	61,825	82,659	y turnos	3,105	2,022	5,591	1,787	8,973	3,237	0,111	3,295
37	18	3	60,23	82,46	que se muestran	3,952	3,437	5,716	1,706	8,463	3,343	0,118	3,395
38	01 Oct	1	69,078	82,166	en esta	4,472	4,581	4,979	1,706	6,922	3,935	0,144	3,006
39	01	2	53,136	83,758	tabla	5,360	6,392	4,491	1,897	7,007	3,746	0,143	2,253
40	01	3	55,25	85,702		5,450	7,062	4,801	1,835	7,258	3,605	0,138	2,547
86	29	1	63,727	85,818		4,528	4,624	5,062	1,760	7,222	3,839	0,138	3,116
87	29	3	54,8	83,31		4,467	4,608	5,528	1,773	6,629	4,003	0,151	3,543
88	01 Nov	1	51,772	85,914		5,083	5,635	5,114	1,828	7,422	3,574	0,135	2,698
89	01	3	67,866	83,895		5,769	7,719	5,556	1,860	8,027	3,564	0,125	3,140

135	<b>30</b>	<b>1</b>	61,592	82,54		3,248	2,727	6,865	1,746	7,803	6,259	3,458	0,128	5,694
136	<b>30</b>	<b>2</b>	38,986	80,829		3,842	3,732	5,828	1,905	8,385	6,228	3,312	0,119	4,147
137	<b>30</b>	<b>3</b>	39,929	79,798		3,843	3,692	6,26	1,926	8,202	6,181	3,320	0,122	4,685

TABLA 5. Coeficientes de correlación par de las variables y sus interacciones. Bd limpia.

	Co Ext	Ni Ext	Goet.	Gibs	Serpent	Asbol	Nontron	Hala	Magnet	Crom	Cuarzo	S3	R5
Co Ext	1,000												
Ni Ext	0,519	1,000											
Goethita	0,171	0,422	1,000										
Gibbsita	0,153	-0,108	-0,175	1,000									
Serpentina	-0,274	-0,639	-0,689	0,149	1,000								
Asbolana	0,145	0,463	0,581	-0,362	-0,606	1,000							
Nontronita	-0,174	-0,310	-0,437	-0,262	0,298	0,023	1,000						
Halloysita	-0,002	-0,225	-0,312	0,842	0,309	-0,642	-0,263	1,000					
Magnetita-Maghemita	0,158	0,402	0,987	-0,227	-0,689	0,633	-0,286	-0,384	1,000				
Cromita	0,296	0,381	0,312	0,159	-0,507	0,532	-0,174	-0,239	0,329	1,000			
Cuarzo	-0,291	-0,653	-0,763	0,129	0,941	-0,576	0,561	0,286	-0,720	-0,488	1,000		
S3=Nontronita+Halloysita	-0,177	-0,424	-0,594	0,148	0,453	-0,291	0,881	0,224	-0,477	-0,293	0,707	1,000	
R5	0,298	0,632	0,818	-0,107	-0,926	0,603	-0,518	-0,282	0,785	0,478	-0,986	-0,661	1,000

TABLA 6. Variación del contenido de metales y Extractables en la LOZA II.

PARA LA BD SUCIA (N=200)		
VARIABLES	Mínimo	Máximo
		Prom

Fe	35,110	42,992	40,038
Ni	1,143	1,402	1,290
Al	3,920	5,500	4,553
Mg	1,719	4,970	3,036
Cr	1,443	1,765	1,606
Mn	0,530	0,944	0,754
Si	2,816	6,000	4,231
Co	0,093	0,173	0,120
No. Mineral	0,106	11,282	4,460
Extractable de Ni	69,656	88,057	81,319
Extractable de Co	21,667	75,114	52,978
<b>PARA LA BD LIMPIA (N=137)</b>			
<b>VARIABLES</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Prom</b>
Fe	35,110	42,992	39,843
Ni	1,154	1,402	1,293
Al	3,920	5,390	4,548
Mg	1,719	4,970	3,082
Cr	1,443	1,765	1,603
Mn	0,530	0,906	0,745
Si	2,816	6,000	4,280
Co	0,093	0,173	0,119
No. Mineral	1,686	11,282	4,381
Extractable de Ni	76,560	88,057	82,719
Extractable de Co	38,986	75,114	55,980

TABLA 7. Variación del contenido de minerales y Extractables en la LOZA II.



PARA LA BD SUCIA (N=200)				
VARIABLES				
	Mínimo	Máximo	Prom	
Goethita	45,575	55,734	51,634	
Gibbsita	7,848	10,788	9,043	
Serpentina	4,989	17,466	10,074	
Asbolana	0,838	1,487	1,193	
Nontronita	0,466	5,436	2,595	
Halloysita	1,989	4,326	2,806	
Magnetita + Maghemita	7,023	9,171	8,365	
Cromita	4,182	5,113	4,663	
Cuarzo	1,627	2,338	2,000	
$R5 = (Goet+Gibs+Crom+Magn)/(Serp+Nont+Halloy+Cuarzo)$	2,762	6,929	4,376	
Extractable de Ni	69,656	88,057	81,319	
Extractable de Co	21,667	75,114	52,978	
PARA LA BD LIMPIA (N=137)				
VARIABLES				
	Mínimo	Máximo	Prom	
Goethita	45,575	55,734	51,380	
Gibbsita	7,848	10,788	9,049	
Serpentina	4,989	17,466	10,249	
Asbolana	0,838	1,440	1,179	
Nontronita	0,758	5,436	2,620	
Halloysita	1,989	4,326	2,804	
Magnetita + Maghemita	7,023	9,171	8,313	
Cromita	4,182	5,113	4,655	
Cuarzo	1,627	2,338	2,011	
$R5 = (Goet+Gibs+Crom+Magn)/(Serp+Nont+Halloy+Cuarzo)$	2,762	6,929	4,309	

<u>S3=</u> Nontronita+Halloysita	4,146	7,865	5,425
<u>R6=</u> Magnetita- Maghemita/Cromita	1,535	2,024	1,788
<u>R8=</u> Gibbsita/Asbolana	6,075	11,179	7,777
<u>R9=</u> Goethita/Magnetita-Maghemita	6,037	6,502	6,184
<u>R11=</u> (Asbolana+Gibbsita)/Halloysita	2,735	4,669	3,713
<u>R12=</u> Asbolana/Gibbsita	0,089	0,165	0,131
<u>R13=</u> (Goethita*Nontronita)/(Magnetita*Cromita)	1,032	7,639	3,495
Extractable de Ni	76,560	88,057	82,719
Extractable de Co	38,986	75,114	55,980

TABLA 8. Algunos modelos multivariantes para la bd sucia por composición mineralógica.

MODELO No.	Correlación par	0S	9	11	12	13	14	15	16	17	18
Intercepción		1275,225	107,458	66,829	113,447	109,829	84,601	190,188	95,076	114,677	182,855
Goethita	0,183	-77,406	-0,146	2,608	-0,437	-0,475	1,473	-5,836	0,953	-0,390	-5,050
Gibbsita	0,070	1,343	1,627	1,465	-0,048	1,085	1,808	-0,387	-0,034	-0,135	
Serpentina	-0,409	-0,025	-0,751	-0,705	-0,731	-0,677	-0,764	-0,728	-0,787	-0,772	-0,735
Asbolana	0,104	-6,215	-5,859				-5,643	-3,775	-2,032	-2,232	-5,487
Nontronita	-0,246	-31,226	-0,653	0,364	-0,690	-0,860		-2,784		-0,604	-2,606
Halloysita	-0,051	-1,936	-2,831	-2,097		-1,692	-2,990				-1,204
Magnetita-Maghemita	0,159	360,723	-1,089	-14,506			-8,713	25,705	-6,254		21,914
Cromita	0,254	-22,298									
Cuarzo	-0,420	-14,367									
Coef. de correlac múltiple		0,498	0,491	0,475	0,460	0,473	0,490	0,469	0,460	0,463	0,481
Coef. de determinac. R <sup>2</sup>		0,248	0,241	0,225	0,211	0,224	0,240	0,220	0,212	0,215	0,231
R <sup>2</sup> ajustado		0,213	0,213	0,201	0,195	0,204	0,217	0,195	0,191	0,194	0,207
Error típico		2,968	2,968	2,990	3,001	2,984	2,961	3,000	3,008	3,002	2,979

Observaciones	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
F	6,967	8,692	9,360	13,075	11,201	10,174	9,058	10,418	10,605	10,605	10,605	10,605	9,659
Valor crítico de F	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

TABLA 9. algunos modelos multivariables para la bd limpia por composición mineralógica.

MODELO No.	Correlación	0	1	2	3	4	5	6	7	8	10
Intercepción		2033,938	105,976	79,556	99,640	75,988	88,462	99,388	99,257	89,097	75,779
Goethita	0,422	-129,721	-0,723	1,255	-0,281	1,407	-0,085	-0,253	-0,253	0,407	1,417
Gibbsita	-0,108	-0,552	-0,367	0,463	-0,217	-0,131	0,108	-0,304	-0,216		-0,079
Serpentina	-0,639	-0,156	-0,529	-0,614	-0,534	-0,549	-0,571	-0,533	-0,534	-0,539	-0,549
Asbolana	0,463	4,783	4,976		4,806	5,292	2,952	5,026	4,814	4,803	5,175
Nontronita	-0,310	-52,938	-0,866		-0,695			-0,679	-0,684	-0,414	
Halloysita	-0,225	0,739	0,212	-1,207				0,145		-0,198	-0,085
Magnetita-Maghemita	0,402	606,550	2,217	-6,718	0,130	-7,815				-3,104	-7,868
Cromita	0,381	-37,794									
Cuarzo	-0,653	-7,349									
Coef. de correlac múltiple		0,689	0,680	0,663	0,680	0,679	0,648	0,680	0,680	0,679	0,679
Coef. de determinac. R <sup>2</sup>		0,474	0,462	0,440	0,462	0,461	0,420	0,462	0,462	0,462	0,461
R <sup>2</sup> ajustado		0,437	0,433	0,418	0,437	0,441	0,403	0,438	0,442	0,437	0,436
Error típico		1,778	1,784	1,807	1,777	1,772	1,831	1,777	1,770	1,778	1,779
Observaciones		137	137	137	137	137	137	137	137	137	137
F		12,720	15,849	20,575	18,622	22,424	23,942	18,630	22,518	18,576	18,547
Valor crítico de F		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

TABLA 10. Algunos modelos multivariables simplificados.

MODELO No.	Correlación par	52	53	55	59	62
Intercepción		45,408	42,193	49,809	35,372	53,233
Gibbsita	-0,108		-0,177	0,394		
Serpentina	-0,639	-0,566	-0,546	-0,674	-0,633	-0,585
Asbolana	0,463		5,189			
Nontronita	-0,310	-0,287	-0,242			
Halloysita	-0,225			-1,044		
R9= Goethita/Magnetita	-0,241	6,350	6,830	6,335	8,003	6,491
R12=Asbolana/Gibbsita	0,397	35,112			33,179	
R8= Gibbsita/Asbolana	-0,393					-0,430
S3= Nontronita+Halloysita	-0,424					-0,242
Coef. de correlación múltiple		0,679	0,682	0,660	0,673	0,675
Coef. de determinación R <sup>2</sup>		0,461	0,465	0,436	0,453	0,456
R <sup>2</sup> ajustado		0,445	0,445	0,419	0,441	0,440
Error típico		1,765	1,765	1,806	1,771	1,774
Observaciones	137	137	137	137	137	137
F		28,240	22,796	25,516	36,781	27,680
Valor crítico de F		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

TABLA 11. Efectividad de pronóstico de los extractables de níquel.

La referencia base del 100% de efectividad responde a un error absoluto de 2, 604 de Ni Ext.

		<b>Efectividad del pronóstico, %</b>				
		Para $\geq 99\%$ . El error absoluto es 3.578	Para $\geq 99,5\%$ . El error absoluto es 3.091			
<b>No. Modelo</b>	<b>Tipo de Base de Datos a la que se aplica el modelo</b>	<b>Total de Turnos</b>	<b>Turnos Efectivos</b>	<b>Efectividad %</b>	<b>Turnos Efectivos</b>	<b>Efectividad %</b>
<b>MEJORES RESULTADOS PARA LOS MODELOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA BD LIMPIA</b>						
	Sin Limpieza BD. Unión 3 meses	200	154	77	142	71
<b>2</b>	BD LIMPIA. Unión 3 meses	137	132	96,35	128	93,4
	Sin Limpieza BD. Unión 3 meses	200	151	75,5	141	70,5
<b>3</b>	BD LIMPIA. Unión 3 meses	137	130	94,89	127	92,7
	Sin Limpieza BD. Unión 3 meses	200	152	76	141	70,5
<b>4</b>	BD LIMPIA. Unión 3 meses	137	131	95,62	128	93,4
	Sin Limpieza BD. Unión 3 meses	200	150	75	140	70
<b>7</b>	BD LIMPIA. Unión 3 meses	137	130	94,89	127	92,7
	Sin Limpieza BD. Unión 3 meses	200	150	75	139	69,5
<b>8</b>	BD LIMPIA. Unión 3 meses	137	130	94,89	127	92,7
<b>MEJORES RESULTADOS PARA LOS MODELOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA BD SUCIA</b>						
	Sin Limpieza BD. Unión 3 meses	200	159	79,5	145	72,5
<b>9</b>	BD LIMPIA. Unión 3 meses	137	117	85,4	111	81
	Sin Limpieza BD. Unión 3 meses	200	159	79,5	145	72,5
<b>13</b>	BD LIMPIA. Unión 3 meses	137	118	86,13	108	78,8
<b>MODELOS MULTIVARIABLES SIMPLIFICADOS</b>						
	Sin Limpieza BD. Unión 3 meses	200	152	76	141	70,5
<b>52</b>	BD LIMPIA. Unión 3 meses	137	130	94,89	126	91,97
	Sin Limpieza BD. Unión 3 meses	200	151	75,5	141	70,5
<b>53</b>	BD LIMPIA. Unión 3 meses	137	130	94,89	127	92,7

<b>55</b>	Sin Limpieza BD. Unión 3 meses	200	151	75,5	139	69,5
	BD LIMPIA. Unión 3 meses	137	131	95,62	126	91,97
<b>59</b>	Sin Limpieza BD. Unión 3 meses	200	155	77	145	72,5
	BD LIMPIA. Unión 3 meses	137	115	83,94	111	81
<b>62</b>	Sin Limpieza BD. Unión 3 meses	200	154	77	140	70
	BD LIMPIA. Unión 3 meses	137	131	95,62	126	91,97

TABLA 12. Efectividad General de los Modelos Multi-variables individuales y simplificados para el Cobalto.

MODELO No.	Correlación par	71	72	73	74	75
Intercepción		26,779	5,141	62,839	26,033	32,534
Goethita	0,171	0,809	1,909			
Gibbsita	0,153	3,170	7,211		7,319	2,999
Serpentina	-0,274	-0,831	-0,792	-0,954	-0,740	-0,703
Asbolana	0,145	5,429			-6,245	4,209
Halloysita	-0,002		-6,415		-6,980	
Magnetita-Maghemita	0,158	-4,684	-10,395			
R8= Gibbsita/Asbolana	-0,034			1,075		
R9= Goethita/Magnetita	-0,074			-0,336		
R13=Goet*Nont/Mag*Crom	-0,213				-0,505	-0,414
S3= Nontronita+Halloysita	-0,177			-0,619		
Coef. de correlación múltiple		0,342	0,379	0,309	0,381	0,345
Coef. de determinación R <sup>2</sup>		0,117	0,143	0,096	0,145	0,119
R <sup>2</sup> ajustado		0,083	0,111	0,068	0,112	0,092
Error típico		7,144	7,037	7,203	7,031	7,110

Observaciones	137	137	137	137	137	137	137	137
F		3,477	4,388	3,496	4,441	4,457		
Valor crítico de F		0,006	0,001	0,010	0,001	0,002		
<b>EFFECTIVIDAD GENERAL</b>		99,5%	67,9	67,9	68,6	67,2		
		99,0%	71,53	70,07	72,26	71,53		

TABLA 13. Modelos recomendados para el Escalado a toda la Planta de Hornos

MODELO No.	2	3	4	7	8	52	53	62
EFFECTIVIDAD GENERAL ( 99,5 %)	93,4	92,7	93,4	92,7	92,7	91,97	92,7	91,97
Coefficiente de Correlación múltiple	0,663	0,680	0,679	0,680	0,679	0,679	0,682	0,675
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,440	0,462	0,461	0,462	0,462	0,461	0,465	0,456

#### EJEMPLO DE ESCRITURA DEL MODELO 2

$$Ni\ Ext\ (\%) = 79,556 + 1,255*(\%Goet) + 0,463*(\%Gibs) - 0,614*(\%Serpent) - 1,207*(\%Halloy) - 6,718*(\%Magnet)$$

TABLA 14. Comparación entre los modelos mono-variable integrados de R5 y No. Mineral para diferentes situaciones

MODELO No.	LIMPIEZA POR INTERVALOS DE R5		SITUACIÓN ACTUAL	
	BD LIMPIA		BD SUCIA	
	R5-L	No. Mineral	R5-S	No. Mineral-S
Intercepción	75,599	79,240	74,896	77,968
No. Mineral ó R5	1,652	0,794	1,468	0,752
Coefficiente de correlación múltiple	0,632	0,612	0,393	0,408
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,399	0,374	0,155	0,166
R <sup>2</sup> ajustado	0,394	0,370	0,150	0,162

Error típico	1,844	1,881	3,083	3,062
Observaciones (Turnos)	137	137	200	200
<i>F</i>	89,573	80,713	36,216	39,509
Valor crítico de <i>F</i>	0,000	0,000	0,000	0,000
Efectividad General (99,5%)	91,24	91,24	70	71
Efectividad General (99,0%)	94,16	93,43	76,5	75,5

TABLA 15. Comparación entre los modelos polinómicos de R5 y No. Mineral.

MODELO No.	LIMPIEZA POR INTERVALOS DE R5		SITUACIÓN ACTUAL	
	BD LIMPIA		BD SUCIA	
	R5-L	No. Mineral	R5-S	No. Mineral-S
Intercepción	75,599	79,240	74,896	77,968
No. Mineral ó R5	1,652	0,794	1,468	0,752
Coefficiente de correlación múltiple	0,632	0,612	0,393	0,408
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,399	0,374	0,155	0,166
R <sup>2</sup> ajustado	0,394	0,370	0,150	0,162
Error típico	1,844	1,881	3,083	3,062
Observaciones (Turnos)	137	137	200	200
<i>F</i>	89,573	80,713	36,216	39,509
Valor crítico de <i>F</i>	0,000	0,000	0,000	0,000
Efectividad General (99,5%)	91,24	91,24	70	71
Efectividad General (99,0%)	94,16	93,43	76,5	75,5