

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"

FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MÁSTER EN ELECTROMECAÁNICA

**Título: Comportamiento de la humedad durante el
secado solar del mineral Laterítico.**

Autor: Ing. Yoalbys Retirado Mediaceja.

Tutores: Ms. C. Ing. Ever Góngora Leyva.
Profesor Asistente del Departamento de Mecánica del ISMM.

Dr. C. Ing. Enrique Torres Tamayo.
Profesor Auxiliar del Departamento de Mecánica del ISMM.

Dr. C. Ing. Eulicer Fernández Maresma.
Profesor Titular del Departamento de Metalurgia del ISMM.

Moa-2007
"Año 49 de la Revolución"

RESUMEN

En las empresas cubanas del níquel se desarrolla el secado térmico con el empleo de los secadores cilíndricos rotatorios, en estos equipos existe un excesivo consumo de combustible debido, entre otros factores, al elevado contenido de humedad presente en el mineral alimentado. Para mitigar esta situación se desarrolla la presente investigación que permite determinar en que medida se puede reducir el contenido de humedad del material y los factores que influyen en el mismo, para ello se obtienen de forma experimental los valores de humedad alcanzados durante el proceso de secado solar del mineral laterítico a la intemperie, obteniéndose una reducción del contenido de humedad de un 13 y 6,64% para los experimentos 1 y 2 respectivamente.

Se procede con un diseño de experimento factorial completamente aleatorio. El método empleado para el análisis de la humedad es el de diferencias de pesadas. Se realiza el procesamiento estadístico de los resultados a partir de una regresión lineal múltiple que permite establecer los modelos matemáticos (ecuaciones 2.3, 2.4 y 2.5) para las masas de trabajo experimentadas. La relación entre las diferentes variables del proceso se muestra a partir de los gráficos de comportamiento de la humedad respecto a los diferentes parámetros climatológicos más influyentes en el secado solar.

Finalmente se comprobó que una reducción del contenido de humedad en 8,85%; disminuye el consumo de combustible en 1,02 t/h; generando un ahorro anual por concepto de consumo de combustible en el secador rotatorio que asciende a 2 172 810,23 USD y una disminución considerable de las emanaciones de gases producto de la combustión al medio ambiente.



ABSTRACT

In the Cuban nickel companies the thermal drying is developed with the employment of the rotational cylindrical dryers, in these equipment an excessive consumption of fuel, among other factors due to the high content of humidity that present in the fed mineral, exist to mitigate this situation this research is developed that allows to determine in that measure the content of humidity of the material can decrease and the factors that influence in the same one, by an experimental way the securities of humidity reached during the trial of drying lot are obtained, being experimentally obtained a reduction of the content of humidity of a 13 and 6,64% respectively.

It is proceeded with a design of totally random factorial experiment. The method used for the analysis of the humidity is the differences of heavy. It is carried out the statistical prosecution of the results through from a multiple lineal regression that allows to establish the mathematical models for the experienced working masses. The relationship among the different variables of the process is shown using the graphics of behavior of the humidity regarding the different more influential climatological parameters in the solar drying.

Finally it was proven that a reduction of the content of humidity in 8,85%; diminishes the consumption of fuel in 1,02 t/h; generating an annual saving for this concept of consumption of fuel in the rotational oven that ascends to USD 2 172 810,23 and a considerable decrease of emanations of gases product of combustion to the environment.

**ÍNDICE**

Contenido	Págs.
Introducción	1
Capítulo I Marco teórico- metodológico de la investigación.....	6
1.1- <i>Introducción.....</i>	6
1.2- <i>Principios técnicos del secado</i>	6
1.3- <i>Trabajos experimentales precedentes sobre el proceso de secado....</i>	7
1.4- <i>Fundamento teórico de la investigación.....</i>	18
1.5- <i>Clasificación de los sólidos húmedos objeto de secado.....</i>	19
1.6- <i>Aspectos fundamentales sobre el secado solar natural.....</i>	22
1.7- <i>Características geográficas del Yacimiento Punta Gorda.....</i>	23
1.8- <i>Conclusiones del capítulo I.....</i>	25
Capítulo II Resultados experimentales del secado solar del mineral laterítico.....	26
2.1- <i>Introducción.....</i>	26
2.2- <i>Materiales empleados en la experimentación.....</i>	26
2.3- <i>Instalación experimental para el estudio de la humedad.....</i>	27
2.4- <i>Diseño experimental.....</i>	27
2.5- <i>Técnica experimental.....</i>	30
2.6- <i>Resultados experimentales.....</i>	31
2.7- <i>Método para el procesamiento estadístico de los datos experimentales.....</i>	42
2.8- <i>Conclusiones del capítulo II.....</i>	46
Capítulo III Análisis de los resultados. Valoración económica e impacto ambiental.....	47
3.1- <i>Introducción.....</i>	47
3.2- <i>Análisis de los resultados</i>	47
3.3- <i>Valoración económica.....</i>	60
3.4- <i>Impacto ambiental asociado al proceso de secado solar.....</i>	61
3.5- <i>Conclusiones del capítulo III.....</i>	63
Conclusiones.....	64
Recomendaciones.....	65
Bibliografía.....	66
Anexos	---

INTRODUCCIÓN

La educación energética de un país es de gran importancia, pues ello significaría no sólo un mejor y más eficiente aprovechamiento de los combustibles fósiles con que cuenta la humanidad, sino además, una garantía en la transición hacia una economía energética sostenible que descansa en la energía solar disponible en todo el territorio nacional.

El desarrollo industrial de las tecnologías en la industria del níquel exige disminuir los consumos de portadores energéticos y que cada una de las instalaciones de las empresas sean más eficientes.

Hoy en día la industria niquelífera cubana se encuentra enfrascada en dos grandes cambios: la modernización de sus plantas, con el objetivo de disminuir los costos de producción por tonelada de níquel y el perfeccionamiento empresarial para hacerla más competitiva en el mercado internacional. Este último como proceso integral no puede soslayar el impulso tecnológico a partir de una aplicación consecuente de la ciencia y la técnica (Torres, 2003).

Existen dos fábricas en funcionamiento para la obtención de concentrado de níquel más cobalto con tecnología carbonato amoniacal: las Empresas “Comandante René Ramos Latour” y “Comandante Ernesto Che Guevara”. En estas industrias metalúrgicas se desarrollan complejos procesos que muestran diferentes comportamientos con dinámicas muy variadas (Guzmán, 2001), entre ellos se encuentran en la planta de preparación de mineral los procesos de secado térmico en cilindros rotatorios y el secado solar.

El secado es la eliminación del agua que contienen los materiales, el mismo se realiza a través de un proceso de transferencia de calor y masa, también puede efectuarse por medios mecánicos (sedimentación, centrifugación y filtración). Sin embargo, la deshidratación más completa se alcanza mediante el secado térmico (Knoule, 1968). Entre los aspectos más importantes que se han planteado los directivos de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” en función de disminuir el consumo de combustible, está la realización eficiente del proceso de secado en los cilindros rotatorios, a partir de implementar el secado solar previo del material, aspecto no resuelto en la actualidad, si se tiene en cuenta que solo en el proceso de secado se consume el 23% del total de la energía consumida en la empresa (Informe económico anual de la empresa Ernesto Che Guevara, 2006).

El secado solar por sus múltiples ventajas y perspectivas se encuentra ampliamente aplicado a nivel mundial (Echazu, 2001). En Cuba su empleo se reduce a la industria de alimentos, café, madera, entre otras (Torres et al., 2001; Griñan et al., 2003) y en menor medida en la industria del níquel; pero a partir de los pronunciamientos del IV Congreso del Partido Comunista de

Cuba y de la Revolución Energética donde se enfatiza en la necesidad de llevar a cabo una gran campaña de ahorro de energía y combustible, se hace necesario, de acuerdo con el nivel alcanzado por la industria del níquel y su posterior desarrollo: implementar eficientemente el secado solar del mineral laterítico que contribuye a incrementar la productividad de la planta y reducir los gastos energéticos anuales.

A pesar de las potencialidades probadas del secado solar en otros materiales muy poco se ha hecho en la empresa Ernesto Che Guevara. Las causas que originan esta dificultad son: los grandes volúmenes de producción manejados a partir de la ampliación y modernización de la empresa, la ausencia del equipamiento requerido para realizar adecuadamente la homogenización. Estas deficiencias conducen a la inexactitud de los proyectos de las instalaciones de secado solar, derivadas de la ausencia de investigaciones científicas y trabajos experimentales en esta área del conocimiento.

El estudio experimental del secado solar del mineral laterítico es un aspecto novedoso no abordado en las literaturas especializadas (Sherwood, 1936; Lykov, 1968; Knoule, 1968; Strumillo, 1975; Perry, 1985), por cuanto depende de sus propiedades físicas, térmicas y de las características climatológicas de la región de Moa, que se caracteriza por presentar un microclima de constantes cambios que hacen difícil su predicción y pronóstico, los valores de los parámetros fundamentales generalmente no varían conforme a lo establecido en el Atlas Nacional de Cuba, aspecto que limita el desarrollo de las investigaciones encaminadas al estudio del proceso.

En general los intentos por estudiar experimentalmente el proceso se reducen a materiales puros debido a la alta complejidad que implica el trabajo con materiales multicomponentes.

Situación problemática actual

En la concepción original del proyecto de construcción de la empresa estuvo previsto la creación de un depósito que tenía dos funciones esenciales: almacenar mineral de reserva para tres días de trabajo y secar el producto utilizando la energía solar, para esto se contaba con cuatro grúas Gantry que eran las encargadas de homogenizar, apilar y remover el mineral logrando una elevada eficiencia en el secado del mismo. A raíz del derrumbe del campo socialista y el recrudecimiento del bloqueo económico en la década del 90, estos equipos que tan vital importancia tienen para el proceso afrontaron dificultades con algunas piezas de repuesto de imposible adquisición por parte de la entidad, esto generó una situación difícil que se agudizó hasta llegar al estado actual donde se cuenta solo con dos equipos, esto genera la alimentación a los secaderos de un mineral con alto contenido de humedad (Manual de

operaciones de la planta de Preparación de mineral, 2005) y heterogéneo en cuanto a la variabilidad de su composición sustancial (Laborde, 2005).

La situación actual del proceso de secado en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, se caracteriza por las siguientes deficiencias:

- 1- Elevado contenido de humedad del mineral alimentado a los secaderos (entre 36 y 42 %).
- 2- Alta variabilidad de su composición sustancial (relación Limonita/Serpentina).
- 3- Incapacidad de ajustar los parámetros del secador para lograr un tiempo de retención adecuado en correspondencia con la humedad del mineral a la entrada de tambor.
- 4- Limitaciones de los métodos existentes para la proyección y cálculo de los parámetros racionales del proceso para el mineral laterítico.

Los aspectos antes mencionados imponen la necesidad de implementar el secado solar del mineral laterítico basado en las concepciones actuales y las tendencias internacionales relacionadas con el desarrollo del proceso. Para ello se toman como referencia las investigaciones desarrolladas en Cuba (Novoa et al., 1994; Miranda, 1996; Estenoz et al., 2003a;) y los estudios realizados en otras regiones del mundo (Río Tubas en Filipinas y Tocantins en Brasil, entre otras). Con la debida contextualización a las condiciones climatológicas de la región de Moa.

Comienza por tanto una revolución en el estudio del proceso de secado solar del mineral laterítico en la región, las investigaciones más recientes (Estenoz et al., 2003b; Santos, 2005; Ramírez, 2006; Romero, 2006) arrojan resultados relevantes en esta esfera llegando a la conclusión de que la humedad del material es un parámetro que en el secado solar depende de una serie de factores, entre los que se destacan: la masa de mineral a secar, composición sustancial, temperatura del medio ambiente, humedad relativa, radiación solar, precipitaciones y velocidad de los vientos. Pero ¿en qué medida influye cada uno de estos parámetros y cual es la repercusión del cambio de cada uno de ellos, en el contenido de humedad del mineral en el proceso de secado solar?, esta y otras interrogantes son las que dieron origen a la presente investigación.

*A partir de las deficiencias antes expuestas se declara como **problema ingenieril**:*

El elevado consumo de combustible en el proceso de secado del mineral laterítico en los secaderos cilíndricos rotatorios de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” provocado por el alto contenido de humedad del material alimentado.

El problema científico a investigar lo constituye:

El insuficiente conocimiento acerca de la influencia de los parámetros climatológicos en el secado solar del mineral laterítico y su efecto sobre el contenido de humedad del material, que limita la capacidad de pronóstico de las expresiones empíricas existentes.

Como objeto de estudio de la investigación se plantea:

El mineral laterítico sometido al proceso de secado solar.

El campo de acción donde se desarrolla la investigación es:

La modelación matemática estadística del proceso de secado solar del mineral laterítico.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente hipótesis científica:

El análisis empírico-teórico del proceso de secado solar, conjugado con los métodos estadísticos existentes, permitirá establecer los modelos matemáticos estadísticos que describen el comportamiento de la humedad del mineral laterítico durante el proceso y los parámetros climatológicos más influyentes en correspondencia con las variaciones de las masas de trabajo en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, de Moa.

En correspondencia con la hipótesis planteada, se define como objetivo general del trabajo:

Obtener, mediante el estudio experimental, los modelos matemáticos estadísticos que describen el comportamiento de la humedad del mineral laterítico durante el secado solar.

Objetivos específicos:

- 1- Determinar las limitaciones de las teorías y las expresiones empíricas desarrolladas en el mundo para el proceso de secado de materiales sólidos, al ser aplicadas al mineral laterítico.***
- 2- Realizar el estudio experimental del proceso de secado solar del mineral laterítico en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.***
- 3- Valorar los efectos económico y medioambiental del proceso mediante la comparación de los consumos de combustible obtenidos en el secado en los cilindros rotatorios antes y después de implementado el secado solar.***

Para lograr el cumplimiento de los objetivos propuestos, se plantean las siguientes **tareas del trabajo**:

- 1- Establecer el estado del arte sobre el proceso de secado solar y la situación actual de la temática en la empresa.
- 2- Determinar los parámetros climatológicos que mayor influencia tienen en el secado solar.
- 3- Establecer el comportamiento de la humedad del mineral durante el proceso considerando las variaciones de los parámetros climatológicos más influyentes y las masas de trabajo.
- 4- Realizar la modelación matemática estadística del comportamiento de la humedad, basada en los datos experimentales obtenidos.
- 5- Comparar el consumo de combustible asociado al secado térmico en los cilindros rotatorios antes y después de implementado el secado solar.
- 6- Valorar el impacto ambiental del proceso de secado bajo las nuevas condiciones de operación.

En correspondencia con la hipótesis y el objetivo general, se plantea como **aporte del trabajo**: **Los modelos matemáticos estadísticos que describen el comportamiento de la humedad del mineral laterítico durante el proceso de secado solar en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.**

Los **métodos de investigación** empleados en el trabajo son los siguientes:

- 1- Método histórico-lógico para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el proceso objeto de estudio.
- 2- Método inductivo-deductivo para el establecimiento de las limitaciones de las teorías y las expresiones empíricas desarrolladas en el mundo para el secado de materiales sólidos, al ser aplicadas al mineral laterítico.
- 3- Método de investigación experimental para describir y caracterizar el proceso estudiado y sus principales regularidades.
- 4- Técnicas computacionales para el procesamiento estadístico de los datos experimentales y la obtención de los modelos matemáticos.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO - METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1- Introducción

En las regiones industrializadas el bajo costo del combustible permitió hace varias décadas el desarrollo de procesos de secado artificial a gran escala basados en el uso de combustibles. En los últimos años, la escasez y elevados precios de éstos han despertado un nuevo interés en el secado con el uso de la energía solar, tratando de desarrollar diversas técnicas que permitan solucionar los problemas relacionados con el secado.

El **objetivo** de este capítulo es:

Establecer los fundamentos técnicos necesarios para el estudio experimental del proceso de secado solar del mineral laterítico, mediante el desarrollo del marco teórico de la investigación.

1.2- Principios técnicos del secado

Básicamente, el secado consiste en retirar por evaporación el agua de la superficie del producto y transferirla al aire circundante. La rapidez de este proceso depende del aire (la velocidad con la que éste circule alrededor del producto y su grado de sequedad) y de las características físico mecánicas del producto (su composición química, mineralógica, contenido de humedad y tamaño de las partículas). El aire contiene y puede absorber vapor de agua. La cantidad que se puede absorber depende, considerablemente de su temperatura, aunque también puede existir la absorción de agua a temperatura constante (Faires, 1991; Fernández, 1994). A medida que el aire se calienta, su humedad relativa decrece y por tanto, la absorción de la humedad es mayor. Al calentarse el aire alrededor del producto, éste se deshidrata rápidamente. Cuanto mayor sea el flujo de aire más rápidamente se eliminará el agua del producto a secar (Zazhin, 1984).

De acuerdo con Boizán (1991) una de las formas más eficiente de describir el proceso de secado es mediante las curvas de velocidad de secado contra humedad promedio en un sistema de coordenadas $(du/d\tau)=f(u)$. En la figura 1.1 se representan de forma general las etapas de secado por la que transita un sólido sometido al proceso.

El tramo AB corresponde al período de calentamiento. En éste la temperatura del material se eleva hasta la temperatura a bulbo húmedo y su humedad baja muy poco. La velocidad de secado crece y en B alcanza su máximo valor.

El período de velocidad de secado constante (primer período) corresponde a la recta BC. En esta etapa tiene lugar una intensa evaporación de la humedad libre. La velocidad del proceso es máxima y depende fundamentalmente de la resistencia externa a la difusión y en menor cuantía de la resistencia interior del sólido a la difusión.

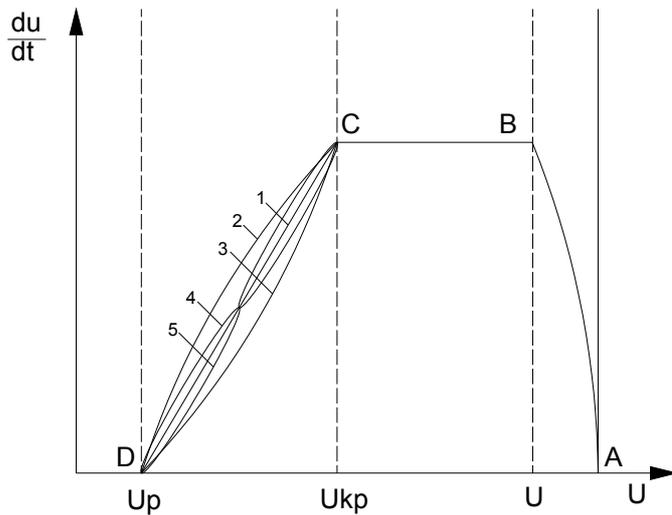


Figura 1.1. Curva de velocidad de secado.

Fuente: Boizán, 1991.

El período de velocidad de secado decreciente (segundo período), según sea el caso, puede describirse con una de las curvas (1, 2, 3, 4 ó 5) que van desde C hasta D.

A pesar de que en sentido general este es el comportamiento de los sólidos, en ocasiones durante el secado de algunos materiales (los cereales y diferentes vegetales como la papa, remolacha y la zanahoria) en el primer periodo su temperatura no se mantiene constante, sino que sigue creciendo hasta alcanzar valores superiores a la del bulbo húmedo. Este comportamiento permite concluir que la proposición realizada por Lykov (1968) de llamar a esta etapa **período de temperatura constante** no es satisfactoria. Es más acertado llamarlo **período de velocidad de secado constante** ya que se cumple para cualquier material.

1.3- Trabajos experimentales precedentes sobre el proceso de secado

El secado con el empleo de la energía térmica se ha desarrollado vertiginosamente en el mundo, de acuerdo con las fuentes bibliográficas consultadas (Krisher, 1961; Strumillo, 1975) se destacan dos tendencias fundamentales: el secado bajo parámetros controlados y el secado solar.

Respecto al primer elemento se encontraron numerosos trabajos experimentales encaminados a describir el comportamiento de la transferencia de calor y masa en el secador y caracterizar la cinética del proceso de secado y la humedad de equilibrio. Los trabajos más pertinentes se analizan a continuación:

Lykov (1954), demostró experimentalmente que el proceso de secado depende del mecanismo de transporte de la humedad en el interior del sólido bajo la acción de un gradiente térmico, de la energía de vaporización y de la difusión del vapor desde la superficie del material hacia los alrededores, a través de la capa límite. Este descubrimiento es válido para el secado de los materiales capilaroporosos, grupo al que corresponde el mineral laterítico según la clasificación dada por Kasatkin (1987).

Philip et al. (1957), estudian las fuerzas capilares que causan el transporte del líquido, en términos de gradientes del contenido de humedad y temperatura resultante en una ecuación de difusión. Aunque el trabajo se realizó para diferentes condiciones de experimentación, el mismo indica los elementos a considerar en el estudio experimental del proceso.

Fulford (1969) y Boizán (1991), proporcionan varios modelos matemáticos tomados de la literatura rusa para describir la cinética del secado. Estos modelos reportados por diferentes autores (Filonenko, 1958; Rezchikov et al., 1966; Kuroshkina, 1972) fueron establecidos considerando la velocidad de secado (N) constante. En todos los casos N se expresa en forma de una función empírica de los parámetros fundamentales del proceso. Estas expresiones no pueden ser aplicadas al secado solar del mineral laterítico porque en este proceso la velocidad de secado varía y no existe fluidización, además, los materiales experimentados (semillas de tomate, granos y partículas de papa, respectivamente) tienen propiedades termofísicas diferentes a la del sólido estudiado en este trabajo.

Whitaker (1977), obtuvo ecuaciones aproximadas para el secado continuo de diferentes materiales; Huang (1979), usó un sistema de ecuaciones para la etapa del secado en el cual el movimiento del líquido debido al flujo capilar es dominante y un sistema diferente de ecuaciones para el estado, donde el movimiento de la humedad ocurre a través de la difusión del vapor.

Thomas et al. (1980), resolvieron las ecuaciones expuestas por Lykov (1954) usando el método de elementos finitos, ellos resolvieron las ecuaciones diferenciales parciales no lineales para los casos donde es posible variar las propiedades de los materiales y también ecuaciones lineales con propiedades constantes de los materiales; compararon los resultados de ambos casos con

los de un análisis lineal del secado de una sección de madera y constataron que no había diferencia con los resultados no lineales, de ahí que asumir las propiedades del material constante se justifique en algunos casos. De los resultados obtenidos por estos investigadores se deduce que es posible simplificar el estudio del proceso al asumir constantes las propiedades del material, siempre que el rango de error no exceda las especificaciones propias del proceso estudiado.

Dinulescu et al. (1985), presentan una solución analítica para la migración unidireccional de humedad bajo gradientes de contenido de humedad y temperatura asumiendo propiedades de transporte constante, obtuvieron relaciones para la temperatura y campos de humedad en forma adimensional. Estos resultados no tienen aplicación práctica para el caso estudiado debido a las simplificaciones realizadas por los autores.

Plumb et al. (1985), desarrollaron sistemas de ecuaciones que describen tanto el transporte capilar como difusivo de humedad y calor para el secado de madera, sus predicciones numéricas se basaron en funciones empíricas para predecir la transferencia de calor por convección en la superficie como una función del contenido de humedad de dicha superficie. A pesar de que los resultados obtenidos son satisfactorios para el secado de madera, los mismos no pueden ser generalizados al mineral laterítico por las diferencias notables que existe entre las propiedades térmicas de ambos sólidos.

Peishi et al. (1989), usaron diferentes formulaciones matemáticas para la región húmeda, en estas el mecanismo de transferencia es el flujo capilar de agua libre y la región de sorción en la que el transporte de humedad es debido al movimiento del agua no estructural y la transferencia de vapor, usando el modelo desarrollado estudiaron el comportamiento del secado de ladrillos, madera y granos de maíz, haciendo predicciones en cuanto a la temperatura y distribución del contenido de humedad para esos materiales. Ilic et al. (1989), utilizaron la forma integral de las ecuaciones de conservación de la masa y energía considerando un elemento de volumen promedio, el que consta del sólido poroso, agua y vapor de agua para describir el secado del material en las regiones húmedas y secas.

Kallel et al. (1993), estudiaron el efecto del contenido de humedad inicial y el coeficiente de transferencia de calor por convección en el secado de ladrillos; emplearon ecuaciones de conservación para líquidos, aire y vapor de agua, similar a las utilizadas por Whitaker (1977). El efecto del flujo capilar en la primera etapa de secado y difusión gaseosa en la última etapa son

dados en términos de coeficientes difusivos para los líquidos y vapores. Este aporte no es satisfactorio para predecir el comportamiento del secado solar del mineral laterítico debido a que las expresiones fueron obtenidas para el proceso continuo y el caso estudiado corresponde al secado periódico.

Ferguson et al. (1995), derivaron las ecuaciones de conservación para líquido y aire haciendo aproximaciones continuas para el secado de madera por debajo del punto de ebullición del agua; utilizando la técnica del volumen de control como un punto de referencia validaron los resultados obtenidos con el empleo del método de elementos finitos; encontraron ligera diferencia en los resultados de ambos métodos durante la última etapa de secado.

Haciendo uso de los coeficientes de difusividad obtenidos experimentalmente por Perrin et al. (1987); Muregesan et al. (1996), realizan predicciones numéricas a partir de un modelo unidireccional para estudiar la variación de la humedad y la temperatura dentro de materiales sólidos durante el secado convectivo asumiendo propiedades de transporte constantes, en este trabajo se omiten los términos de disipación viscosa y convectiva en las ecuaciones de energía, también se asume que existe equilibrio térmico local entre la matriz del sólido, líquido puro y mezcla gaseosa de aire y vapor. Las simplificaciones realizadas no permiten la generalización de los resultados.

En Cuba se han desarrollado diferentes investigaciones relacionadas con el secado de materiales y productos alimenticios tales como: café, cacao, cebolla, madera, cemento, zeolita, entre otros, todos con resultados satisfactorios para cada uno de estos materiales. Dentro de ellos se puede destacar el trabajo desarrollado por Novoa et al. (1995) para el secado de zeolita a escala de laboratorio, en este se obtienen ecuaciones empíricas que describen el comportamiento de la cinética del secado del producto siguiendo el modelo propuesto por Hall (1983), obteniendo además, los valores de humedad de equilibrio para diferentes temperaturas y humedad inicial; finalmente con todos los resultados alcanzados realizaron un software para simular el proceso y predecir su comportamiento bajo determinadas condiciones de operación.

Todo lo anterior es aplicable al secado de materiales de forma estática con régimen de temperatura constante. En el secado solar de los materiales a la intemperie estas condiciones no se cumplen debido a que el proceso depende de los parámetros termofísicos del sólido objeto de secado y de los climatológicos de la región que varían aleatoriamente y no pueden ser preestablecidos, debido a esto los mecanismos de transferencia de calor y masa se manifiestan de forma compleja, difícil de predecir a través del secado estático con regímenes de

temperatura constante. De los aspectos anteriores se deduce la necesidad de estudiar los principales trabajos científicos referidos al proceso con velocidad de secado decreciente.

1.3.1- Trabajos experimentales precedentes para el período de velocidad de secado decreciente

La descripción matemática del proceso de secado en este período es más difícil porque la velocidad de secado varía continuamente y sigue una función compleja. En la actualidad se utilizan métodos semi-empíricos y empíricos en la caracterización de esta etapa del proceso.

La forma más sencilla de la curva de secado en el segundo período (de velocidad de secado decreciente) es la propuesta por Lykov (1968), según la cual la velocidad de secado ($du/d\tau$) es proporcional a la diferencia de humedad ($u-u_p$); ecuación 1.1, en la que: K es el coeficiente de secado en el segundo período.

$$-\frac{du}{d\tau} = K \cdot (u - u_p) \quad (1.1)$$

El valor de K se puede determinar aplicando el método de los mínimos cuadrados a la relación funcional existente entre $\ln [(u-u_p)/(u_{KP}-u_p)]$ vs τ , hallados a partir de datos experimentales del proceso.

Físicamente los valores de K reflejan las características estructurales internas de los cuerpos capilaroporosos húmedos. Sin embargo, cabe destacar que si cambian las condiciones externas, la resistencia y la transferencia de masa del sólido húmedo al gas se afecta y por tanto, la velocidad de secado en el primer período varía; como consecuencia, la humedad crítica (u_{KP}) dependiente tanto de la resistencia interna como de la externa del transporte de humedad, también cambia.

Del análisis de datos experimentales de diferentes materiales Lykov propuso calcular el coeficiente de secado K , en función de N , como se observa en la expresión (1.2), en la que K_p es el coeficiente relativo de secado, cuyo valor depende de las propiedades del material y de su humedad inicial. El mismo (K_p) se puede hallar mediante el método de los mínimos cuadrados aplicado a la relación K vs N .

$$K = K_p \cdot N \quad (1.2)$$

La expresión (1.3) reportada por Rezchikov et al. (1966) generaliza en cierto modo a la ecuación 1.1 al introducir el exponente M , constante cuya magnitud es función de las propiedades del material.

$$-\frac{du}{d\tau} = K \cdot (u - u_p)^M \quad (1.3)$$

Zhidko et al. (1986), obtuvo la ecuación general (1.4) de la macrocinética del secado, aplicada con éxito a los períodos de precalentamiento, de velocidad de secado constante y descendente, en la cual:

u_o, u_p : humedad inicial y de equilibrio convencional del material; % .

$$-\frac{du}{d\tau} = K \cdot (u_o - u_p) \cdot \exp(-K \cdot \tau) \quad (1.4)$$

Los valores del coeficiente K y P_s se hallan con las relaciones 1.5 y 1.6.

$$K = A \cdot B \cdot C \cdot P_s \cdot (F_M / G) \quad (1.5)$$

$$P_s = 0,022 \cdot (1,67 + 0,0052 \cdot u)^{0,1 \cdot T} + 0,045 \quad (1.6)$$

Donde:

A: constante que depende del tipo de material y sus propiedades termofísicas.

B: coeficiente cuyo valor depende del tipo de material.

C: parámetro función de la humedad inicial del material.

P_s : presión de saturación del vapor sobre la superficie del sólido secado; Pa .

F_M/G : superficie de vaporización específica, igual a la relación existente entre la superficie de la muestra y el peso de ésta absolutamente seca; m^2/kg .

u : humedad actual del material; % .

T: temperatura actual del material; °C .

La expresión (1.4) ofrece la ventaja de no utilizar la humedad crítica, u_{KP} , y la intensidad de la deshidratación se relaciona directamente con el calentamiento.

Filonenko (1958), propone la expresión (1.7) para el segundo período de secado, en la misma A, B, y M son constantes determinadas experimentalmente.

$$-\frac{1}{N} \cdot \frac{du}{d\tau} = \frac{(u - u_p)^M}{A + B \cdot (u - u_p)^M} \quad (1.7)$$

Los coeficientes A y B dependen del tamaño y forma de las partículas. El valor del exponente M depende de la forma del enlace de la humedad con el material; para diferentes productos oscila entre 0.5 y 2.

Vanecek et al. (1965), definen la variación de la velocidad de secado con la ecuación (1.8), en la cual los coeficientes a y b son constantes y sus valores dependen de la naturaleza del sólido y del régimen de secado respectivamente. Ésta ha sido utilizada para todo el proceso e incluye el periodo de velocidad de secado constante y el descendente. Resulta ventajoso su uso porque no es necesario conocer el valor de la humedad crítica.

$$-\frac{du}{d\tau} = \frac{a}{(a + b \cdot \tau)^2} \quad (1.8)$$

Mediante un procedimiento matemático simple se demuestra que la velocidad de secado según la ecuación 1.8 se puede expresar en términos de un coeficiente de secado $K = b^2/a$ y la diferencia $(u - u_p)$ elevada al cuadrado (expresión 1.9).

$$-\frac{du}{d\tau} = K \cdot (u - u_p)^2 \quad (1.9)$$

Pikus (1965), aplicó la expresión 1.10 al período de velocidad de secado decreciente, al ajustar las curvas halladas en el secado fluidizado de diferentes productos termolábiles. El coeficiente K se puede hallar con datos experimentales aplicando el método de los mínimos cuadrados a la relación funcional existente entre $\ln[(u - u_p)/(u_{KP} - u_p)]$ vs τ .

$$-\frac{du}{d\tau} = K \cdot (u_{KP} - u_p) \cdot \exp(-K \cdot \tau) \quad (1.10)$$

Al analizar en conjunto las expresiones descritas para el segundo período de secado, las cuales permiten una vez integradas hallar el tiempo requerido para reducir la humedad del material de un valor u_0 a otro u_K dados, se demuestra que son importantes porque ofrecen la posibilidad de evaluar la influencia que tienen diferentes factores sobre el secado.

Todas las ecuaciones fueron obtenidas por sus autores del procesamiento de datos experimentales correspondientes a materiales de análogas propiedades físicas y su sencillez no crea dificultades al ser utilizadas en la práctica.

De las ecuaciones reportadas por los diferentes investigadores la más utilizada en los cálculos de la duración del proceso de secado es la propuesta por Lykov (1968), basada en el uso del coeficiente de secado, K (expresión 1.1).

La relación 1.2 indica que la influencia de las condiciones externas del secado y las características estructurales internas del material determinante de los fenómenos elementales del transporte de calor y masa, en el segundo período de secado, pueden expresarse en

función de factores individuales. Así, la temperatura, velocidad y humedad del agente secador influyen tanto en el periodo de velocidad de secado constante como en el decreciente. La relación 1.1 aplicada a la condición $u = u_{KP}$, cuando las velocidades de ambos periodos son iguales, permite hallar una relación formal entre K y N dada por:

$$N = K.(u_{KP} - u_P), \quad K = N/(u_{KP} - u_P) \quad \text{y} \quad K_P = 1/(u_{KP} - u_P) \quad (1.11)$$

De aquí se infiere que las influencias debidas a las propiedades internas de un material en particular van incluidas en los valores de las humedades críticas y de equilibrio. La ecuación (1.1) de Lykov es criticable, no obstante, porque supone la constancia del coeficiente K durante todo el segundo período, el cual realmente es función de la temperatura y humedad actual del sólido secado que se encuentra en constante cambio.

Sin embargo la restricción señalada al modelo de Lykov puede ser salvada aplicando el procedimiento de cálculo por zonas con valores diferentes del coeficiente de secado K, en cada tramo de la curva, como lo han reportado diferentes investigadores (Nonhebel et al., 1971).

Las expresiones (1.3, 1.4, 1.7, 1.9 y 1.10) no pueden ser deducidas a partir de un análisis físico del proceso de secado (Romankov et al., 1975) y deben considerarse sólo como formas diferentes para el ajuste aproximado de curvas experimentales. Si se observa la estructura matemática de esas ecuaciones se notará que la 1.9 es un caso particular de la 1.3, en tanto que las expresiones 1.4 y 1.10 corresponden a un mismo comportamiento exponencial del segundo periodo de secado, particularizado para los materiales y condiciones utilizadas del proceso y en general, equivalente a la ecuación 1.1.

Si bien es cierto que las expresiones expuestas anteriormente (1.1-1.10) son el resultado del estudio experimental del proceso de secado realizado por diferentes investigadores para materiales con propiedades físicas similares, que las formulaciones matemáticas contribuyen a entender la teoría científica relacionada con el secado, la transferencia de calor y masa simultáneas, tanto externas como internas, también se puede significar, que los modelos matemáticos que describen el comportamiento del secado expuestos en este epígrafe aunque indican la línea a seguir en el análisis de este complejo proceso, no pueden ser aplicados de igual manera al secado solar del mineral laterítico, debido a que las condiciones de experimentación y las propiedades físico-mecánicas del sólido objeto de estudio difieren considerablemente de los estudiados y reportados en las investigaciones precedentes. Por los aspectos antes mencionados se requiere analizar **los trabajos precedentes referidos al secado solar.**

Respecto a esta temática se han publicado numerosos trabajos en diferentes regiones del mundo, de acuerdo con la revisión bibliográfica realizada los mismos están dirigidos principalmente al secado solar de productos alimenticios y la madera.

Curioni (2000), estudia la producción de especias aromáticas y la factibilidad técnica y económica para el empleo de un secador solar indirecto por convección forzada en el procesado de las siguientes especies: Menta inglesa, Romero, Tomillo, Albahaca, Orégano y Menta japonesa. Estos autores aprovechan la experiencia existente sobre un secadero desarrollado por el Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO) destinado al secado de Pimiento en la provincia de Salta, Argentina. Obtienen resultados que permiten concluir que es factible en principio, secar estas especies empleando energía solar con un mínimo costo por kilogramo producido, usando una tecnología simple y de impacto ambiental mínimo.

Chiappero (2001), presenta el cálculo y la simulación de un silo secador de granos elevado de base cónica de 150 toneladas. En el trabajo los autores efectúan la simulación numérica de la distribución de presiones y de las velocidades intragranulares para trigo a través del método de elementos finitos. Para ello emplean el programa ALGOR (Versión 13.06-WIN, 2001). Del análisis de los resultados se observa que la distribución de presiones y velocidades son adecuadas para el secado de diferentes tipos de granos a baja temperatura en sistemas de silos a escalas intermedias. El secado se realiza por el precalentamiento del aire a través de un banco de colectores solares de diseño simple. Realizan además el cálculo de la superficie de los colectores solares para lograr el incremento de la temperatura del aire necesario para el secado de soya.

Berruta (2004), propone una solución tecnológica al problema del secado de café en los estados de Chiapas y Oaxaca en México. Para realizar este proyecto los autores realizan una revisión de experiencias de secado de otros productos agropecuarios identificando similitudes respecto al secado de café, dando paso al diseño de un secador solar de café con el piso de madera y construcción similar a la de un invernadero con orientación según el movimiento del sol en la época de cosecha de café para un mayor aprovechamiento de la energía solar.

Al secado solar de productos en Cuba se han dedicado varias investigaciones entre las que se destacan las desarrolladas por Todd (2001), que detalla un programa para la inversión en el secado de madera donde cita dos procesos de secado comparando cada uno de ellos con las

diferentes ventajas y desventajas que estos presentan. Este análisis facilita la toma de decisiones respecto a la aplicación práctica del proceso y provee a los investigadores de las herramientas necesarias para el estudio de factibilidad.

A la caracterización y actualización del potencial de secado en el país a partir del conocimiento y clasificación de los diferentes tipos de secadores se dedican algunos trabajos (Bérriz, 2002; Bérriz, 2003), en ellos el autor proporciona con precisión los datos necesarios para el diseño evaluación y selección de prototipos de secadores tanto a escala experimental como industrial. Estos equipos pueden ser utilizados en el secado solar del mineral laterítico a escala de laboratorio debido a la alta eficiencia que presentan y su fácil construcción.

De las investigaciones desarrolladas en el Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES) en la ciudad de Santiago de Cuba se puede destacar el trabajo para la implementación de un secador de granos tipo tambor (Torres et al., 2001), en este se establece una alternativa del secado solar para la disminución del tiempo de secado y la protección del producto de las condiciones climatológicas. En el CIES fue construido el secador solar de tambor rotatorio para granos del que se realiza un análisis térmico a partir de calcular los coeficientes de transferencia de calor en diferentes partes del equipo. El resultado del análisis muestra una distribución favorable de las áreas de captación y de pérdidas, por lo que es posible pronosticar un buen funcionamiento térmico en el secado de granos para las condiciones de diseño.

Otra investigación importante en este centro es la efectuada por Pereira (1992), donde se establece un modelo matemático para el desarrollo de los secadores solares con chimenea. Demuestra que constituye un sistema cerrado de ecuaciones diferenciales, no lineales de primer orden, que se pueden resolver numéricamente mediante el método de Runge-Kutta.

Griñán et al. (2003), exponen aspectos técnicos y metodológicos del secado los cuales fueron elaborados a partir de revisiones bibliográficas, observaciones y experiencias de los autores obtenidas durante reiteradas prácticas de secado en el secador solar de madera de 12m³ construido en el mencionado centro. También se presentan algunos conceptos básicos obtenidos sobre la conservación de la calidad de la madera. Se expone una metodología que permite el entendimiento y aplicación de la tecnología solar para el secado de madera y otros de características similares.

Relacionado con el secado de mineral en la industria del níquel Miranda (1996), destaca la aplicación del método de reflexión neutrónica, para determinar la humedad de las distintas

menas de los yacimientos lateríticos arrojando divergencias significativas respecto al método tradicional de diferencias de pesadas, por este motivo realizó análisis termogravimétricos, los cuales revelaron la existencias de fenómenos de descomposición de fases de minerales que no habían tenido tratamiento térmico previo. Los resultados de los análisis demostraron la efectividad del método de reflexión neutrónica sobre el método tradicional y se demostró, además, que el proceso de secado en los hornos de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” es excesivo y desvirtúa la interpretación del balance de masa entre la mina y el taller de preparación de mineral.

En Cuba se han desarrollado algunas investigaciones relacionadas con el secado solar del mineral laterítico con resultados satisfactorios. Dentro de ellas se puede destacar la realizada por Estenoz et al. (2003a), que muestra una valoración socio-económica del secado solar y de la homogenización en la explotación de minerales lateríticos en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Para ello realizan la inserción de las operaciones del secado solar y la homogenización dentro del sistema de preparación integral del mineral, agrupando por módulos las diferentes operaciones. Diseñan una forma de apilar, remover y recoger las pilas de acuerdo a las condiciones del microclima de la región. Realizan los estudios de evaluación de la viabilidad económica del secado solar en la región de Moa y la comparan con las condiciones naturales respecto a Tocantins en Brasil y Río Tuba en Filipinas, resultando que el secado solar en Moa tiene mayor potencial energético que las dos regiones antes mencionadas. Con los estudios estadísticos y modelos computarizados se analizó el tiempo de secado, el número de hileras y pilas, sus dimensiones y volúmenes, la disposición en el terreno, los horarios y frecuencia para la remoción de las capas de material seco y otros parámetros de productividad y equipamiento. Estos estudios arrojaron conclusiones alentadoras entre las cuales se destacan que la aplicación en la empresa del secado solar generaría ahorros entre 14 y 17 millones de dólares anuales y unos 10 millones por el procesamiento de mineral homogenizado a más de 90 grados y que con el secado a la intemperie del mineral en los depósitos mineros de la fábrica se puede disminuir hasta el 24% la humedad inicial del mineral.

Estenoz et al. (2003b), realizan el diseño de una instalación de secado multipropósito la misma tiene diferentes funciones y objetivos, ya que debe comprender todo los aspectos que actualmente no se garantizan en la calidad de las menas abastecidas a los procesos fabriles. La instalación diseñada tiene varios aspectos novedosos: debe mantener la sucesión y sincronización en el uso de una instalación diseñada para un sistema compuesto de almacenado, clasificación, homogeneización, secado y estabilización de los flujos mínimos necesarios de los

materiales iniciales para el abasto a la industria, de una mezcla homogénea durante un determinado período de tiempo, en el cual se permita la adecuación y ajuste de las operaciones industriales necesarias para racionalizar el aprovechamiento del material resultante y así aumentar las ganancias específicas de la producción y la reducción del impacto ambiental de la minería y la metalurgia.

Como se puede apreciar existe una amplia variedad en cuanto a las publicaciones relacionadas con el secado de materiales sólidos. En los trabajos consultados se estudian diferentes aspectos del proceso. Del análisis de estos se derivan las siguientes **conclusiones**:

- **Los aportes científicos de los diferentes autores están encaminados a establecer las leyes matemáticas que rigen la transferencia de calor y masa en el proceso de secado, a partir de correlaciones empíricas que reflejen el comportamiento físico del sistema. En todos los casos las expresiones describen el secado bajo parámetros controlados.**
- **Existen pocos trabajos dedicados al estudio experimental del secado solar de materiales a la intemperie. Los resultados obtenidos en ellos no pueden ser generalizados al mineral laterítico debido a que el mismo tiene diferentes propiedades termofísicas y la región de Moa muestra un microclima que difiere del que presentan otras regiones del mundo donde se ha experimentado el proceso.**
- **Se han realizado pocos estudios experimentales dedicados al secado solar del mineral laterítico en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, al parecer por ser un tema novedoso y por los inconvenientes asociados al proceso de experimentación en las condiciones reales en que ocurre el proceso.**

Los elementos antes expuestos exigen el desarrollo de una investigación que permita establecer las regularidades del secado solar a partir de los gráficos de comportamiento de la humedad, en correspondencia con la variación de los parámetros principales del proceso, de ahí la importancia de la presente investigación.

1.4- Fundamento teórico de la investigación

La región de Moa, situada en el nordeste de la República de Cuba, constituye desde el punto de vista económico un área de marcado interés por la presencia de uno de los mayores yacimientos de níquel del mundo, representando un elemento esencial que funciona como fuente del desarrollo socioeconómico de todo el territorio nacional (Guzmán, 2001).

Desde el inicio del proceso revolucionario hasta la actualidad, el incremento de la actividad económica ha alcanzado resultados impresionantes con el aumento de las inversiones en nuevas plantas y la modernización de otras por parte del Ministerio de la Industria Básica, lo que unido últimamente a la implementación del Perfeccionamiento Empresarial, ha ocasionado un efecto multiplicador que ha dinamizado la economía y la investigación científica como vía para obtención e implementación de nuevas tecnologías que minimicen los costos de producción y tengan en cuenta la protección del medio ambiente.

La búsqueda de una tecnología adecuada para el proceso de secado solar del mineral en la planta de preparación de mineral, permitirá el desarrollo acelerado de la empresa, dando respuesta a la misión de esta industria que es: *Incrementar y diversificar la producción de níquel y cobalto alcanzando los estándares internacionales de eficiencia metalúrgica, costos de producción y productividad (...) que permita maximizar los aportes al estado* (Quintana, 1999).

Recientemente se han realizado pruebas puntuales donde la implementación de la tecnología de secado solar en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” ha reportado importantes mejoras en los índices económicos de la entidad, pero no se han proyectado investigaciones científicas que contribuyan a la comprensión e implementación permanente de esta tecnología, lo que sin dudas mejorará considerablemente la eficiencia metalúrgica de la planta, reducirá el consumo específico de energía, combustible y el tiempo de retención de los secadores.

1.5- Clasificación de los sólidos húmedos objeto de secado

Según Lykov (1968) estos se clasifican en tres grandes grupos de acuerdo con sus propiedades físicas coloidales. Se distinguen así los **cuerpos coloidales**, los cuales al ser secados cambian apreciablemente sus dimensiones, aunque conservan sus propiedades elásticas. Es de este tipo de coloides la Gelatina.

Los **cuerpos capilaroporosos** se tornan frágiles, poco compresibles y pueden reducirse a polvo cuando son secados. Son materiales de este tipo el carbón vegetal y la arena de cuarzo.

Los **cuerpos coloidales capilaroporosos** tienen capilares y pueden absorber cualquier líquido que los moje, independientemente de su composición química. Pertenecen a esta categoría la mayoría de los materiales que se someten al secado: turba, aserrín, bagazo, cartón, cereales, café y otros.

En dependencia del tamaño de sus poros los materiales del segundo y tercer grupo pueden clasificarse en subgrupos: macrocapilaroporosos (no tienen microporos, ni poros de tamaño intermedio, su radio es mayor que 10^{-7} m) y microcapilaroporosos (no tienen macroporos, su radio es menor que 10^{-7} m). Aunque los materiales reales tienen frecuentemente una estructura

combinada, **el mineral laterítico objeto de secado se clasifica como un material macrocapilaroporoso.**

1.5.1- Formas de enlace de la humedad con el material

El mecanismo del proceso de secado depende considerablemente de la forma de enlace de la humedad con el material: cuanto más sólido es dicho enlace, tanto más difícil transcurre el secado. Durante el proceso el enlace de la humedad con el material se altera.

La clasificación más completa de las diferentes formas de ligarse la humedad con el material es la ofrecida por Kasatkin (1987) la misma está basada en los estudios de la intensidad de la energía de enlace desarrollados por Rebinder (1979). De acuerdo con ésta, existen tres tipos de humedad: de enlace químico, físico-químico y físico-mecánico. A este trabajo ofrece particular interés el último tipo de enlace.

La humedad ligada químicamente es la que se une con mayor solidez al material en determinadas proporciones y puede eliminarse sólo calentando el material hasta altas temperaturas o como resultado de una reacción química. La misma no puede ser eliminada del material por secado con regímenes de temperatura inferior a los 120°C.

Durante el secado se elimina, como regla, sólo la humedad enlazada con el material en forma físico-química y mecánica. La más fácil de eliminar resulta la enlazada mecánicamente que a su vez se subdivide en: humedad de los macrocapilares y microcapilares (capilares con el radio medio mayor y menor de 10^{-7} m respectivamente). Los macrocapilares se llenan de humedad durante el contacto directo de ésta con el material, mientras que en los microcapilares la humedad penetra tanto por contacto directo, como por la adsorción de la misma en el sólido. La humedad de los macrocapilares se elimina con facilidad no sólo por secado térmico, sino también empleando métodos mecánicos.

El enlace físico-químico une dos tipos de humedad que difieren por la solidez del enlace con el material: la humedad ligada osmóticamente y por adsorción. La primera llamada también humedad de hinchamiento, se encuentra dentro de las células del material y se retiene por las fuerzas osmóticas. La segunda se retiene sólidamente sobre la superficie y en los poros del material. La humedad de adsorción requiere para su eliminación un gas con una energía considerablemente mayor que la utilizada para eliminar la humedad de hinchamiento. La existencia de estos tipos de humedad especialmente se manifiesta en poliméricos. Fundamentalmente la humedad contenida en los sólidos no es de carácter físico-químico, y por

eso su extracción durante el proceso de secado exige un consumo de energía igual al calor de evaporación.

Con el secado solar del mineral se reduce sólo la humedad enlazada con el material de forma físico-mecánica. Esto se debe a que en el proceso no se puede eliminar completamente esta humedad en el material debido a que se trabaja con un rango de temperatura bajo que oscila entre 12 y 36 °C aproximadamente.

1.5.2- Mecanismos de secado. Transferencia de calor y masa

Un elemento fundamental en el proceso de secado es el estudio de la intensidad de la transferencia de masa. Para esto es necesario conocer los elementos más importantes de la transferencia de calor y masa que funcionan en el secado por contacto directo.

Según Madariaga (1995), el intercambio de calor y masa depende de una serie de factores que van desde condiciones internas a las externas.

Las condiciones externas están definidas por la resistencia a la transferencia de calor y masa de la capa límite del gas y en el caso que predominen, el secado no dependerá de las características del sólido, sino de las condiciones del gas y estará controlado por la transferencia de calor y masa entre el medio ambiente y la superficie del sólido, empleándose en la evaporación todo el calor que se recibe del sol, la cual se comporta como una superficie libre de agua.

Las condiciones internas están definidas por la transferencia de calor y de masa a través del sólido. En el caso que predominen, es decir que la resistencia a la transferencia de masa a través del material sea muy superior a la de la capa límite del ambiente, la difusión interna controlará el proceso y lo más importante serán las propiedades del sólido.

Independientemente del mecanismo de transmisión de calor el cual puede ser por conducción, convección, radiación o una combinación de cualquiera de estos, el calor tiene que pasar primero a la superficie exterior y desde esta al interior del sólido. Excepto el secado por electricidad de alta frecuencia, que genera el calor intercambiante, esto conduce a la circulación de calor desde el interior hasta la superficie exterior (Treybal, 1985; Perry, 1985; Menon et al., 1992).

En el secado por convección el sólido húmedo se pone en contacto con un gas caliente y el líquido de su superficie se vaporiza y difunde en el gas. En este caso el agente de secado cumple dos funciones: suministrar calor al material húmedo y transporta al vapor de agua desprendido (Kern, 1969; Isachenko et al., 1979; Boizán, 1991).

En el secado por conducción el producto a secar se encuentra en recipientes calentados o se desplaza por encima de estos. El calor también se difunde en el sólido a través de la conductividad del propio sólido. En el secado por radiación el calor se transmite por las superficies radiantes mediante ondas electromagnéticas (Perry, 1979; Incropera et al., 2003).

1.5.3- Movimiento de la humedad dentro del mineral laterítico

Cuando se produce la evaporación superficial, debe haber una migración de la humedad desde las profundidades del sólido hacia la superficie. En el mineral laterítico este desplazamiento se denomina movimiento capilar, que es cuando la humedad no límite en sólidos granulares y porosos tales como arcillas, pigmentos de pinturas y otros semejantes, se traslada a través de capilares e intersticios de los sólidos mediante un mecanismo que implica tensión superficial.

Los capilares se extienden desde pequeños receptáculos de humedad dentro del sólido hasta la superficie de secado. A medida que se desarrolla el secado, al principio la humedad se traslada por capilaridad hacia la superficie con suficiente rapidez, siendo constante el régimen de secado. Los regímenes de temperatura satisfactorios para eliminar los diferentes tipos de humedades pueden ser determinados mediante el análisis térmico diferencial del material (epígrafe 2.6).

1.6- Aspectos fundamentales sobre el secado solar natural

El secado natural aplicado al mineral laterítico hasta la actualidad se realiza a la intemperie en la mina de la empresa y en la planta de preparación de mineral. Para su total comprensión es necesario establecer los parámetros más influyentes en el secado solar.

De acuerdo con el análisis empírico teórico realizado al proceso, la experiencia acumulada por los obreros de la planta de preparación de mineral y con el estudio de los trabajos precedentes (Santos, 2005; Romero, 2006; Ramírez, 2006), se puede afirmar que la **humedad final del mineral laterítico depende fundamentalmente** de los siguientes parámetros:

- Humedad inicial del mineral
- Temperatura del medio ambiente
- Humedad relativa
- Intensidad de la radiación solar
- Velocidad del viento y dirección predominante
- Temperatura del punto de rocío
- Precipitaciones
- Masa de mineral a secar
- Propiedades físicas del mineral
- Superficie de contacto
- Superficie horizontal disponible
- Tiempo de secado

Ventajas del secado natural del mineral

- Más económico
- Reduce los gastos energéticos durante el secado térmico en los hornos rotatorios
- Mitiga la contaminación del medioambiente por emanaciones de gases

Desventajas

- Lento
- Necesidad de superficie disponible
- Dependencia del clima
- Grandes volúmenes de minerales retenidos

Características que debe cumplir el patio para el secado solar

- **Piso nivelado:** permite el secado uniforme del mineral y evita la formación de concentraciones de agua dentro del patio, durante el drenaje y escurrimiento de abundantes lluvias.
- **Drenaje:** debe ser eficiente, capaz de evacuar el agua en caso de lluvias, de lo contrario el secado será no uniforme y el mineral entrará con un elevado contenido de humedad al horno.
- **Lejanía del agua y de los árboles:** el agua cerca aumenta la humedad relativa del entorno e influye en la humedad del material, los árboles contribuyen a la conservación de la humedad del entorno y refrescan la masa de aire caliente que circula en el patio.
- **Elevación:** evita las inundaciones en caso de lluvia e impide el bloqueo del viento.

A pesar de que estas características están presentes en el patio de secado solar empleado en la mina del yacimiento perteneciente a la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, es importante establecer las características geográficas de la zona donde está ubicado el yacimiento. Esto permitirá conocer cuales son las posibilidades reales que existen para la implementación práctica del proceso estudiado.

1.7- Características geográficas del yacimiento Punta Gorda

➤ Ubicación geográfica

Está ubicado en la porción noroeste de la provincia Holguín (anexo; figura 1), comprendido dentro de los límites del Macizo Montañoso Moa–Baracoa y como límites naturales tiene: al norte el río Moa y el Océano Atlántico, al suroeste el río Yagrumaje y al oeste el arroyo Los Lirios.

➤ **Clima**

Es tropical, debido a la posición geográfica y las pantallas que forman las montañas, esta zona se caracteriza por tener un microclima, con una distribución estacional de las precipitaciones irregular determinada por una significativa disminución de las mismas dentro del período lluvioso y una tendencia general a la ocurrencia de láminas máximas al final del mismo. Presenta dos máximos uno principal en octubre-noviembre y otro secundario en mayo-junio, de igual manera, presenta dos mínimos, el principal en febrero-marzo y el secundario en julio-agosto. La cantidad de días al año con lluvias mayor que 1 mm es superior a 100 y el promedio anual de precipitaciones alcanza los 2000 mm, la evaporación es cercana a los 1600 mm. La combinación de la máxima evaporación con el mínimo de precipitaciones en el verano y el mínimo de evaporación con el máximo de precipitaciones en el invierno producen un resecaamiento intenso en el verano y un exceso de humedad en el invierno.

➤ **Temperatura**

Según el Atlas de Cuba (1978), la temperatura media anual de 27 °C; en verano fluctúa entre 30 y 32 °C, con máximas entre 34 y 36 °C y en invierno entre 14 y 26 °C con mínimas alrededor de los 12 °C .

➤ **Insolación**

Es prácticamente constante todo el año, siendo la frecuencia de días despejados en el período seco de 60 días/año y la insolación anual es mayor que 2 900 horas luz/año, la radiación global media anual es de 17 MJ/m² (suma diaria).

➤ **Humedad relativa**

La media anual para las 7:30 horas es de 85 - 90 % y para las 13:00 horas está entre 70 - 75 %.

➤ **Régimen eólico**

El sistema local de vientos refleja la ocurrencia mayoritaria de los vientos Alisios reforzados por las brisas marinas y contrarrestados por el terral. Estos vientos soplan sobre la zona oriental procedentes del NE en los meses de octubre-enero; del ENE, durante febrero- mayo; y del Este, en junio-septiembre.

La velocidad promedio de la brisa es en general de 5-15 km/h y mantiene una frecuencia de 180 días al año. Se puede afirmar que el viento reinante en la zona es la combinación Alisios-brisa marina con una frecuencia mayor que el 64 %. Generalmente el viento reinante es el de mayor

velocidad promedio anual, que en la zona es de 3,9-4,4 m/s. El total de días con calmas presenta un promedio anual de 41 días.

Las características ante expuestas indican que existen 8 meses del año donde las precipitaciones son moderadas. En este período se destacan los meses de verano donde existe una marcada disminución de las mismas, lo que conjugado con los regímenes de temperatura e insolación provoca la máxima evaporación de la humedad contenida en el aire y favorece la transferencia de calor entre el mineral y el Sol. También el proceso de intercambio de calor y masa en el secado solar se intensifica debido a la velocidad del viento que genera la transferencia de calor y masa por convección forzada entre el mineral y el aire circundante.

1.8- Conclusiones del capítulo I

- El desarrollo del marco teórico de la investigación permitió establecer los fundamentos técnicos necesarios para la comprensión y el estudio experimental del proceso, a partir de la clasificación del sólido objeto de estudio que permite predecir el comportamiento del mecanismo de secado en correspondencia con sus propiedades físicas coloidales, la características climatológicas de la región y el tipo de humedad contenida.
- El análisis de las características climatológicas históricas de la zona donde está ubicado el yacimiento indica que es teóricamente factible el desarrollo del secado solar del mineral laterítico. Pero solo la implementación práctica del proceso permitirá arrojar conclusiones definitivas al respecto.
- El secado solar del mineral laterítico es un proceso poco estudiado desde el punto de vista teórico y experimental, en la empresa solo se destacan dos trabajos para las condiciones objetivas de la región de Moa, estos abordan los aspectos tecnológicos del proceso sin considerar los fenómenos de intercambio de calor presentes en el mismo.

CAPÍTULO II

RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL SECADO SOLAR DEL MINERAL LATERÍTICO

2.1- Introducción

El estudio experimental de un proceso físico es fundamental para describir el comportamiento del mismo, máxime si se trata de los procesos de secado que muestran gran complejidad, en los cuales la descripción a partir de ecuaciones teóricas resulta extremadamente difícil.

El secado solar de materiales a la intemperie es un ejemplo de estos procesos debido a los sistemáticos cambios que experimentan las variables fundamentales que lo caracterizan, esto imposibilita predecir su comportamiento por vías analíticas puras por lo que es necesario acudir a los métodos empíricos o semi-empíricos, en tal sentido el **objetivo** del capítulo es:

Establecer los modelos matemáticos estadísticos que describen el comportamiento de la humedad del mineral laterítico durante el proceso de secado solar.

2.2- Materiales empleados en la experimentación

Los experimentos se realizaron en la Unidad Básica de Minería de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, utilizando el material transportado desde el frente de trabajo para el proceso tecnológico, el equipamiento industrial de carga, transporte y dosificación. Para lograr representatividad se escogieron muestras de distintos frentes de explotación.

En el desarrollo del trabajo se utilizaron varios instrumentos y materiales que permitieron la ejecución de los experimentos (Estufa Memmert, Desecadora, Balanza Owa Labor, Cronómetro, Tamices de 75, 50 y 25 mm). Todos formaron parte de las pruebas de humedad, adherencia, granulometría y ángulo de reposo.

Las mediciones de los parámetros climatológicos se realizaron en la estación meteorológica de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, se empleó el equipo Davis EZ-Mount Groweather. El mismo presenta un sistema de adquisición de datos, haciendo uso de la instrumentación virtual, utilizando un conjunto básico de sensores meteorológicos, el cual incluye la medición, adquisición, procesamiento y registro de datos en PC para las variables: temperatura del medio ambiente, radiación solar, velocidad y dirección del viento, precipitaciones, humedad relativa y temperatura del punto de rocío.

Técnicas de ensayos térmicos

Se emplearon muestras de dos perfiles lateríticos (L48 y M47) del yacimiento Punta Gorda y un equipamiento para los análisis térmicos diferenciales según modelo PL - STA Thermal Science con analizador térmico simultáneo STA 1000/1500, de la Stanton Rederoff Ltd, que tiene un horno cilíndrico vertical, con conversor digital acoplado a un micro computador. Crisol de platino, peso de la muestra de 12 a 14 mg, con registros normalizados para 10 mg, lo que facilita la comparación con diversos análisis. Velocidad de calentamiento de 20 °C/min, temperatura inicial y final variando de 25 °C a 1100 °C, respectivamente, con corrección de la línea de base por el software Termoplot.

2.3- Instalación experimental para el estudio de la humedad

Para el experimento 1 las pilas se formaron con minerales de los perfiles L48 y M47, se extrajeron 150 kg de mineral laterítico los cuales fueron transportados en bolsas de nylon hasta el Centro de Investigaciones del Níquel (CEINIQ) “Capitán Alberto Fernández Montes de Oca”. Posteriormente se depositó en el lugar previamente escogido y se procedió a la formación de las pilas.

Para el experimento 2 se extrajeron aproximadamente 100 toneladas de mineral laterítico las cuales fueron transportadas por 4 camiones Volvo de 25 toneladas de capacidad y depositadas en el patio de homogenización y secado solar de la mina perteneciente a la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, con la ayuda de un cargador se procedió a la formación de 6 pilas (anexo; figura 2 y 3).

En ambas pruebas se logró la orientación correcta de las pilas para garantizar el secado uniforme del mineral, para ello se tuvieron en cuenta las características del patio de secado expuestas en el epígrafe 1.6.

2.4- Diseño experimental

Selección de las variables

De acuerdo con los trabajos consultados (Estenoz et al., 1997; Salazar, 2001; Novoa et al., 1995) el secado solar del mineral laterítico depende de varios parámetros (epígrafe 1.6).

Las variables medidas de forma directa en las pilas de mineral depositado son: masa de mineral a secar, humedad inicial del mineral, granulometría, ángulo de reposo, humedad final del mineral. Las restantes se obtuvieron de acuerdo con la estación meteorológica de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Masa de mineral a secar

Para el estudio a escala de laboratorio se utilizaron dos pilas de mineral una de 100 kg y otra de 50 kg. En el experimento 2 se construyeron seis pilas de 1, 2, 4, 8, 16, y 32 toneladas. Se experimentaron con estas masas para determinar la influencia que tiene en el comportamiento de la humedad durante el proceso. Estos valores son representativos y se seleccionan de acuerdo con las normas establecidas para estos tipos de yacimientos (Mitrofánov et al., 1982).

Humedad inicial del mineral

Influye considerablemente en el tiempo de secado, oscila muy poco para el yacimiento analizado, permaneciendo generalmente entre los valores 34,4 y 39 %, por tanto se obtuvieron dos niveles iniciales (39 y 38%) para el experimento 1 (Tabla 2.1) y 6 niveles para el experimento 2 de acuerdo con las condiciones medioambientales existentes en los días de experimentación (Tabla 2.7), los valores promedios entre los niveles experimentados en ambos experimentos fueron 38.5 y 36,08 % respectivamente, las mediciones se realizaron tomando una muestra de cada pila de mineral depositado. Se empleó el método de obtención de muestras puntiformes (diminutas) con red rómbica, recomendado por Mitrofánov et al. (1982).

Granulometría

Constituye un importante factor que permite caracterizar al mineral laterítico como ya lo han definido Quintana (1985) y Almaguer et al. (1993), aspecto que incide tanto en el comportamiento del mineral durante determinados procesos, como la sedimentación de la pulpa limonítica (Falcón, 1987; Garcell, 1991), o en la concentración de determinados elementos (Rodríguez, 1990), lo que puede definir una vía para establecer las fases minerales portadoras del níquel y cobalto, entre otros metales de interés en los horizontes lateríticos (Rojas, 2001).

En el experimento 1 se midió cuando las pilas de mineral alcanzaron valores de humedad que oscilaron entre 26 y 30 %, para esto se utilizaron tamices de +75, +50 y +25 mm, esta variable muestra la disminución del tamaño de las partículas del mineral laterítico en correspondencia con la eliminación de la humedad superficial del material.

Para el experimento 2 se escogieron las pilas de 4, 16 y 32 toneladas porque en las restantes la granulometría era bastante homogénea con diámetros pequeños de las partículas, a cada una se le realizó una prueba de granulometría por el talud seco (oeste) y por el talud húmedo (este), para esto se utilizaron tres tamices de +75, +50 y +25 mm, por cada uno de estos se vertieron 3 tanquetas con 30 kilogramos de mineral cada una aproximadamente, luego se pesó lo que

retuvo cada tamiz y se determinó el por ciento que esto representaba del total de mineral depositado.

Ángulo de reposo

Al igual que la granulometría se realizaron mediciones cuando la humedad del mineral osciló entre 26 y 30 %, da una medida de la desorción de la humedad en el mineral al variar el ángulo de una pila de menor a otra de mayor dimensión.

El ángulo de reposo se determinó para cada pila (por el talud seco y el talud húmedo), se utilizó un equipo diseñado por los obreros del CEINIQ (el cual se sustenta en el teorema de Pitágoras sobre el triángulo rectángulo), este ha sido probado en otras investigaciones (Estenoz et al., 2001; Durán, 2006) y ha arrojado resultados satisfactorios en la determinación del ángulo.

Humedad final del mineral

Para analizar el comportamiento de esta variable en los días de experimentación se hicieron mediciones de humedad como se ilustra en las tablas 2.1 y 2.7 por cada pila de mineral depositado, las mediciones muestran el comportamiento del secado para las diferentes masas de mineral. En ambos casos (humedad inicial y final) se determinaron por el método de diferencia de pesadas. La técnica de muestreo fue la misma empleada para la humedad inicial.

Las variables climatológicas (temperatura del medio ambiente; T_{ma} , radiación solar; R_s , velocidad del viento; V_v y dirección predominante, precipitaciones; P , humedad relativa; H_r y temperatura del punto de rocío; T_{pr}) tienen un comportamiento aleatorio por tanto no pueden ser prefijadas para la experimentación.

Los valores de todas las variables relacionadas anteriormente (incluyendo las aleatorias), obtenidos durante el proceso de experimentación se exponen desde la tabla 2.1 a la 2.9.

Número de corridas experimentales

Para el experimento 1 se realizaron 24 mediciones para el análisis de la humedad de las dos pilas formadas, las mediciones de la adherencia se muestran en las tablas 2.2-2.5. Para el experimento 2 se experimentaron 6 niveles, cada uno con un total de 5 mediciones; lo que concluye con un total de 30 mediciones experimentales. En ambos casos se procedió según el diseño factorial completamente aleatorio o al azar, se escogió éste tipo de diseño porque es el recomendado cuando interesa saber el efecto de la combinación de los diferentes niveles de los

factores considerados, al variar aleatoriamente en muestras homogéneas (Guzmán, 1986; Guerra et al., 2003).

Estado actual de la adherencia del mineral en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”

Actualmente la adhesividad del mineral laterítico es un problema no resuelto en la referida empresa debido a que genera la recirculación del material en las bandas transportadoras con la consiguiente disminución de la productividad del sistema de transporte (Sierra, 2005) y provoca la formación de túneles en los secaderos cilíndricos que elevan el consumo de combustible durante el secado (Torres, 1999). En el año 2003 se realizó una prueba de secado solar y el mineral al ser transportado se adhería a las paredes de las tolvas. Este fenómeno no se ha podido explicar hasta el momento aunque varios investigadores se han referido al respecto (Gutiérrez, 2003; Durán, 2006).

2.5- Técnica experimental

Prueba de humedad

El proceso de medición de la humedad del mineral laterítico se realizó por el método tradicional de diferencias de pesadas. Se escogió éste por la confiabilidad que brinda en los resultados, su sencillez y fácil aplicación (Miranda, 1996).

Para determinar el contenido de humedad se toman muestras de las capas superficiales de las pilas cuatros veces al día (8:00 AM; 10:00 AM; 2:00 PM y 4:00 PM). Las muestras de alrededor de 100g, pesadas en una balanza digital (anexo; figura 4) en el momento de la toma. Posteriormente se someten al secado en una estufa (anexo; figura 5) alrededor de cinco horas a una temperatura de 105 °C, luego se enfriaran en una desecadora y se pesa la muestra seca y se procede a determinar el contenido de humedad por la expresión 2.1 reportada por Martínez-Pinillos (1997).

$$H = \frac{W_I - W_F}{W_I} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Donde:

H: contenido de humedad; % .

W_I : masa inicial de la muestra; g .

W_F : masa final de la muestra; g .

Durante el secado las pilas se removieron de un lado a otro, siempre en una misma dirección (de Este a Oeste). Se removía una capa de mineral de espesor de alrededor de 10 mm (para el experimento 1) y de 250 mm (para el experimento 2) dos o tres veces al día si las condiciones meteorológicas eran normales. Si el día estaba nublado pero sin lluvia se removía una o dos veces. En caso de lluvia no se debe remover la pila hasta que la masa mineral no haya disminuido su contenido de humedad. Las pilas de 1, 2 y 4 toneladas se removían de forma manual y las de 8, 16, 32 toneladas con la ayuda de una retroexcavadora.

Prueba de adherencia

Para ello se realizó una prueba a escala de laboratorio, que permitió obtener el comportamiento de la adherencia a diferentes niveles de humedad. La misma consistió en dejar caer una masa de mineral de una determinada altura (0,5 m) sobre una placa de metal con cierto ángulo de inclinación. Los ángulos escogidos fueron de 20 y 25° respectivamente, se tomaron estos ángulos porque son los que se corresponden con la inclinación de las paredes de las tolvas donde descargan los transportadores de banda de la planta, también se adhiere el mineral a la cama de los camiones VOLVO utilizados en el transporte del material. Por cada ángulo se realizaron tres mediciones a un mismo contenido de humedad, con una masa de 300 g aproximadamente en cada medición, se recogían por separado la parte de la muestra que se adhería y la que no lo hacía, luego se pesaban cada una para determinar el por ciento que se adhería por cada muestra.

2.6- Resultados experimentales

A continuación se exponen los resultados obtenidos en los Análisis Térmicos Diferenciales (ATD) y en las pruebas de humedad, adherencia, granulometría y el ángulo de reposo para las diferentes condiciones de experimentación.

2.6.1- Análisis térmicos diferenciales realizados al mineral laterítico

Para comprobar en que medida puede ser evaporada la humedad en el mineral se realizaron las técnicas de ensayos térmicos para ello se emplearon muestras de dos perfiles lateríticos (L-48 y M-47) del yacimiento Punta Gorda, con niveles evolutivos diferentes (anexo; figura 6), teniendo en cuenta la potencia de los horizontes lateríticos y la intensidad de la meteorización en ellos observadas. De modo que el L-48 es un típico perfil maduro, en tanto el M-47, es representativo de un perfil laterítico inmaduro o menos maduro (Vera, 2001). Ambos representativos de los principales horizontes que componen la corteza de intemperismo del yacimiento según: Concreciones ferruginosas (escombro); Ocreas (se encuentra la mena

niquelífera); Serpentinitas alteradas (serpentinita niquelífera, saprolita) y Serpentinitas duras (roca madre), de acuerdo con lo planteado por Rojas (2005).

Los termogramas de las muestras de los horizontes superiores (Figura 2.1), exponen tres picos endotérmicos notables: uno alrededor de los 65°C, producto de la pérdida del agua no estructural, lo que evidencia una humedad elevada para estas muestras. Otro entre los 290 y 350 °C, atribuible a la deshidroxilación de la goethita, como fase mineralógica predominante (Rojas, 2001), que dependiendo de la cristalinidad que presente, así será el intervalo de temperatura al que se produzca el pico endotérmico, donde a mayor cristalinidad provocará una mayor temperatura de ocurrencia del pico endotérmico. Finalmente otro pico endotérmico, entre los 470 y 500 °C, que se hace significativo en la muestra MN3, rica en manganeso, lo que permite atribuírselo al proceso de oxidación de la fase de Mn (Voskresenskaya et al., 1986).

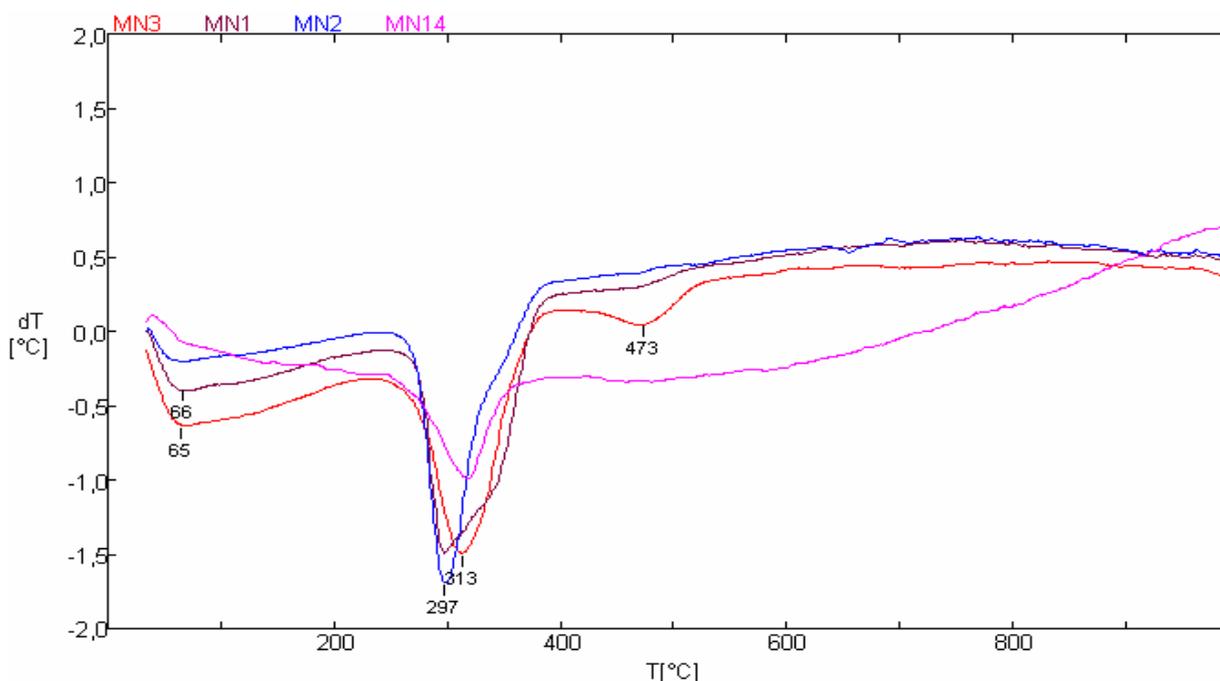


Figura 2.1. Termogramas de muestras de los horizontes superiores del perfil L-48.

Muestras:

MN1: horizonte de concreciones ferruginosas, MN2: horizonte de ocre superior, MN3: horizonte de ocre medio y MN14: horizonte de ocre inferior.

El comportamiento térmico de las muestras del perfil M-47 (Figura 2.2), exponen dos picos endotérmicos acentuados, propios de los óxidos de Fe, fundamentalmente goethita y otro de

poca intensidad, que en las muestras MN7 y MN8 son un tanto más significativo, atribuible a la oxidación de la fase de manganeso.

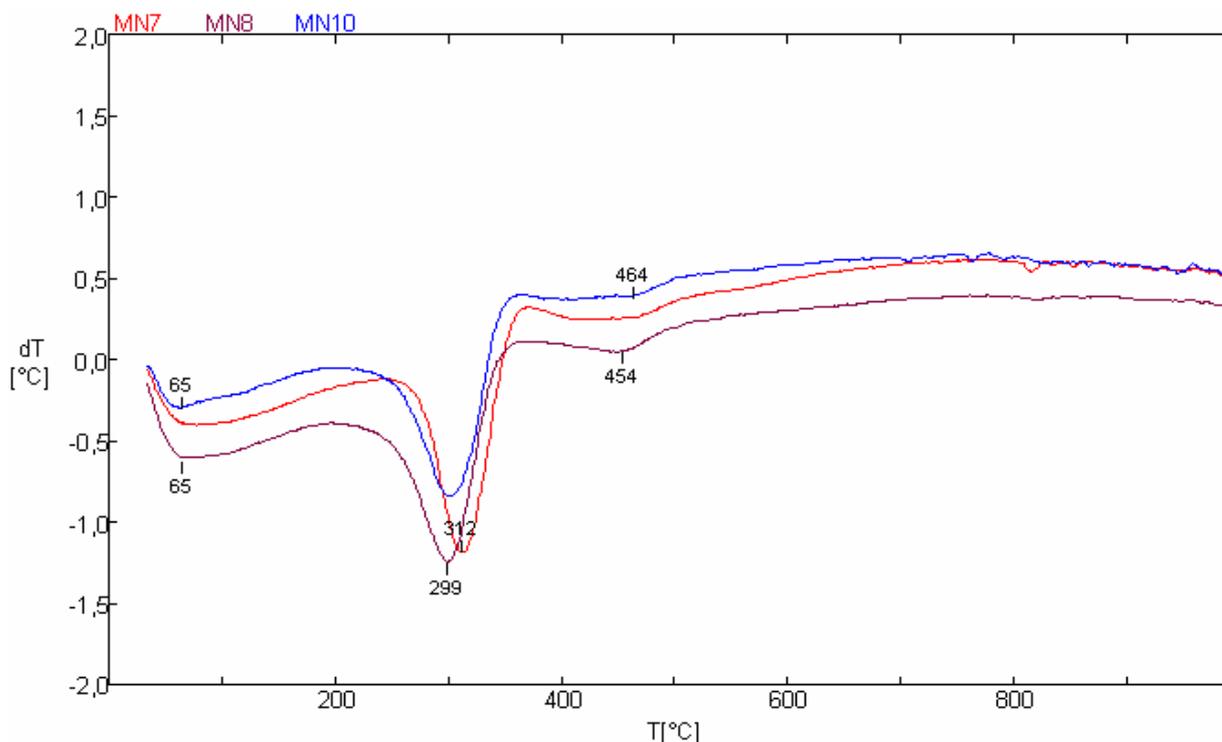


Figura 2.2. Termogramas de muestras de los horizontes superiores del perfil M-47.

Muestras:

MN7: horizonte de ocre superior, MN8: horizonte de ocre superior, MN10: horizonte de ocre inferior.

El comportamiento térmico de las muestras representadas en la figura 2.3 exponen los picos endotérmicos a 69 °C y próximo a 300 °C ya conocidos, atribuibles a los procesos de pérdida de agua no estructural, para el primero y la deshidroxilación de la fase de goethita, para el segundo. La muestra MN5, de una serpentinita alterada, expone el endotérmico próximo a los 300 °C, al presentar cierta cantidad de goethita. Además, se observa otro endotérmico próximo a los 650 °C atribuible a la deshidroxilación de la lizardita. La presencia del piroxeno enstatita explica la presencia del pico endotérmico a los 720 °C y el exotérmico por la recristalización del mineral refractario entre los 820 y 830 °C. Resultados que se corresponden con los obtenidos por Miranda (1996).

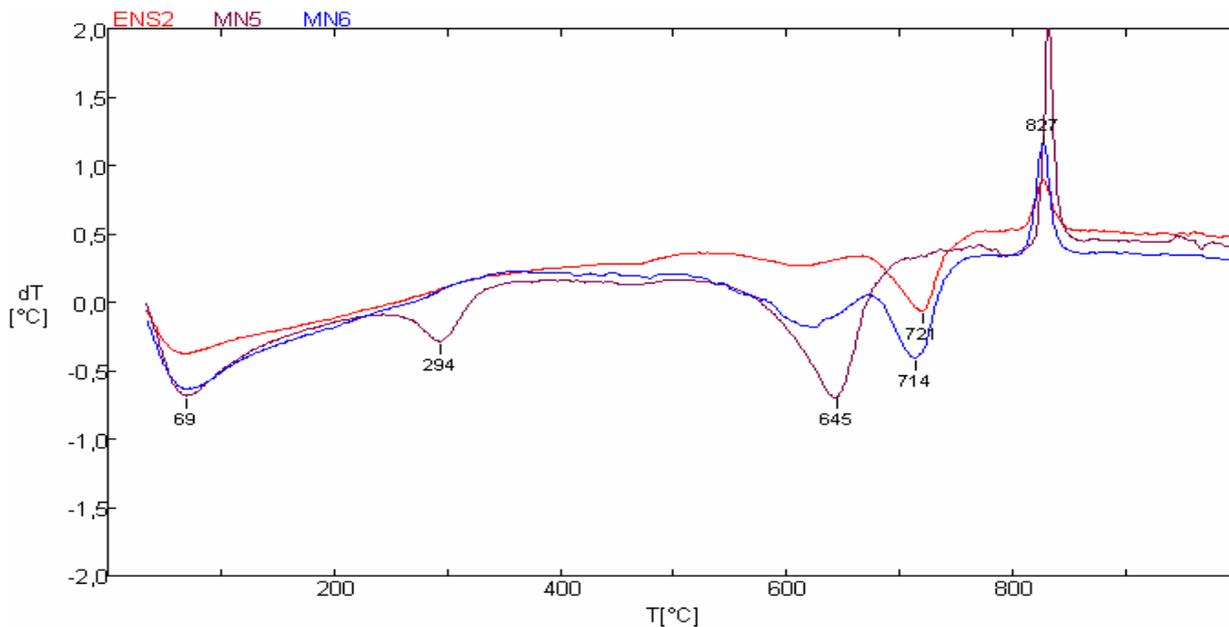


Figura 2.3. Termogramas de muestras de los horizontes inferiores del perfil L-48.

Muestras:

MN4 (ENS2): horizonte de ocre inferior, MN5: horizonte de serpentinitas alteradas y MN6: horizonte de serpentinitas no alteradas.

De modo que para las muestras enriquecidas en manganeso, se destaca la presencia de la goethita como fase mineral predominante, en paragénesis con gibsita, pero esta fase se encuentra sólo en buena cantidad en el perfil mejor desarrollado (L- 48), no así en el otro que es incompleto o menos maduro (M-47). Los resultados se corresponden con la composición química de los perfiles (anexo; Tablas 1 y 2), donde el L-48 posee contenidos más elevados de alúmina que el M-47. Por otra parte, la litioforita es el óxido de Mn más frecuentemente detectado en las muestras enriquecidas en manganeso, con una baja cristalinidad, dado su cuadro difractométrico incompleto y los picos endotérmicos de la oxidación de dicha fase a temperaturas más baja que las reportadas para estos minerales, acorde con los resultados obtenidos por Voskresenskaya et al. (1986), en yacimientos cubanos parecidos.

Los termogramas de las muestras pertenecientes a los horizontes inferiores del perfil M-47, de la zona silicatada, son muy parecidos a los que expone la muestra MN11 (Figura 2.4), que presenta un fuerte pico endotérmico próximo a los 65 °C, por la pérdida del agua no estructural, otro endotérmico intenso cerca de los 650 °C debido a la deshidroxilación de la fase de serpentina y posteriormente la recristalización del piroxeno enstatita a los 828 °C .

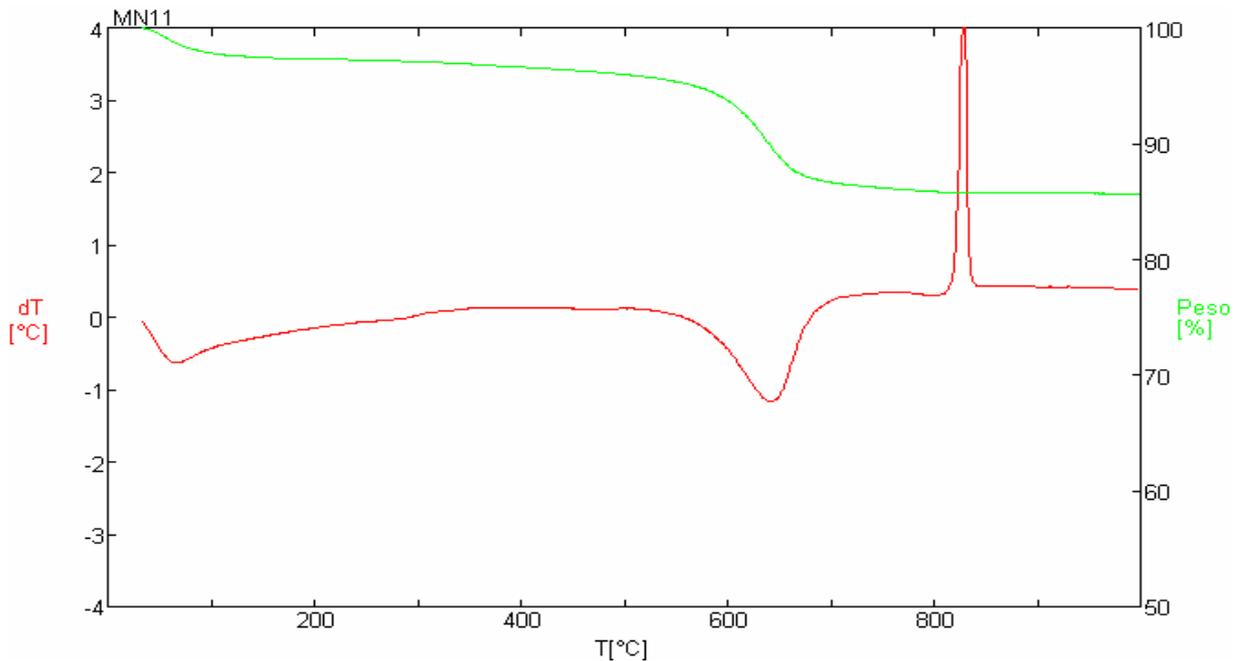


Figura 2.4. Termograma de la muestra MN11 del horizonte inferior del perfil M-47.

Los termogramas de las muestras enriquecidas en manganeso exponen tres picos endotérmicos, uno entre los 60 y 70 °C, debido a la pérdida del agua no estructural que posee la muestra, luego un intenso pico endotérmico, en el intervalo de 300 a 315°C, el más significativo, producto del proceso de deshidroxilación de la fase mineral predominante, la goethita, y un pico endotérmico medianamente intenso que puede ser atribuible a la presencia de las fases de óxidos de manganeso, que dada la baja cristalinidad que presenta esta fase ocurre próximo a los 500 °C, pero siempre por debajo de esa temperatura.

En general para todas las muestras estudiadas se comprueba que con regímenes bajo de temperatura (0 a 70°C) solo se puede extraer el agua no estructural, también denominada humedad ligada mecánicamente, resultados similares a los reportados por otros investigadores (Rebinder, 1979; Kasatkin, 1987). Para la extracción del agua estructural se requiere de regímenes de temperatura superiores a los 120 °C.

2.6.2- Resultados del experimento 1

El estudio experimental que se expone seguidamente se basó esencialmente en el análisis de la humedad y la adherencia del mineral durante el proceso de secado solar, para ello se tuvo en cuenta la influencia de las variables seleccionadas en el epígrafe 2.4.

Las tablas que a continuación se relacionan (2.1, 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5) muestran los resultados experimentales obtenidos del proceso. En las mismas se exponen los valores para el experimento 1 según los niveles de las variables prefijados en el diseño experimental.

Determinación de la humedad durante el secado solar

En la tabla 2.1 se muestran los valores de humedad para ambas pilas en correspondencia con la variación de los diferentes parámetros climatológicos más influyentes en el proceso. Los mismos fueron obtenidos en la estación meteorológica de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Tabla 2.1. Comportamiento de la humedad en correspondencia con la variación de los parámetros climatológicos.

Exp.1	Días	Hora	Humedad del Mineral (%)	T _{ma} (°C)	R _s (W/m ²)	V _v (m/s)	Dir. Viento	P (mm)	H _r (%)	T _{pr} (°C)
Pila 1	1	8:00 AM	39	25,7	143	1,3	WSW	0	85	22,9
	1	10:00 AM	38	28,8	591	2,2	WSW	0	72	23,2
	1	2:00 PM	36	31,7	967	2,2	NNW	0	69	25,3
	1	4:00 PM	35	32,4	536	1,3	N	0	67	25,5
	2	8:00 AM	37	28,1	70,0	1,8	SSE	0	75	23,3
	2	10:00 AM	34	30	529	2,7	ENE	0	69	23,7
	2	2:00 PM	31	31,4	244	3,1	ENE	0	74	26,3
	2	4:00 PM	29	30,9	145	2,7	ESE	0	71	25,0
	3	8:00 AM	40	24,8	174	0,4	E	12,5	77	22,6
	3	10:00 AM	38	28,1	605	1,3	E	0	71	22,4
	3	2:00 PM	33	31,6	980	2,2	NE	0	61	23,1
	3	4:00 PM	30	32,4	648	2,2	ENE	0	59	23,3
	4	8:00 AM	32	27,6	158	0,0	SSE	0	69	21,4
	4	10:00 AM	30	30,4	602	2,7	ENE	0	64	22,8
	5	8:00 AM	28	28,1	164	0,1	SE	0	66	21,1
5	2:00 PM	26	33,8	695	3,1	E	0	62	25,6	
Pila 2	1	8:00 AM	38	27,9	152	0,0	WSW	0	75	23,1
	1	10:00 AM	36	30,2	596	1,3	NNE	0	68	23,7
	1	2:00 PM	34	32,9	556	1,8	ENE	0	62	24,7
	2	8:00 AM	34	28,7	168	0,9	S	0	72	23,1
	2	10:00 AM	30	31,3	586	2,2	ENE	0	67	24,5
	2	2:00 PM	28	33,9	919	2,7	ENE	0	65	26,4
	3	8:00 AM	30	30,1	149	1,3	SE	0	72	24,4
	3	11:00 AM	25	32,3	775	3,6	ENE	0	70	26,1

En la tabla 2.1 se observa que la humedad del mineral depende considerablemente del comportamiento de los distintos parámetros climatológicos. Como se puede apreciar a medida que aumenta la temperatura del medio ambiente se acelera el proceso de secado del mineral, con la disminución de la humedad relativa y un incremento de la radiación solar y de la

velocidad del viento respectivamente el proceso de evacuación de la humedad alcanza valores elevados.

Se observa además en la tabla 2.1 que existen horarios donde la velocidad de secado aumenta y en otros disminuye. El horario donde la evaporación de la humedad se intensifica es el comprendido entre las 10:00 AM y las 2:00 PM. Esto se debe a que a la salida del sol la temperatura de la tierra comienza a elevarse y como consecuencia de ello se almacena cierta cantidad de calor en las capas superficiales de ésta. Después del mediodía la tierra comienza a ceder calor por convección a la atmósfera y es cuando el aire alcanza su máximo valor de temperatura y velocidad, que va variando con el tiempo en función de la hora solar.

Debido al rechazo de calor almacenado durante el día, en la noche existe un continuo descenso de la temperatura de la tierra y del aire que está en contacto con ella, resultado de la transferencia de calor por convección que entre ellos existe. Cuando el aire sufre un enfriamiento comienza la condensación del vapor de agua contenido en él y con ello la formación del rocío (Fernández, 1994), fenómeno que incrementa la humedad superficial del mineral, es por ello que en horas de la mañana el mineral tiene un contenido de humedad similar o mayor respecto a la última medición realizada el día anterior.

En la tabla ante mencionada se refleja que la disminución de la humedad no es un fenómeno ajeno a la velocidad del viento ya que mientras más intensa y constante sea, mayor capacidad tendrá de arrastrar la masa de vapores de agua que se encuentran alrededor y en la superficie de la pila. Por otra parte el factor que más influye en el aumento de la humedad del mineral es la ocurrencia de lluvias.

Determinación de la adherencia

Por adherencia se entiende la capacidad que tiene el mineral de adherirse a las superficies de los cuerpos en que son trasladados. Es un comportamiento indeseable en el transporte del mineral laterítico, que afecta la productividad del proceso. El mismo se presenta cuando las fuerzas de cohesión entre las partículas de la capa superficial del mineral y la superficie del medio de transporte o almacenamiento son superiores a las fuerzas de cohesión entre las partículas. Fundamentalmente la adherencia depende de las características del mineral (si es más o menos arcilloso) y de su contenido de humedad (Oriol et al., 1988).

A continuación se relacionan los diferentes valores de adherencia, para los ángulos 20 y 25°, a distintos valores de humedad. La tabla 2.2 fue confeccionada con los experimentos realizados en la pila 1.

Tabla 2.2. Comportamiento de la adherencia respecto a la variación de la humedad (pila 1).

Humedad (%)	Angulo de 20°						Angulo de 25°					
	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3		Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	MA	MNA	MA	MNA	MA	MNA	MA	MNA	MA	MNA	MA	MNA
39	95	153	117	161	120	220	88	193	83	170	72	153
38	92	194	98	215	84	180	81	210	79	225	93	254
37	100	197	97	177	112	242	89	205	93	204	138	195
36	86	189	95	215	104	223	97	184	83	201	79	208
35	73	221	63	245	89	214	82	223	66	253	78	228
34	100	167	77	161	169	81	62	181	100	157	74	172
32	81	195	88	107	95	193	38	161	31	167	27	171
29	91	115	128	72	133	89	46	148	96	170	92	141
28	83	101	89	198	98	179	30	150	29	124	24	150
26	59	119	79	130	49	102	39	179	49	198	29	123

Donde: MA; mineral adherido y MNA; mineral no adherido.

Para obtener el comportamiento de la adherencia para cada valor de humedad se hizo necesario determinar el promedio de mineral que se adhería por ángulo en cada valor de humedad. Para ello se sumaron todos los valores de MA correspondientes a un mismo valor de humedad y un mismo ángulo y se dividió por la suma (MA+MNA) correspondientes a el mismo valor de humedad e inclinación.

La tabla 2.3 refleja la cantidad de mineral que se adhiere por cada valor de humedad para diferentes ángulos.

Tabla 2.3. Cantidad de material que se adhiere para 20 y 25° de inclinación (pila 1).

Humedad (%)	Mineral que se adhiere (%) Inclinación 20°	Mineral que se adhiere (%) Inclinación 25°
39	38,3	32,0
38	31,7	26,8
37	33,4	34,6
36	31,2	30,3
35	24,8	24,3
34	45,8	31,6

Continuación de la tabla 2.3.

Humedad (%)	Mineral que se adhiere (%) Inclinación 20°	Mineral que se adhiere (%) Inclinación 25°
32	34,7	16,13
29	56,0	33,7
28	36,0	16,3
26	34,7	18,9

Después de realizar los experimentos en la pila 1, se pudo notar que los valores de adherencia, como se observa en la tabla 2.3 no presentan uniformidad de una humedad a otra, sino que tienen un comportamiento aleatorio que no se corresponde con la realidad física del proceso en la planta de preparación de mineral. Para lograr más representatividad de los resultados se tamizaron las muestras en aras de lograr una granulometría homogénea, la decisión estuvo fundamentada por la presencia de terrones de mineral que al caer sobre la placa de metal rodaban y no se adherían debido a la gran energía potencial y cinética que tenían independientemente de su humedad y la inclinación de la placa metálica.

La experimentación en la pila 2 se realizó con muestras tamizadas en un tamiz de 6,2 mm, en busca de una granulometría homogénea para realizar el experimento. Los valores obtenidos para la pila 2 se relacionan en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Comportamiento de la adherencia respecto a la variación de la humedad (pila 2).

Humedad (%)	Angulo de 20°						Angulo de 25°					
	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3		Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	MA	MNA	MA	MNA	MA	MNA	MA	MNA	MA	MNA	MA	MNA
38	191	15	202	23	198	16	137	62	158	65	140	58
36	150	27	145	16	178	32	105	35	104	37	98	45
34	160	26	173	24	186	28	124	34	147	38	156	48
33	148	29	154	24	160	26	132	68	130	81	140	83
30	216	39	208	30	206	39	159	81	151	73	164	87
29	169	46	135	33	158	45	152	71	146	100	160	98
27	198	58	214	43	206	48	64	126	36	164	32	158
25	179	38	128	29	123	29	59	117	79	130	49	102

A este experimento se realizaron cálculos análogos al de la pila 1, para obtener la cantidad de mineral que se adhiere por cada valor de inclinación del metal, los resultados se reflejan en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Material que se adhiere para 20 y 25° de inclinación (pila 2).

Humedad (%)	Mineral que se adhiere (%) Inclinación 20°	Mineral que se adhiere (%) Inclinación 25°
38	91,0	70,1
36	86,30	72,4
34	86,90	78,0
33	85,39	63,4
30	85,36	66,2
29	78,80	62,9
27	80,50	22,7
25	81,70	34,8

Como se puede apreciar en la tabla 2.5 los resultados tienen mayor correspondencia, variando en la mayoría de las ocasiones en rangos admisibles. La tabla 2.5 muestra el comportamiento de la adherencia del mineral respecto a la variación del contenido de humedad, el cual se detallará con mayor claridad en el capítulo III con los gráficos correspondientes.

Determinación de la composición química

El análisis químico se realizó al mineral empleado en el experimento 1 para determinar la influencia de la composición química en la adherencia del material, se aplicó el método de Absorción atómica, los resultados se muestran en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Resultados del análisis químico para el experimento 1.

MÉTODO DE ABSORCIÓN ATÓMICA				
Pila 1	Ni	Co	Fe	Mg
MNA	1,69	0,099	42,2	1,56
MA	1,70	0,099	41,5	1,99
Pila 2				
MNA	1,43	0,099	42,7	1,34
MA	1,43	0,095	43,0	1,19

2.6.3- Resultados del experimento 2

Los resultados experimentales que se exponen a continuación (Tablas 2.7, 2.8 y 2.9) corresponden al análisis de la humedad, granulometría y ángulo de reposo para las diferentes masas de mineral durante el secado solar, para ello se tuvo en cuenta la influencia de las variables seleccionadas y los niveles prefijados en el diseño experimental (epígrafe 2.4).

Prueba de humedad

Tabla 2.7. Mediciones de la humedad para las diferentes pilas en correspondencia con la variación de los parámetros climatológicos.

Año 2006	Humedad de las Pilas (%)						Ta (°C)	Rs (W/m ²)	Vv (m/s)	P (mm)	Hr (%)	Pr (°C)
	Med.	1t	2t	4t	8t	16t						
16/05	37,30	37,20	34,80	34,40	36,20	36,60	30,8	145	3,05	0	66	23,8
24/05	30,86	31,78	32,62	32,86	34,92	35,45	29,6	648	3,33	0	71	23,6
30/05	26,36	26,42	26,46	27,86	29,40	30,24	30,0	605	2,77	0	68	23,3
03/06	25,43	25,92	26,10	26,92	28,10	29,96	30,1	980	2,5	0	65	22,7
08/06	32,12	32,46	34,30	34,64	34,78	36,30	28,4	174	4,72	70	73	22,9

Prueba de granulometría

En la tabla 2.8 se puede apreciar los resultados obtenidos de la prueba de granulometría, a medida que disminuye la masa a secar, la humedad contenida en el mineral disminuye más rápidamente, por tanto la cantidad de granos retenidos en cada tamiz disminuye llegando a existir un desmenuzamiento de todos los de +75mm, esto se debe a que las partículas de agua que lo mantenían adherido fueron evaporadas para un 26,10 % de humedad (el día en que se realizaron las mediciones) no ocurriendo así en la pilas de más de 4 toneladas donde prevalecen por el contenido de humedad presente las mismas. Se procedió para el análisis granulométrico según la norma GOST 3584-53, expuesta en Mitrofánov et al. (1982).

Tabla 2.8. Mediciones de la granulometría para diferentes masas de mineral secado.

Pilas	4 toneladas		16 toneladas		32 toneladas	
	Material retenido para los diferentes tamices (+) (%)					
Talud	Oeste	Este	Oeste	Este	Oeste	Este
+75 mm	0	0	11,72	14,54	13,13	18,36

Continuación de la tabla 2.8.

Talud	Oeste	Este	Oeste	Este	Oeste	Este
+50 mm	2,23	4,82	4,08	5,92	5,05	6,81
+25 mm	5,22	7,89	7,58	10,20	10,45	11,61
	Material no retenidos para los diferentes tamices (-) (%)					
-75 mm	100	100	88,27	85,45	86,86	81,63
-50 mm	97,76	94,07	83,44	78,63	81,81	77,55
-25 mm	92,53	86,16	75,86	68,18	70,20	67,34

Ángulo de reposo

Al aumentar la humedad contenida en el mineral disminuye la movilidad entre las partículas que lo componen, por tanto a medida que se incrementa la masa de trabajo, la humedad contenida en el mineral decrece muy lentamente, en estas circunstancias el ángulo de reposo toma los valores mostrados en la tabla 2.9.

Tabla 2.9. Mediciones del ángulo de reposo.

Pilas	1 t		2 t		4 t		8 t		16 t		32 t	
	O	E	O	E	O	E	O	E	O	E	O	E
Ángulo	35,7	36,6	38,4	38,8	39,3	40,5	42,1	42,8	43,5	44,1	44,4	45

2.7- Método para el procesamiento estadístico de los datos experimentales

El diseño estadístico de experimentos contempla una amplia variedad de estrategias experimentales que son eficaces para generar la información que se desea. Estos experimentos deben ser diseñados de acuerdo a la circunstancias y los objetivos de la investigación que se realiza (Guerra et al., 2003)

Una vez definidas las variables y realizados los experimentos, se procede al análisis estadístico de los resultados según el procedimiento expuesto por Miler et al. (2005).

La ecuación de regresión resultante tiene la forma general siguiente:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n \quad (2.2)$$

Donde:

Y: variable dependiente.

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$: coeficientes de regresión.

x_1, x_2, \dots, x_n : variables del proceso estudiado.

2.7.1- Resultados del análisis estadístico

El procesamiento estadístico se realizó con el empleo de los software Microsoft Excel 2003 y STARGRAPHICS Plus 5.1. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 2.10 – 2.14.

Tabla 2.10. Estadística del análisis de regresión (experimento 1 y 2).

Estadísticas de la regresión	Experimento 1		Experimento 2
	Pila 1	Pila 2	Para las 6 Pilas
Coefficiente de correlación múltiple	0,899501743	0,98239347	0,996022358
Coefficiente de determinación R^2	0,809103386	0,96509694	0,992060538
R^2 ajustado	0,681838977	0,87783928	0,986767563
Error típico	2,410755349	1,52278436	0,180009975
Observaciones	16	8	6

Tabla 2.11. Resultados del análisis de varianza (experimento 1).

ANÁLISIS DE VARIANZA					
Pila 1	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad
Regresión	6	221,694328	36,9490546	6,35765641	0,00739329
Residuos	9	52,3056722	5,81174135		
Total	15	274			
Pila 2	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad
Regresión	5	128,237256	25,6474511	11,0603125	0,08498683
Residuos	2	4,63774439	2,31887219		
Total	7	132,875			

Tabla 2.12. Coeficientes de regresión para el modelo matemático (experimento 1).

Pila 1	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	62,172	103,180	0,603	0,562	-171,238	295,583
T_{ma} (°C)	-2,982	4,468	-0,667	0,521	-13,088	7,124
R_s (W/m ²)	0,011	0,003	3,719	0,005	0,004	0,017
V_v (m/s)	-0,832	1,010	-0,823	0,432	-3,117	1,454
P (mm)	-0,289	0,808	-0,358	0,728	-2,118	1,539
H_r (%)	-0,057	1,084	-0,052	0,960	-2,510	2,397
T_{pr} (°C)	2,575	4,516	0,570	0,582	-7,640	12,791
Pila 2	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	-128,443	427,398	-0,301	0,792	-	1710,504
T_{ma} (°C)	10,308	20,136	0,512	0,660	-76,330	96,946
R_s (W/m ²)	0,012	0,008	1,376	0,303	-0,024	0,047
V_v (m/s)	-3,540	1,417	-2,498	0,130	-9,638	2,558
H_r (%)	2,497	5,198	0,480	0,678	-19,869	24,863
T_{pr} (°C)	-13,462	22,812	-0,590	0,615	-111,615	84,691

Modelos matemáticos estadísticos para el experimento 1
Pila 1 (100 kg)

$$H_{Final} = 62,172 - 2,982 \cdot T_{ma} + 0,011 \cdot R_s - 0,832 \cdot V_v - 0,289 \cdot P - 0,057 \cdot H_r + 2,575 \cdot T_{pr} \quad (2.3)$$

Pila 2 (50 kg)

$$H_{Final} = -128,443 + 10,308 \cdot T_{ma} + 0,012 \cdot R_s - 3,540 \cdot V_v + 2,497 \cdot H_r - 13,462 \cdot T_{pr} \quad (2.4)$$

Donde:

 H_{Final} : humedad final del mineral; % .

 P : precipitaciones; mm .

 T_{ma} : temperatura del medio ambiente; °C .

 H_r : humedad relativa; % .

 R_s : radiación solar; W/m² .

 T_{pr} : temperatura del punto de rocío; °C .

 V_v : velocidad del viento; m/s .

Para el procesamiento estadístico del experimento 2 se procedió de forma análoga. La regresión lineal múltiple en este caso se realizó considerando las variaciones de las masas de mineral a secar y la humedad del material al comenzar el proceso (humedad inicial), los resultados se exponen en las tablas 2.13 y 2.14.

Tabla 2.13. Resultados del análisis de varianza (experimento 2).

ANÁLISIS DE VARIANZA					
Para las 6 pilas	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad
Regresión	2	12,1467892	6,07339461	187,429676	0,00070744
Residuos	3	0,09721077	0,03240359		
Total	5	12,244			

Tabla 2.14. Coeficientes de regresión para el modelo matemático (experimento 2).

Para las 6 pilas	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	54,900	2,375	23,116	0,0002	47,341	62,458
$M_{\text{mineral}} \text{ (t)}$	0,118	0,007	17,393	0,0004	0,097	0,140
$H_{\text{inicial}} \text{ (%}^2\text{)}$	-0,611	0,066	-9,276	0,0027	-0,820	-0,401

Modelo matemático estadístico para el experimento 2

$$H_{\text{Final}} = 54,900 + 0,118 \cdot M_{\text{mineral}} - 0,611 \cdot H_{\text{inicial}} \quad (2.5)$$

Donde:

M_{mineral} : masa de mineral sometida al proceso de secado; t .

H_{inicial} : humedad inicial del mineral; % .

2.8- Conclusiones del capítulo II

- Los resultados obtenidos reflejan una reducción del contenido de humedad en un 13% para las pilas de 100 y 50kg. En el experimento 2 la humedad se redujo en 11,87 y 6,64% para las pilas de 1 y 32 toneladas respectivamente.
- Los valores obtenidos en el estudio de la adherencia indican que la misma tiene un comportamiento aleatorio respecto al contenido de humedad y está determinada por la granulometría del mineral, la velocidad y la altura a la que sea descargado.



- Se comprobó que la granulometría y el ángulo de reposo varían proporcionalmente con la humedad del mineral, determinándose mayores dimensiones de las partículas y ángulo de reposo para los valores más elevados de contenido de humedad.
- Quedaron establecidos los modelos matemáticos mediante el análisis de regresión lineal múltiple, los mismos están representados por las ecuaciones 2.3 y 2.4 para las pilas 1 y 2 del experimento 1 y por la expresión 2.5 para el experimento 2. En todos los casos el coeficiente de determinación es superior al 80% .

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS. VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO AMBIENTAL

3.1- Introducción

El uso y explotación de la energía solar, eólica y otras fuentes naturales cobra particular relevancia en el mundo actual, por cuanto son fuentes de energía limpias que permiten disminuir el impacto ambiental de las tradicionales.

El desarrollo de la industria minero metalúrgica en la región de Moa, es una muestra de todo lo agresiva que puede ser la actividad humana sobre el medio ambiente. Sin embargo, **industria y ecología no son incompatibles**, se pueden compaginar y coexistir. La interacción empresa y medio ambiente ha de ser beneficiosa y llegar a formar parte del entorno físico, económico, social y humano de la región. Es por ello que se requiere de la realización de investigaciones que estén verdaderamente comprometidas con la situación económica y medioambiental de la sociedad; en tal sentido **el objetivo** del presente capítulo es:

Analizar los resultados experimentales expuestos en el capítulo precedente, considerando el impacto económico y medioambiental asociado al secado solar del mineral laterítico.

3.2- Análisis de los resultados

En este epígrafe se analizan los resultados obtenidos en los experimentos 1 y 2 durante el proceso de secado solar, a partir del análisis químico del mineral y los gráficos de comportamiento de la humedad, adherencia, granulometría y el ángulo de reposo en función de las variaciones experimentadas por las diferentes variables involucradas en el proceso.

3.2.1- Análisis químicos

Se analizaron por separado las muestras que se adhirieron y las que no lo hicieron para cada pila (Tabla 2.6). Los resultados demuestran que el fenómeno de la adherencia no depende esencialmente de la composición química, debido a que la misma está bastante equilibrada y aunque para la pila 1 el porcentaje de hierro de las muestras que se adhieren es menor que en las que no se adhieren, en la pila 2 ocurre lo contrario. Así se analizan cada uno de los elementos químicos observándose comportamientos similares y variaciones poco significativas en las dos pilas.

3.2.2- Comportamiento de la adherencia

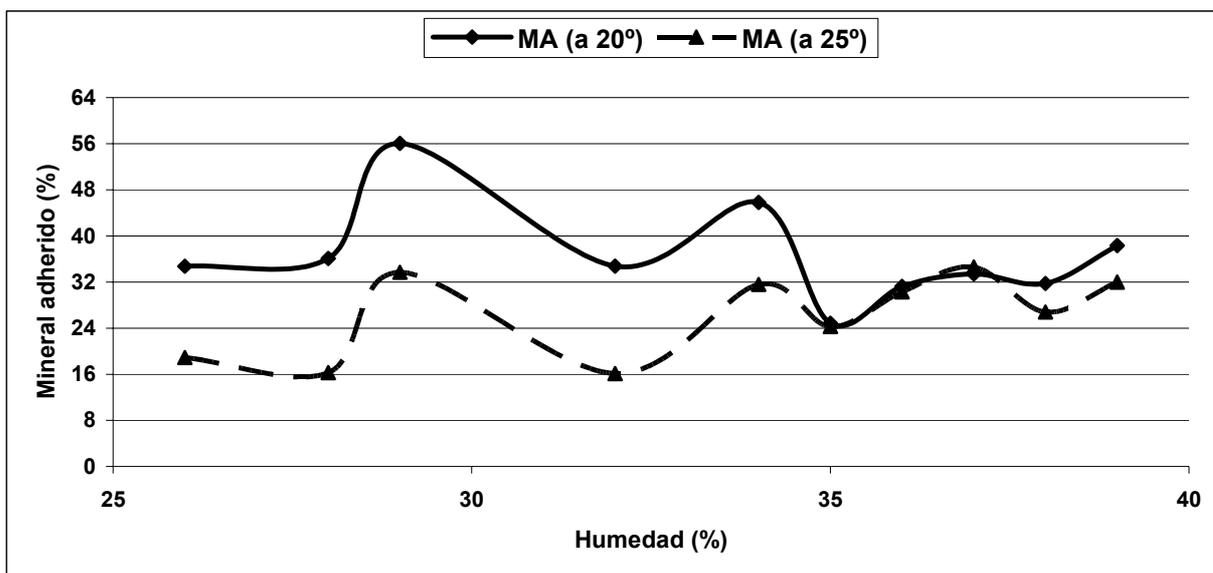


Figura 3.1. Comportamiento de la adherencia respecto a la humedad para el experimento 1 (pila 1).

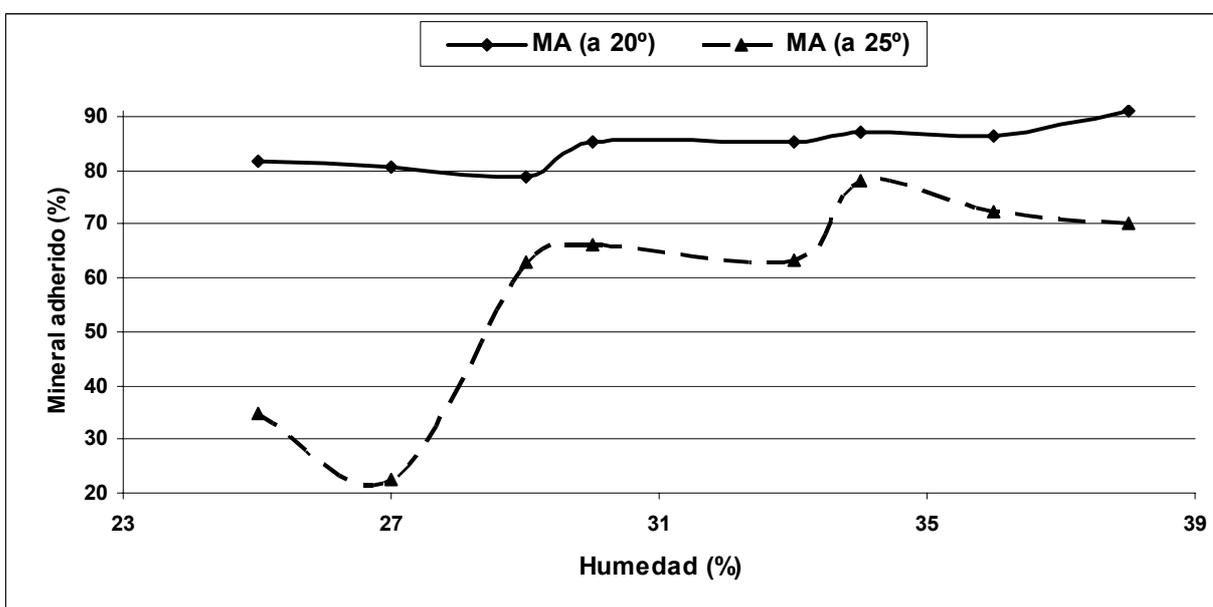


Figura 3.2. Comportamiento de la adherencia respecto a la humedad para el experimento 1 (pila 2).

En las figuras 3.1 y 3.2 se obtienen varios puntos de humedad donde el mineral tiende a aumentar o disminuir su valor de adherencia. Para determinar los rangos extremos de

adherencia se estudiaron los puntos comunes en las figuras antes mencionadas (3.1 y 3.2), donde tienen lugar los valores extremos de este parámetro. Según los gráficos del experimento existen dos puntos que predominan en las figuras los cuales vienen dados por los valores 29 y 34% de humedad. A esas humedades es donde se obtienen los valores máximos de adherencia para las pilas 1 y 2. Lo anterior sugiere secar el material hasta una humedad diferente de estos valores. La adherencia mínima se obtiene alrededor del 27% de humedad.

3.2.3- Comportamiento de la humedad del mineral respecto a los parámetros climatológicos más influyentes en el proceso

A continuación se realiza una evaluación de la influencia de los principales parámetros que influyen en el secado solar del mineral laterítico en la región de Moa. Para ello se grafica la humedad superficial contra los parámetros climatológicos, los valores fueron tomados de la tabla 2.1. Los parámetros que se analizaron son: temperatura del medio ambiente, precipitaciones, velocidad del viento y temperatura del punto de rocío.

Temperatura del medio ambiente

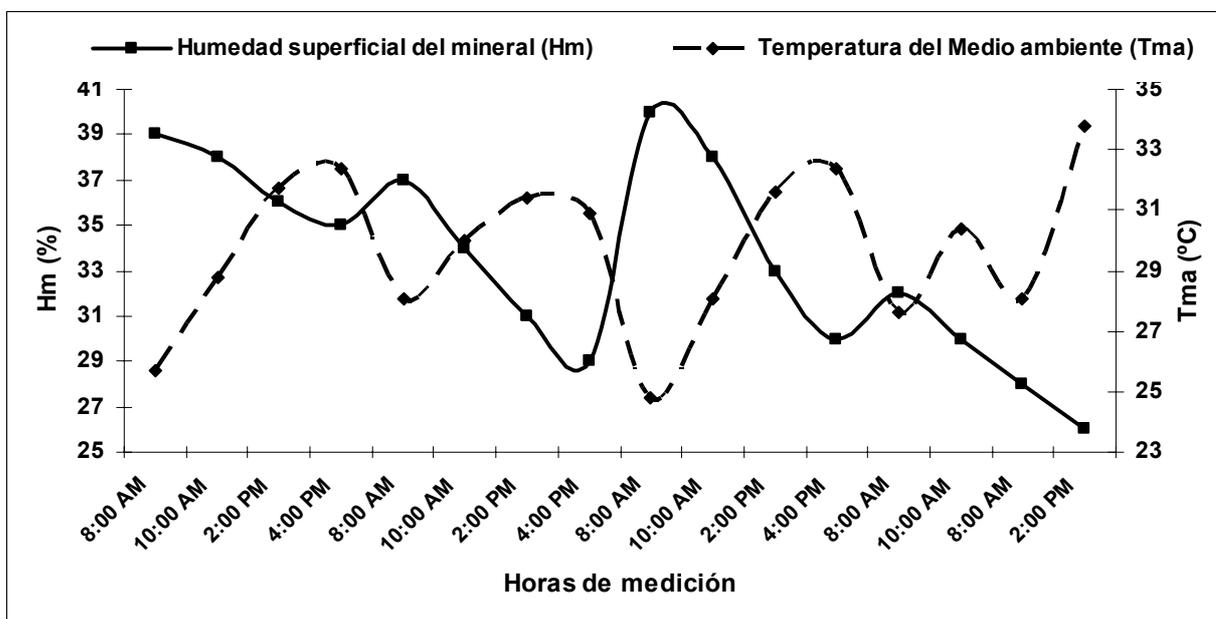


Figura 3.3. Influencia de la temperatura del medio ambiente en la humedad superficial del mineral para el experimento 1 (pila 1).

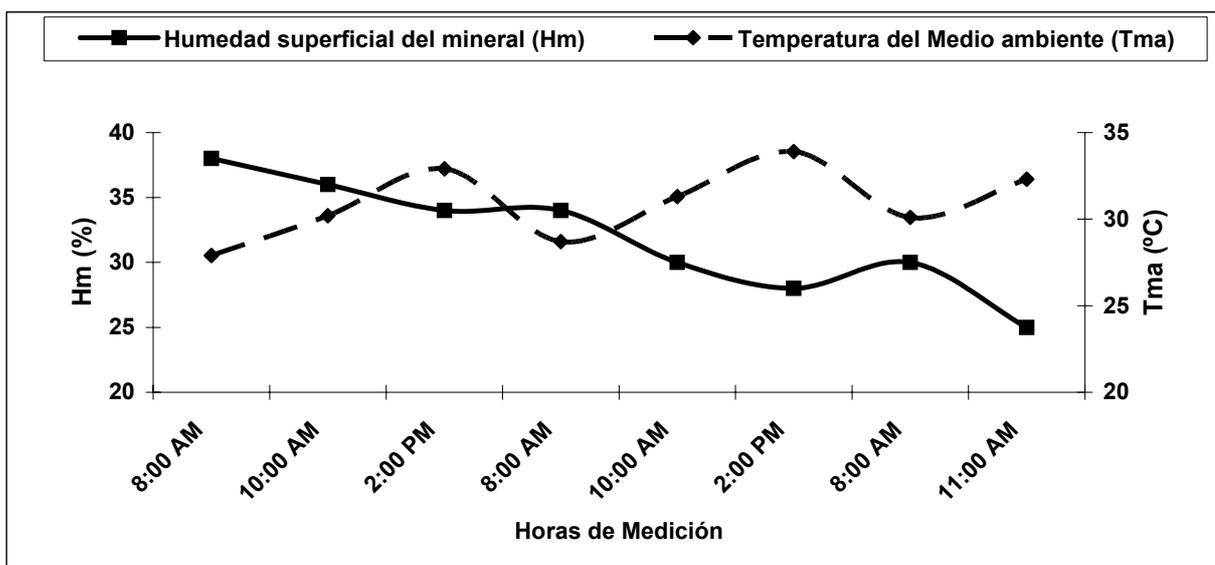


Figura 3.4. Influencia de la temperatura del medio ambiente en la humedad superficial del mineral para el experimento 1 (pila 2).

Es la temperatura del medio ambiente el parámetro climatológico más influyente en el proceso de secado solar, en la mayoría de los casos determina la velocidad del secado. Como se refleja en las figuras 3.3 y 3.4 la temperatura a las 8:00 AM oscila entre 22 y 28 °C generalmente. En la medida en que comienza a elevarse, la humedad del mineral decrece. Se demuestra que en el horario de 10:00 AM a 2:00 PM existe una intensificación del proceso de secado solar, reflejado en las pendientes de las curvas de humedad, a esta hora comienza a elevarse la temperatura del medio ambiente. Se observa además que los mayores valores de temperatura se obtienen entre las 11:00 AM y las 4:00 PM. Los valores de temperatura muestran que aunque sean bajos durante el día el mineral continúa secándose, lo que demuestra que el proceso se desarrolla tanto con radiación solar directa como difusa y por convección al aire, incluso a temperatura constante.

Precipitaciones

En correspondencia con la figura 3.5 las precipitaciones es el parámetro que más afecta el proceso de secado solar. De acuerdo con lo observado cuando el mineral alcanza el 29% de humedad cayeron 12,5 mm de precipitaciones provocando un aumento de la humedad hasta el 40%, efecto que retardó el proceso. Como ilustra el gráfico de comportamiento, son las precipitaciones el principal obstáculo para el desarrollo del secado solar a la intemperie. Los

resultados referidos a la pila 2 del experimento no fueron graficados debido a que durante el secado de ésta no llovió.

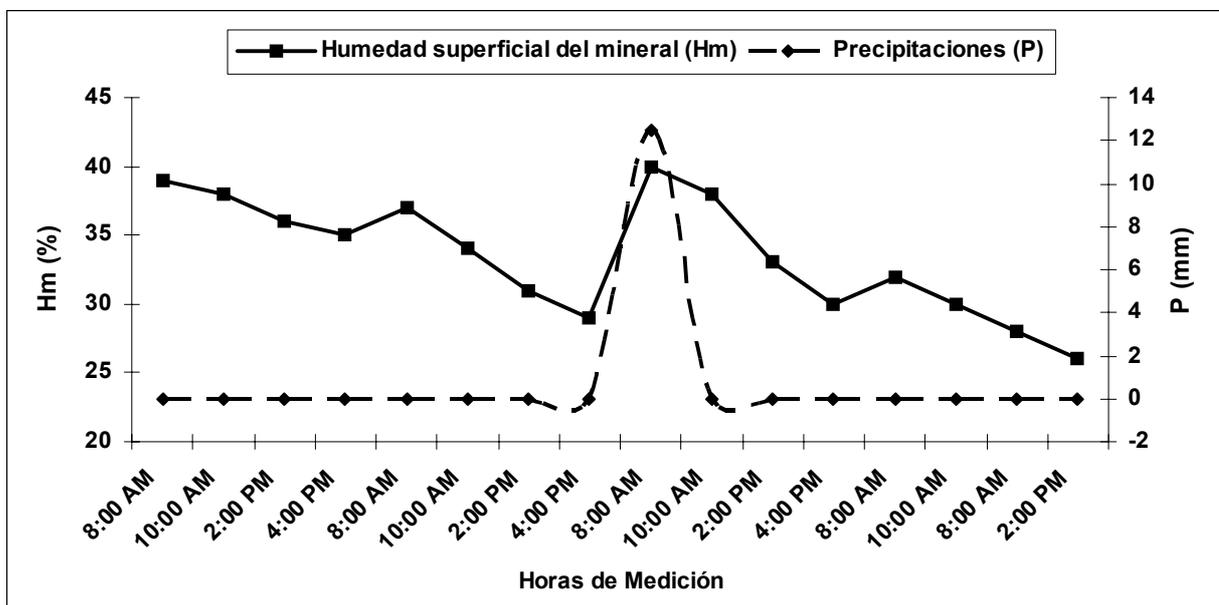


Figura 3.5. Influencia de las precipitaciones en la humedad superficial del mineral para el experimento 1 (pila 1).

Velocidad del viento

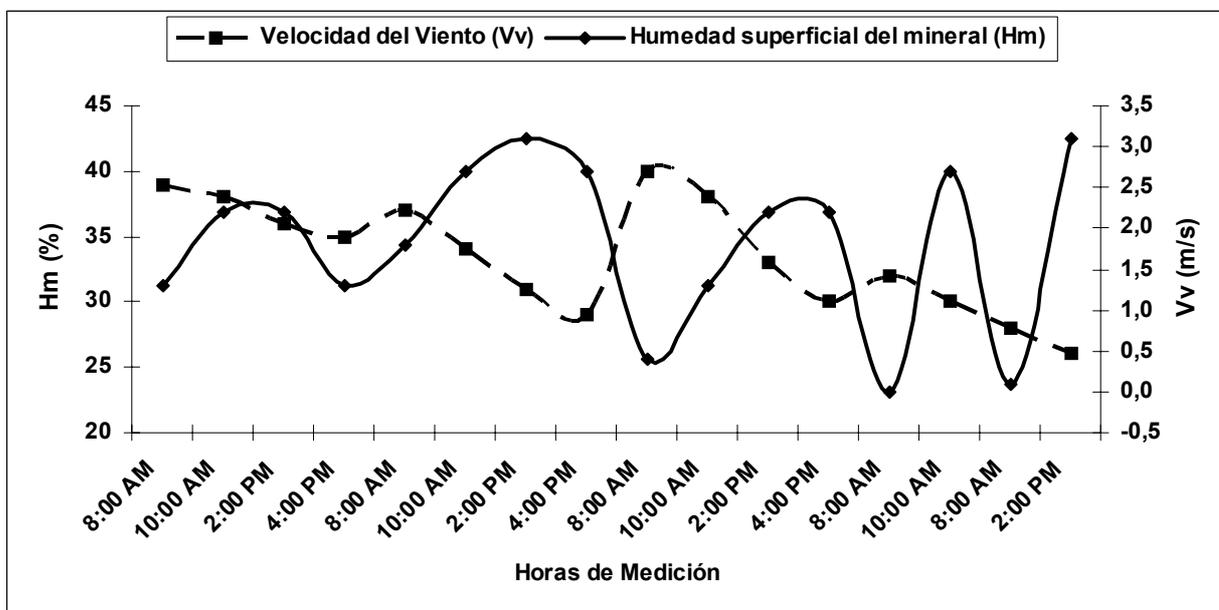


Figura 3.6. Influencia de la velocidad del viento en la humedad superficial del mineral para el experimento 1 (pila 1).

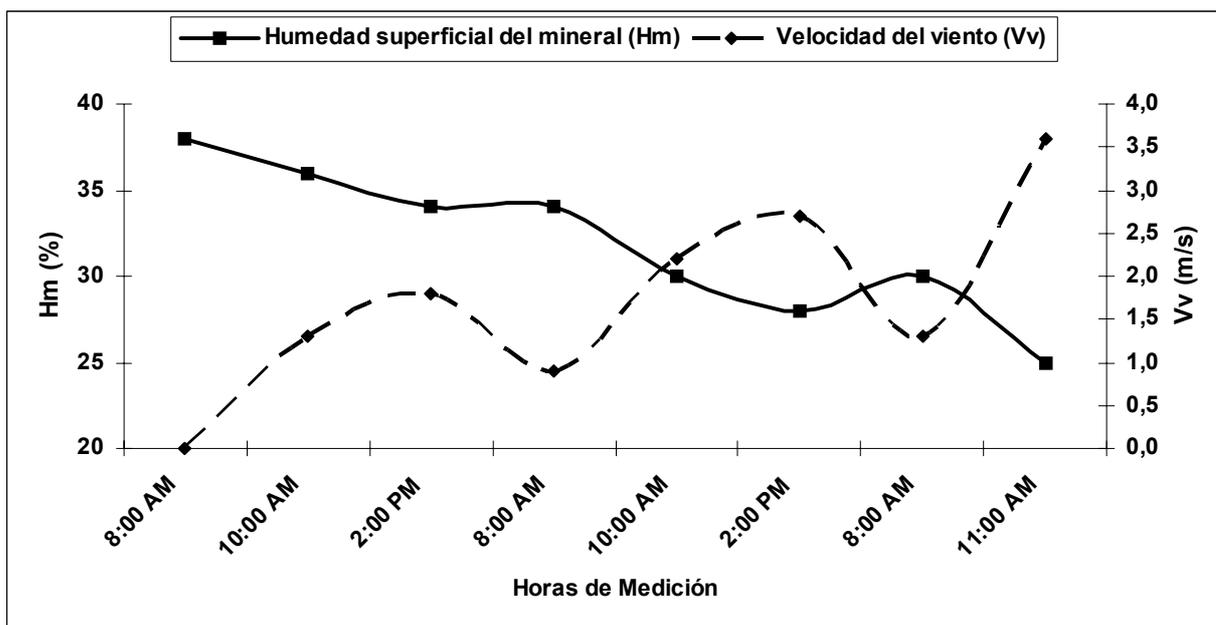


Figura 3.7. Influencia de la velocidad del viento en la humedad superficial del mineral para el experimento 1 (pila 2).

Después de la temperatura del medio ambiente es el factor que más favorece el proceso de secado solar del mineral laterítico. A las 8:00 AM la velocidad del viento alcanza sus valores mínimos en muchos casos, se evidencia que a medida que avanza el día, aumenta la velocidad del viento. En el horario de 10:00 AM a 4:00PM se alcanzan los mayores valores de velocidad del viento predominando en el horario de 10:00 AM a 3:00 PM, de lo anterior se deduce que tiene gran influencia en la pendiente de la curva de secado en el horario de 10:00 AM a 2:00 PM. Se demuestra así que a mayor velocidad y constancia del viento, mayor es el arrastre de los vapores de agua que contiene la pila en su superficie y alrededores (Figura 3.6 y 3.7).

Temperatura del punto de rocío

El punto de rocío al igual que la humedad relativa son los parámetros después de las precipitaciones que más afectan el secado solar. Como se observa en las figuras 3.8 y 3.9 cuando disminuye la temperatura del punto de rocío, aumenta la humedad superficial del mineral, proceso que ocurre generalmente en horas de la madrugada y el amanecer. En dicho horario los vapores de agua existente en la atmósfera se condensan y convertidos en líquidos humedecen la pila de mineral. A medida que avanza el día la temperatura del punto de rocío aumenta y la humedad del mineral decrece rápidamente, lo que demuestra que el parámetro analizado afecta fundamentalmente las capas superficiales del mineral.

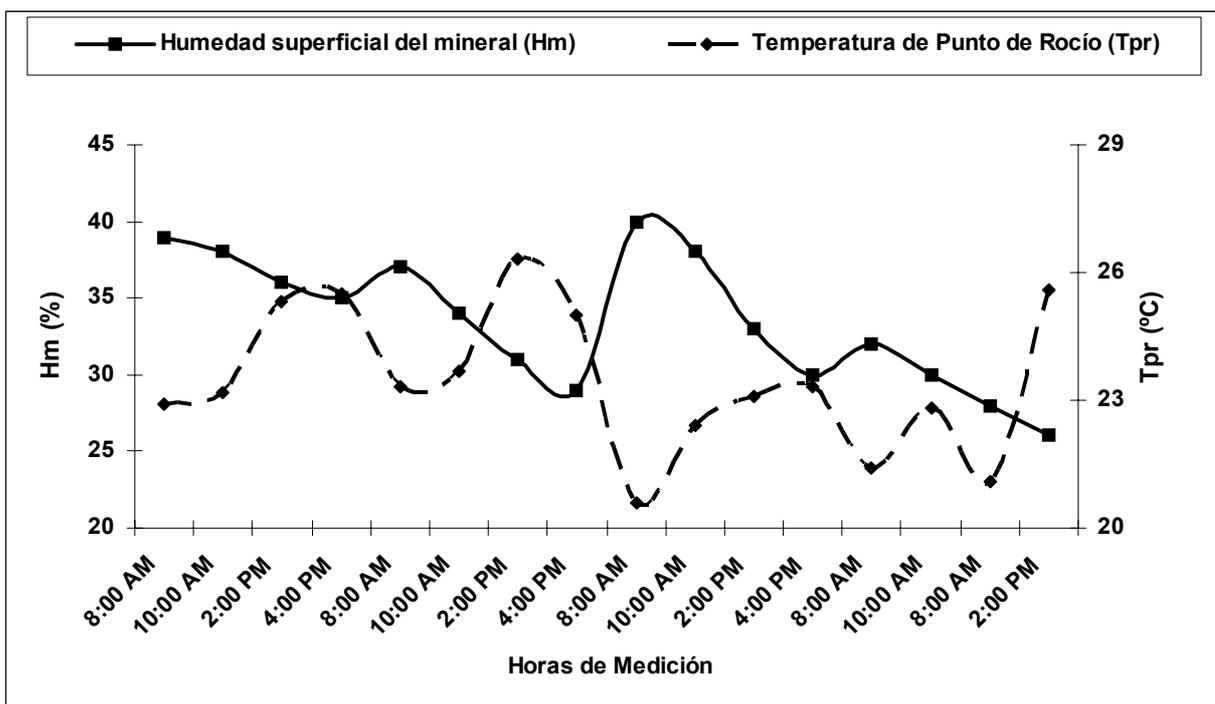


Figura 3.8. Influencia de la temperatura del punto de rocío en la humedad superficial del mineral para el experimento 1 (pila 1).

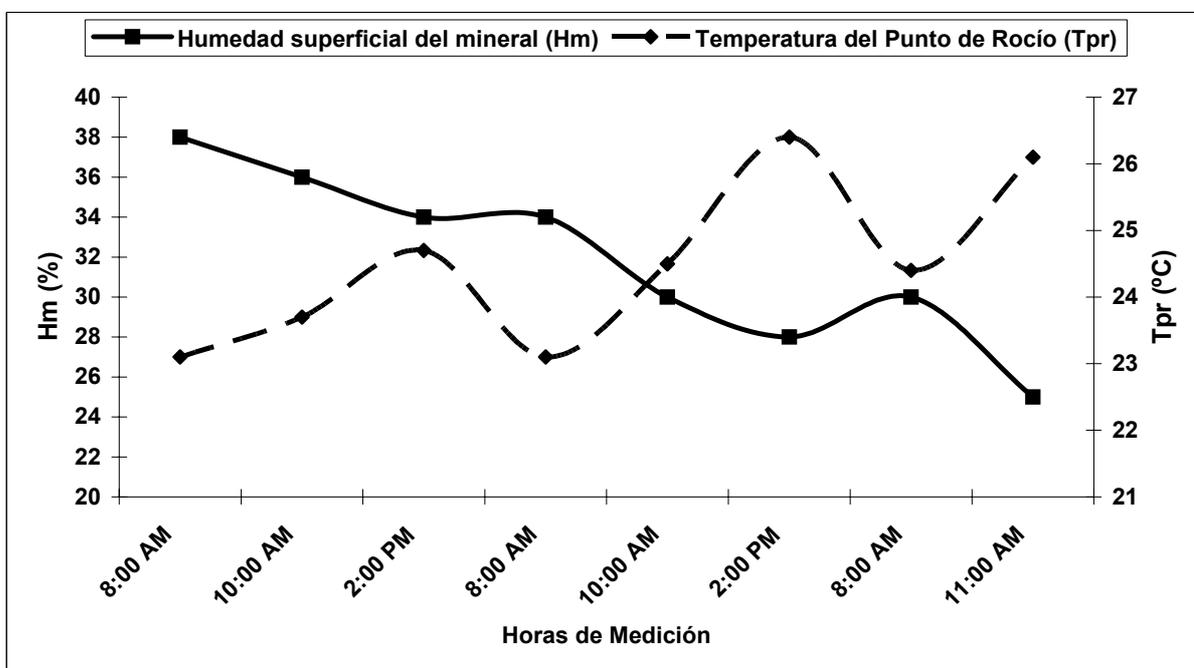


Figura 3.9. Influencia de la temperatura del punto de rocío en la humedad superficial del mineral para el experimento 1 (pila 2).

Comportamiento de la humedad del mineral respecto al tiempo de secado

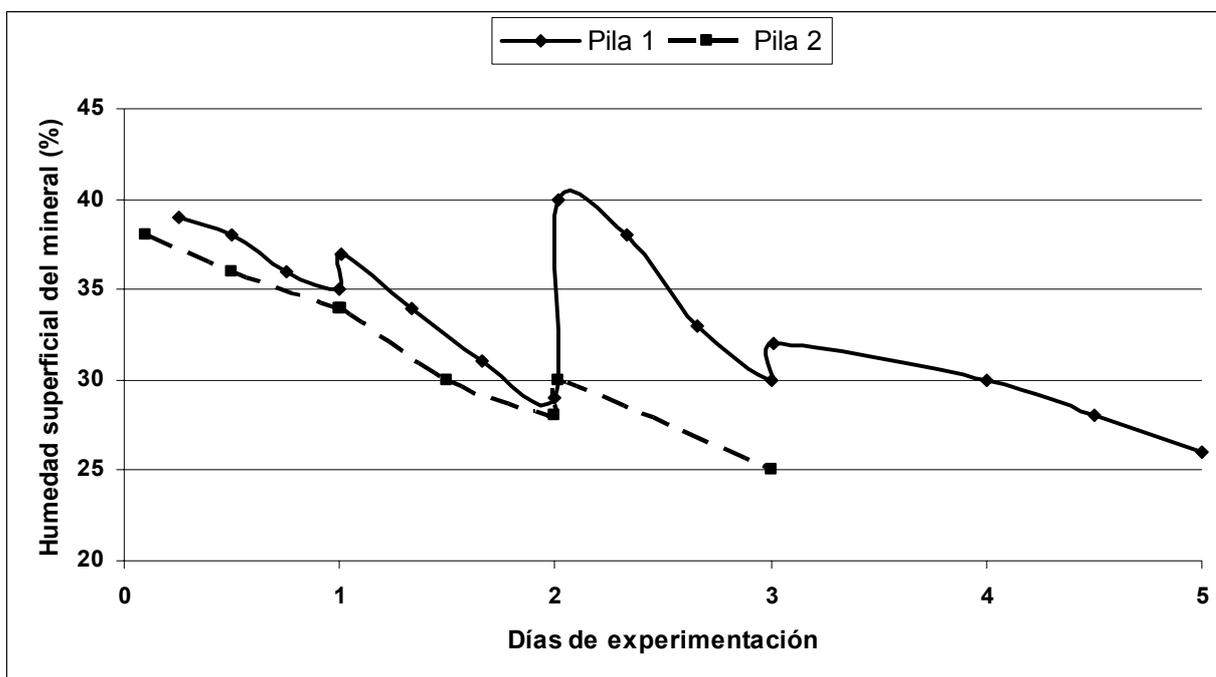


Figura 3.10. Influencia del tiempo de secado en la humedad superficial del mineral para el experimento 1.

De acuerdo con la figura 3.10 (para la pila 1) la humedad superficial se afecta considerablemente por las precipitaciones al comienzo del tercer día, elevando su valor hasta alcanzar el 40%, se observan además pequeños picos en las curvas que indica un aumento de la humedad superficial, los incrementos se producen en las horas de las madrugadas donde la humedad del mineral es afectada por la disminución de la temperatura del punto de rocío y el incremento de la humedad relativa del aire. En el horario comprendido entre las 8:00 AM y las 2:00 PM existe una intensificación del proceso de secado y por consiguiente una disminución acelerada de la humedad como lo indica la pendiente de la curva. Se necesitó cinco días para disminuir la humedad del mineral desde un 39% hasta el 26%, el tiempo de secado para el experimento fue de 102 horas.

En el caso de la pila 2 se muestra un comportamiento de la humedad superficial más estable, porque no hubo precipitaciones, la temperatura del punto de rocío y la humedad relativa tuvieron muy poca influencia sobre el mismo. Solo al comienzo del tercer día ocurrió una alteración de la humedad superficial en horas de la madrugada. Para disminuir el contenido de humedad de 38 a 25% se necesitó un tiempo menor que para la pila 1, siendo solamente de tres días lo cual

demuestra que sin la influencia negativa de las precipitaciones y un comportamiento similar de la temperatura del medio ambiente y la velocidad de los vientos, se puede reducir considerablemente el tiempo de secado que para la pila fue de 51 horas. Estos comportamientos también demuestran la influencia que tiene la masa de mineral a secar en el tiempo de secado.

3.2.4- Comportamiento de la humedad para el experimento 2

La figura 3.11 muestra el comportamiento de la humedad del mineral para las diferentes pilas en el período de experimentación, como se puede apreciar al ser depositadas el valor de la humedad inicial no depende directamente de la masa de material, llegando a tener la pila de 1t mayor por ciento de humedad que la de 32t, transcurrida la primera semana cuando los parámetros climatológicos comienzan a ejercer su influencia las pilas de 1, 2 y 4t tienen un comportamiento similar, sus humedades se reducen considerablemente y el valor entre ellas no excede el 2%, llegando a tener valores aproximados en la segunda semana (Figura 3.12), cuando se comparan los resultados con los de las pilas de 8, 16 y 32 toneladas se observa que la humedad prácticamente no ha sufrido cambio (respecto a los valores iniciales) para iguales condiciones climatológicas y el mismo tiempo de secado (1ra semana) sus curvas características tienden a unirse en la cuarta semana cuando cayeron 70 milímetros de precipitaciones.

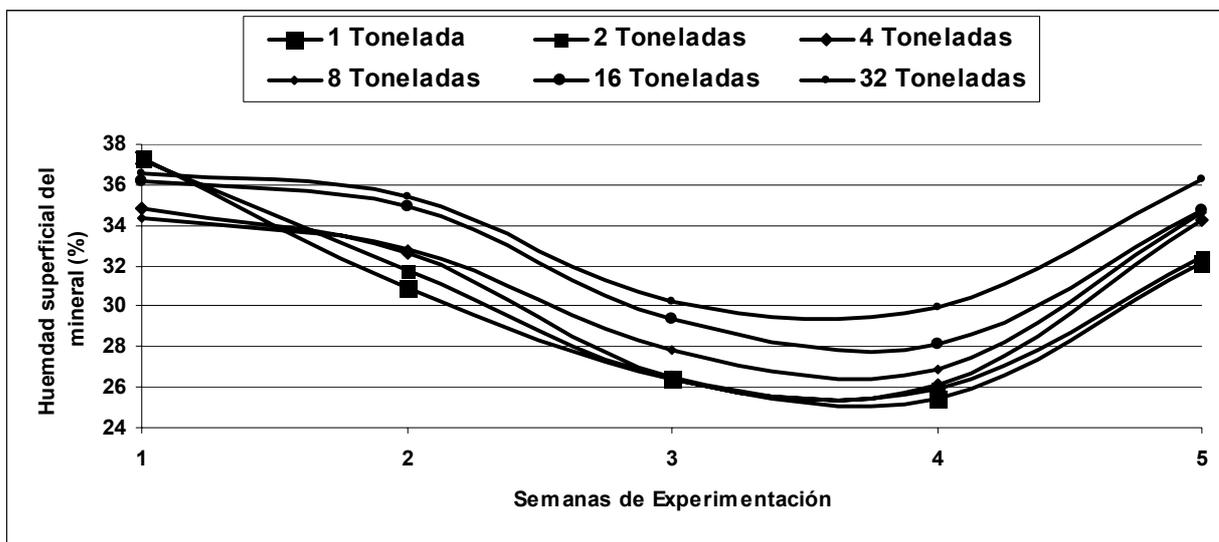


Figura 3.11. Comportamiento de la humedad del mineral en las pilas depositadas respecto al tiempo de secado.

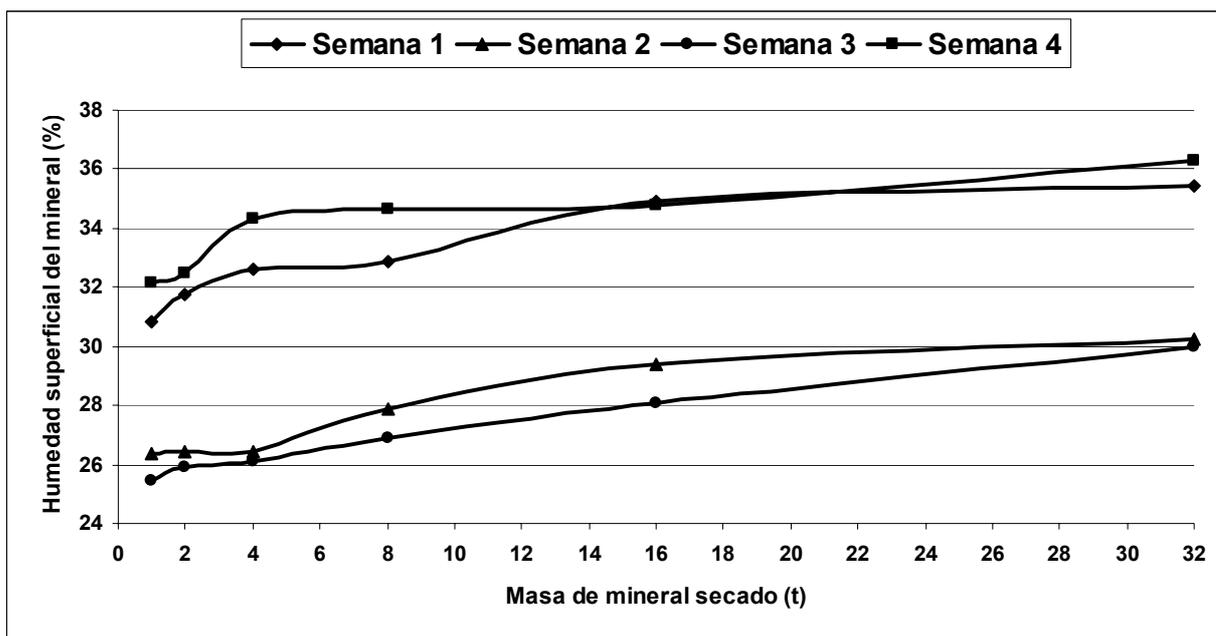


Figura 3.12. Comportamiento semanal de la humedad por pilas de mineral depositado.

Los aspectos antes mencionados demuestran la importancia que tiene la masa de mineral a secar en el secado solar, reflejado en los comportamientos siguientes: la pila de 32t redujo su humedad en 6,74% mientras que la de 1t la redujo en 11,87% (1,76 veces) en 31 toneladas de diferencia entre ambas pilas. Los cálculos fueron obtenidos para el periodo comprendido entre el 16/05 y el 03/06, no se considera la última semana debido a que los 70mm de lluvia que cayeron desvirtúan la cinética del proceso. De lo anterior se deduce la importancia que tiene estimar certeramente el tiempo de secado en el proceso a la intemperie, aspecto al que también se han referido otros investigadores (Cabrera et al., 1985; Chiapero, 2001).

3.2.5- Comportamiento de la granulometría para las diferentes pilas analizadas

La granulometría es un parámetro que varía en dependencia de la humedad contenida en el mineral, en la figura 3.13 la cantidad de granos (expresado en %) que retiene cada tamiz es mayor para las pilas de mayores masas, lo cual se explica debido al lento proceso de desorción de la humedad cuando se trabaja con grandes cantidades de material y un bajo régimen de temperatura, en la pila de 4 toneladas para la fecha que se tomaron las muestras (03/06) no existían granos de +75 mm de diámetro y el por ciento de los de +50 y +25 era menor en comparación con las demás pilas, este valor se incrementó a medida que aumentaron las masas de las pilas.

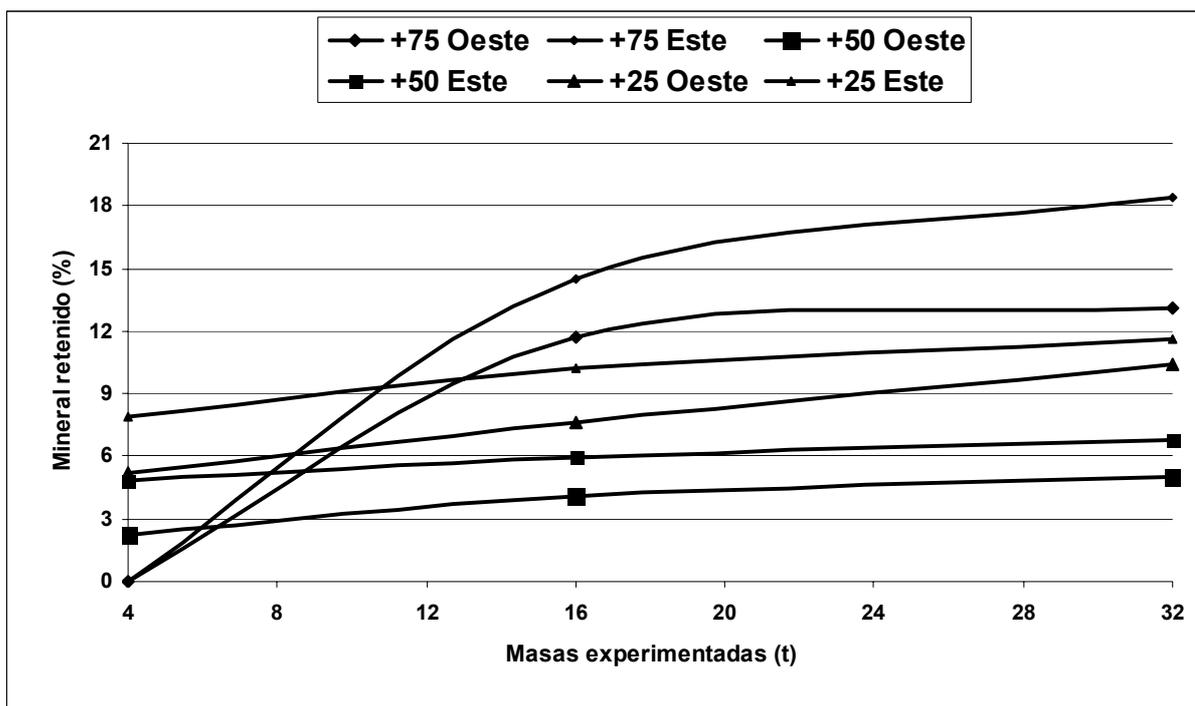


Figura 3.13. Cantidad de mineral retenido por cada tamiz para las pilas de 4, 16 y 32 t .

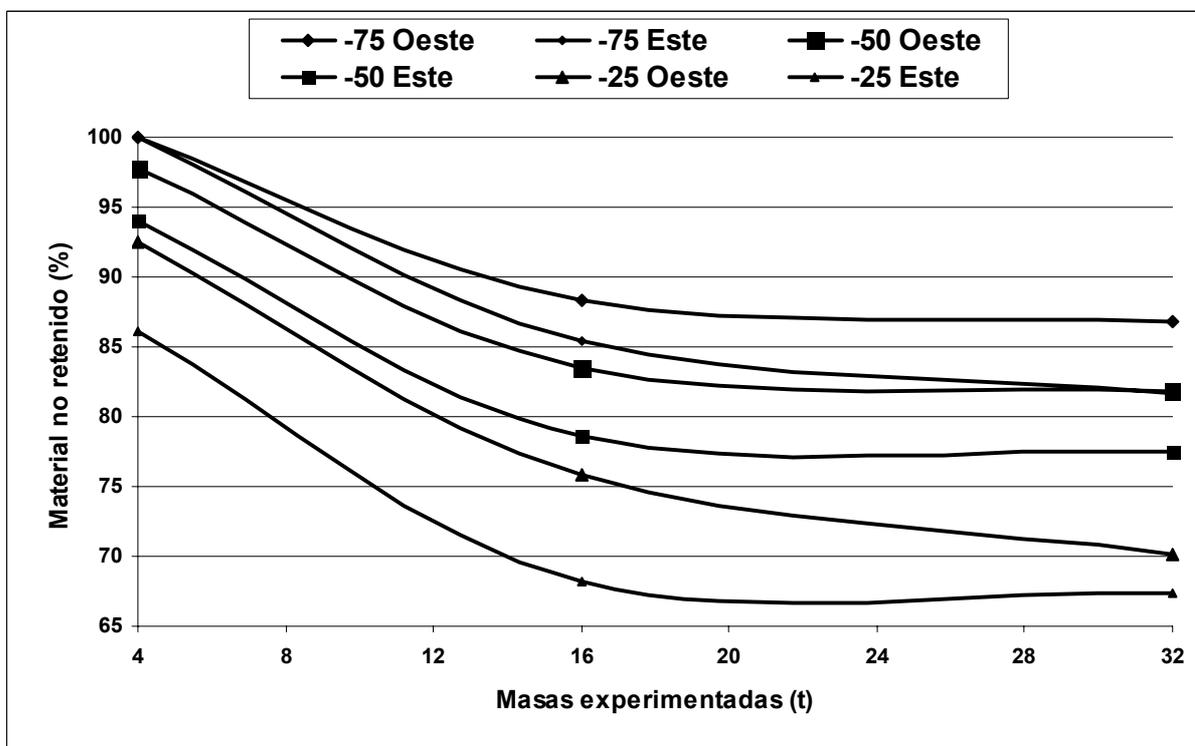


Figura 3.14. Cantidad de mineral no retenido por cada tamiz para las pilas de 4, 16 y 32 t .

El comportamiento de la granulometría en la figura 3.14 difiere de la anterior (Figura 3.13), aquí el por ciento de mineral no retenido por cada tamiz a medida que aumenta la masa de la pila es menor, en las pilas más pequeñas predominaban los granos de menor tamaño todo lo contrario a lo ocurrido en la figura 3.13, el contenido de humedad en esta no solo era menor sino que el proceso de secado se intensifica a medida que transcurre el tiempo, en comparación con el de la pila de 32 t.

3.2.6- Comportamiento del ángulo de reposo

El ángulo de reposo o talud natural es un parámetro que permite conocer cuanto se ha secado el mineral, en las pruebas realizadas (Figura 3.15) el ángulo aumenta con el incremento de la masa de mineral secado y su contenido de humedad, llegando a variar hasta 8.55 grados entre las pilas de 1 y 32 toneladas para un contenido de humedad entre 25,43 y 29,96% (medición realizada el 03/06/06), es decir el mismo varía en 1,88 grados por cada 1% de humedad.

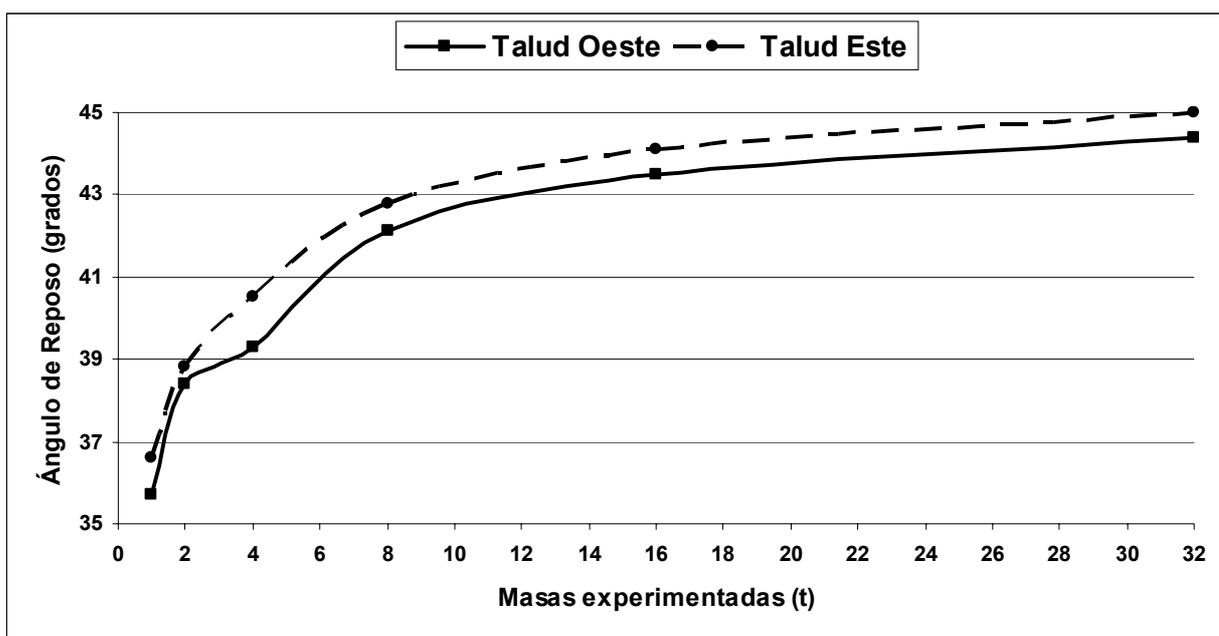


Figura 3.15. Comportamiento del ángulo de reposo para las diferentes pilas de mineral por el talud seco (oeste) y el talud húmedo (este).

3.2.7- Análisis de los modelos matemáticos obtenidos

Las ecuaciones (2.3 y 2.4) muestran los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre H_{Final} y las diferentes variables independientes del proceso objeto de estudio.

Dado que la probabilidad es inferior a 0,01; existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 90% para ambas pilas.

El coeficiente de determinación (R^2) indica que los modelos explican un 80,9 y 96,5% de la variabilidad en H_{Final} para las pilas 1 y 2 respectivamente. Siendo R^2 ajustado, el más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos de 2,41 y 1,52. Estos valores pueden usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones que se realicen. Los errores absolutos medios fueron de 1,47 y 0,69 ellos representan los valores medios de los residuos.

La simplificación de los modelos (en caso de ser necesaria) se realiza a partir de considerar la probabilidad más alta en las variables independientes, en el caso analizado son 0,96 y 0,67 correspondientes a H_r en ambas pilas, considerando que son superiores a 0,10; el término no es estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 90% o superior. Por tanto, puede ser eliminada la variable H_r de los modelos. En estas condiciones las ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento del proceso se reducen de la forma siguiente:

Modelos matemáticos estadísticos simplificados para el experimento 1

Pila 1 (100 kg)

$$H_{Final} = 62,172 - 2,982 \cdot T_{ma} + 0,011 \cdot R_s - 0,832 \cdot V_v - 0,289 \cdot P_r + 2,575 \cdot T_{pr} \quad (3.1)$$

Pila 2 (50 kg)

$$H_{Final} = -128,443 + 10,308 \cdot T_{ma} + 0,012 \cdot R_s - 3,540 \cdot V_v - 13,462 \cdot T_{pr} \quad (3.2)$$

Para el análisis del modelo del experimento 2 se procede de forma análoga al experimento 1, se debe destacar que la probabilidad más alta en las variables independientes fue de 0,0027 perteneciente a $H_{inicial}$, este valor es inferior a 0,10; por tanto este término de orden superior es estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 95% y la variable no puede ser eliminada del modelo.

Los errores relativos puntuales máximos calculados son 10,7 y 3,5% para las pilas 1 y 2 respectivamente y para el experimento 2 es de 8,5%. En todos los casos el error relativo promedio es inferior al 5%. Estos resultados confirman la validez de los modelos obtenidos, teniendo como frontera el intervalo de variación de los diferentes parámetros influyentes.

3.3- Valoración económica

La coyuntura internacional, en especial los enfrentamientos bélicos en el medio oriente, donde está involucrado el segundo productor mundial de petróleo (Iraq), ha conllevado a una crisis energética que afecta a todos los continentes.

En la industria cubana del níquel el consumo de combustible es un fenómeno que influye notablemente en los costos de producción (Informe económico anual de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, 2005). En la planta de preparación de mineral es un parámetro que depende considerablemente del contenido de humedad del mineral a secar, la reducción de la humedad antes de efectuar la operación de secado en los secaderos cilíndricos rotatorios genera un ahorro apreciable de petróleo (Columbié, 2005). En sentido general los cálculos que se exponen en este epígrafe tienen el objetivo de orientar al lector en los aspectos esenciales a considerar al valorar económicamente el proceso estudiado, de ahí que no constituyen una representación exacta del proceso industrial, sino una aproximación debido a la diferencias significativas que existen entre las masas empleadas en el proceso productivo y la considerada en el proceso de experimentación expuesto en el trabajo.

Para obtener el ahorro de combustible se considera la reducción de la humedad (utilizando los valores promedios) experimentada por el mineral durante el experimento 2 (36,08 a 27,23 %), se escogen los resultados de este experimento porque es el que más se aproxima al proceso real, se calcula el consumo de combustible para ambos contenidos de humedad y se realiza la comparación entre los mismos, según metodología de calculo expuesta por Castillo (2007). El precio del petróleo empleado en el cálculo es 246,58 USD/t, el cual fue reportado por el departamento de Economía Energética de la empresa para el mes de mayo del 2007.

Tabla 3.1. Ahorro por concepto de consumo de combustible en los secaderos rotatorios.

Método	Humedad inicial del mineral (%)	Consumo de combustible t/h	Costo USD/mes	Costo USD/año
Sin secado solar	36,08	2,60	461597,76	5539173,12
Con secado solar	27,23	1,58	280509,408	3366112,89
Ahorro (parcial)		1,02	181088,352	2173060,23
Ahorro (total)				2172810,23

En la tabla 3.1 se muestra un ahorro parcial de 2173060,23 USD para un secador cilíndrico, al mismo se le restó el gasto total incurrido en el patio de secado por concepto consumo de

combustible en los equipos utilizados (valorado a 0,24 USD/litros) y salario para los 23 días que se realizaron los experimentos (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Gastos incurridos durante las pruebas realizadas.

Equipos	Consumo litros/h	Tiempo trab. (h)	Consumo total (litros)	Costo (USD)	Salario Operad. (\$)	Costo USD/mes
Retroexcavador a -895	40	17,25	690	165,6	515,10	207,05
Cargador -910	15	1	15	3,6	477,29	43,48
Total	55	18,25	705	169,2	992,39	250,53

Los resultados mostrados anteriormente indican que el consumo de combustible en los patios de secado es insignificante comparado con los beneficios que ofrece el secado solar. Es bueno destacar que la aplicación del proceso a escala industrial genera un gasto mayor que el previsto en el trabajo para las 63 toneladas procesadas. De esta manera lo que se persigue con la implementación de la tecnología solar al proceso industrial es reducir el contenido de humedad entre un 3 y 5%, los ahorros en esas condiciones de trabajo serían menores.

3.4- Impacto ambiental asociado al proceso de secado solar

El proceso estudiado daña poco al medio ambiente, ya que el mismo es natural y utiliza energía solar y eólica como fuentes de secado, pero durante el desarrollo del mismo existe una afectación constante al medio ambiente y los trabajadores debido a las emanaciones de polvo que se generan en el proceso de carga, descarga y remoción del mineral, por esta razón se procede a explicar las principales afectaciones causadas por el polvo.

3.4.1- Influencia del polvo en el medio ambiente y el organismo humano

El estado de salud del trabajador depende en gran medida de las condiciones de trabajo, su entorno laboral y su labor específica, porque es donde el mismo se expone a los diferentes contaminantes, entre los que se encuentra el polvo industrial. Las partículas suspendidas en la atmósfera absorben la luz solar, reduciendo la energía que llega a la tierra, produciendo cambios que disminuyen notablemente la luminosidad y visibilidad, además de la luz solar las partículas en suspensión absorben la luz producida por medios artificiales.

Este fenómeno se encuentra ligado a la concentración. Para una misma concentración las partículas que absorben una mayor cantidad de energía son las de diámetro comprendido entre 0.1 a 1 μm . Entre los efectos que pueden tener sobre los materiales se encuentran:

Abrasión: realizada por aquella partícula de mayor diámetro y dotadas de elevada velocidad (efecto de pequeña incidencia).

Ataque químico: puede realizarse directamente por las partículas o generalmente por los gases existentes conjuntamente con ellas.

Los efectos que produce sobre la vegetación pueden considerarse como muy pequeños y prácticamente inexistentes. Solo pueden cifrarse como peligrosos aquellos que se derivan para zonas muy próximas a puntos de producción de partículas en grandes cantidades. Las partículas solas o en combinación con otros contaminantes representan un peligro notable para la salud.

Sin embargo, *cuando se habla del organismo humano, la situación se torna aún más preocupante*, ya que lo afecta directamente en mayor o menor medida. Los contaminantes penetran en el organismo fundamentalmente por dos vías: *por inhalación de polvos en el aire por las vías respiratorias y absorción de polvo a través de la piel.*

En la primera, las partículas entran al cuerpo humano a través del sistema respiratorio y el efecto que se produce depende de su tamaño, la composición química y mineralógica, densidad, superficie específica y otras.

En la segunda, las partículas de diámetro superiores a 5 μm quedan retenidas en los bellos de la cavidad nasal y también pueden quedar atrapadas por la mucosa que tapiza la tráquea y la cavidad nasal. Los comprendidos entre 0,5 y 5 μm son capaces de penetrar hasta el sistema respiratorio inferior depositándose en los bronquios. De aquí que en la mayoría de los casos sean eliminados al cabo de algunas horas por respiración.

La situación más preocupante corresponde a las partículas menores de 0,5 μm , ya que se ha estimado que más del 50% de las partículas de 0,01 a 0,1 μm que penetran en los alvéolos se depositan allí, donde es difícil eliminarlos por carecer de cilios y mucosas, pudiendo permanecer durante meses e incluso durante años degradando la salud del hombre.

A pesar de los aspectos antes mencionados, se puede afirmar que con la implementación del secado solar se reducen considerablemente las emanaciones de gases producto de la combustión liberados por los secaderos rotatorios, debido a que el tiempo de permanencia del mineral dentro de los mismos es mucho menor y el consumo específico de combustible decrece considerablemente, entre las afectaciones causadas por los gases se encuentran las siguientes:

Dióxido de carbono

Es considerado el responsable del cambio climático global por su efecto sobre la atmósfera terrestre.

Óxido nítrico

Favorece la formación de ozono en las capas bajas de la atmósfera, causante de fuertes irritaciones, sobre todo en las vías respiratorias y los ojos.

Monóxido de carbono

Denominado también veneno de la muerte dulce porque bloquea la capacidad de fijación de oxígeno por parte de la sangre.

Dióxido de azufre

Al reaccionar con el vapor de agua contenido en el aire forma un ácido que ataca las plantas y los edificios (conocido también como lluvia ácida).

Al valorar las afectaciones medioambientales asociadas al proceso estudiado (por emanaciones de polvo) se observa que el secado solar como elemento de la minería a cielo abierto afecta de manera directa el entorno y el medio ambiente, en el trabajo no se exponen los valores cuantitativos de las concentraciones de los diferentes elementos porque no se han realizado mediciones recientes en la mina de la empresa.

3.5- Conclusiones capítulo III

- Se demostró la influencia que tienen los parámetros climatológicos en el proceso de desorción de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico a partir del establecimiento de los gráficos de comportamiento, de ellos se infiere que las precipitaciones es el parámetro que más afecta el desarrollo del proceso a la intemperie.
- El cálculo económico preliminar realizado confirma que la implementación práctica del proceso permitirá un ahorro considerable de combustible que se incrementará en la medida que se eleven los precios del mismo.
- Existe una marcada disminución de las emanaciones de gases producto de la combustión cuando se reduce el contenido de humedad del mineral aplicándole el secado solar previo al secado en los hornos rotatorios.

CONCLUSIONES

- Las expresiones empíricas obtenidas por los diferentes investigadores aunque caracterizan la transferencia de calor y masa e indican los criterios científicos a considerar en el análisis físico de los procesos de secado, las mismas no son satisfactorias para la descripción matemática del secado solar del mineral laterítico.
- Los termogramas de las muestras estudiadas confirman la existencia de tres picos endotérmicos notables, los cuales son atribuibles a la pérdida del agua no estructural, la deshidroxilación de la Goethita y la oxidación de la fase de Manganese. Todos en correspondencia con los resultados obtenidos por otros investigadores en yacimientos parecidos.
- Con la implementación del secado solar se comprobó que es posible reducir la humedad físico-mecánica presente en el mineral laterítico. La interacción de los parámetros climatológicos con el material durante el proceso permitió la reducción de un 13 y 6,64% en el contenido de humedad para los experimentos 1 y 2 respectivamente.
- Quedaron establecidos los modelos matemáticos estadísticos mediante el análisis de regresión lineal múltiple, los mismos describen el comportamiento de la humedad durante el desarrollo del secado solar del mineral laterítico y están representados por las ecuaciones 2.3 y 2.4 para las pilas 1 y 2 del experimento 1 y por la expresión 2.5 para el experimento 2. En todos los casos el coeficiente de determinación es superior al 80% y el error relativo promedio no excede al 5% .
- Al reducir el contenido de humedad en 8,85%; el consumo de combustible disminuyó en 1,02 t/h; generando un ahorro anual por concepto de consumo de combustible en el secador cilíndrico rotatorio que asciende a 2 172 810,23 USD .



RECOMENDACIONES

- Profundizar en el estudio de la temática por la importancia que tiene para la industria cubana del níquel, a partir de la realización de investigaciones que contemplen nuevos aspectos y variantes tecnológicas no valoradas en el trabajo.
- Realizar la modelación matemática del proceso basada en las ecuaciones físicas que caracterizan la transferencia de calor y masa, que permita mediante la simulación, establecer los parámetros racionales del mismo.
- Convertir el trabajo en un material de consulta para la asignatura Transferencia de Calor de la carrera de Ingeniería Mecánica debido a la novedad de la temática tratada.

RERERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Almaguer, A.; V. Zamarsky. Estudio de la distribución del Fe, Ni y Co en los tamaños de granos que componen el perfil de las cortezas de intemperismo de las rocas ultrabásicas hasta su desarrollo laterítico y su relación con la mineralogía. revista Minería y Geología No. 2/93. Moa, 1993.
2. Bérriz, L. Secador Solar de Madera, Centro de Investigaciones de Energía Solar. Cuba, 2002.
3. Bérriz, L. Secador Solar de Madera, Centro de Investigaciones de Energía Solar. Cuba, 2003.
4. Berruta, L. Participación Campesina en el Diseño y Construcción de un Secador Solar para Café. Agrociencia. Vol. 37:95-106. 2004.
5. Boizan, M. Macrocínética del secado de Bagazo. Santiago de Cuba: Ediciones ISJAM, 1991.145p.
6. Cabrera. L.; A. Cardoso. Influencia de los parámetros de secado sobre la calidad de dos variedades de cebolla deshidratada. Vol. 6. No.2. 1985./pág 56-64.
7. Castillo. A. Influencia del contenido de humedad en el consumo de combustible de los secaderos cilíndricos rotatorios de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Trabajo de Diploma. ISMM, 2007 (en construcción).
8. Chiapero, M. Factibilidad del secado solar de granos en silos de bases cónicas. Avances en energías renovables y medio ambiente. Argentina. Vol 6. (2). 2001.
9. Colectivo de autores. Atlas de Cuba. Instituto cubano de Geodesia y Cartografía. La Habana, 1978.
10. Columbié, E. Caracterización de los parámetros fundamentales del proceso de secado del mineral en los tambores rotatorios. Trabajo de Diploma. ISMM. Moa, 2005. 53p.
11. Curioni, A. Secado de especies aromáticas en la provincia de Buenos Aires. Factibilidad del recurso solar. Ingeniería Rural y Mecanización Agraria en el ámbito Latinoamericano. Editorial Board, /pág 378-400. 2000.
12. De Dios, D.; R. Díaz. Distribución y clasificación de las intercalaciones en el yacimiento laterítico ferroniquelífero Punta Gorda, Cuba. Minería y Geología 18 (3-4) :5-20. 2003.
13. Dinulescu, H; E. Eckert. Analysis of the one dimensional moisture migration caused temperature gradients in porous medium. Institute Heat Mass Transfer 28 (9): 1069-1077.1985.

14. Durán, R. Estudio de las propiedades físico mecánicas del mineral laterítico. Trabajo de Diploma. ISMM, Moa, 2006. 62p.
15. Echazú, P. Secado solar de carnes de llamas. Avances en energías renovables y medio ambiente. Argentina. Vol. 5. 2001.
16. Estenoz, S; E. Rondón. Descripción, caracterización y valoración de los flujos y procesos, Informe final Etapa 03 del proyecto de I+D: "Incremento y regulación de la eficiencia económica del complejo minero-metalúrgico", Centro de Investigaciones del Níquel, Moa. 1997. p.22-28.
17. Estenoz, S.; N. Pérez. Procedimiento de homogeneización y secado solar de materiales a granel e instalación requerida, Solicitud de invención cubana No. 208, OCPI. La Habana, 2001.
18. Estenoz, S.; M. Espinosa. Procedimiento y equipo para secado solar de materiales a la intemperie, Solicitud de invención cubana No. 175, OCPI, OCPI, La Habana, 2003.
19. Estenoz, S.; M. Espinosa. Prueba de homogeneización y secado solar del mineral (Parte I): Centro de Investigaciones del Níquel, Cuba, Informe de Investigación, 2003.
20. Faires, V. Termodinámica. La Habana: Edición Revolucionaria, 1991. 807p.
21. Falcón, J. Influencia de la composición de la pulpa limonítica en la velocidad de sedimentación. revista minería y geología 3/87. 1987.
22. Ferguson, W.; J. Turner. A comparison of the finite element and control volume numerical solution techniques applied to timber drying problems below the boiling point. Int. J. Num. Methods Eng.38: 451-467. 1995.
23. Fernández, E. Termodinámica Técnica. La Habana: Editorial "Felix Varela, 1994. Tomo I.
24. Filonenko, G. Secado de semillas de tomate. Conferencia nacional de secado-Sección de energética. Editorial Profizdat, Moscú, 1958.
25. Fulford, G. A suvey of recent soviet research on the drying of solids. Can. J Chem. Eng. 47: 378-491.1969.
26. Garcell, L. Comportamiento reológico de las pulpas lateríticas. Rev. Minería y Geología 1/91. Ed. Esp. 1991.
27. Griñán. P.; S. Fonseca. La madera y el secado solar. Santiago de Cuba, 2003.
28. Guerra, C.; A. Menéndez; R. Barrera; E. Egaña. Estadística. La Habana: Editorial Félix Varela, 2003. 376p.
29. Gutiérrez, R. Influencias de las Características del Mineral Laterítico en los Índices de Explotación de los camiones articulados VOLVO A40D y A35C en la Empresa comandante Ernesto Che Guevara. Trabajo de Diploma, ISMM, Moa, 2003. 60p.

30. Guzmán, D. Modelación, simulación y control del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de lixiviación carbonato amoniacal. Tesis doctoral. ISMM, Moa, 2001. 124p.
31. Guzmán, J. Diseños de Experimentos para ingenieros mecánicos. Santiago de Cuba: Edición Revolucionaria, 1986. 167p.
32. Hall, C. Drying technology An International Journal. New York, 1983.
33. Huang, C. Multi-Phase moisture transfer in porous media subjected to temperature gradient Int .J.Heat Mass Transfer 22: 295-307.1979.
34. Incropera, F.; D. De Witt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Tercera edición. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 2003 Tomo I, II y III. 723p.
35. Ilic, M.; I. Turner. Convective drying of a consolidated slab of wet porous materials . Int .J. Heat Mass Transfer 32(12): 215-262.1989.
36. Informe económico anual de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Moa, 2005.
37. Informe económico anual de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Moa, 2006.
38. Isachenko. V.; V. Osipova.; A. Sukomel. Transmisión del calor. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana, 1979. 566p.
39. Kallel, F.; N. Galanis; B. Perrin; R. Javelas. Effects of Moisture on temperature during drying of consolidated porous materials. J. Heat Transfer, ASME Trans, 1993.
40. Kasatkin, A. Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química. Segunda parte. Editorial pueblo y Educación. 1987. /pág 262-366.
41. Kern, D. Procesos de transferencia de calor. Edición Revolucionaria. La Habana, 1969. 980p.
42. Knoule, F. El secado. Bilbao. Ediciones Urno. 1968./pág 50-150.
43. Krisher, O. Fundamentos científicos de la técnica del secado. Editorial Izdatinlit. Moscú, 1961.
44. Kuroshkina, M. La fluidización en la industria química Editorial XIMIA. Leningrado, 1972.
45. Laborde, R. Modelación matemática y simulación del proceso de molienda del mineral laterítico con composición sustancial variable. Tesis doctoral. ISMM, Moa. 2005. 120p.
46. Lykov, A. Fenómenos del transporte en cuerpos capilaroporosos. Editorial gostejizdat. Moscu, 1954.
47. Lykov, A. Teoría del secado. Editorial Energía, 2da edición, Moscú, 1968.
48. Madariaga, J. El secado de biomasa residual de la caña de azúcar. Tesis Doctoral. ISJAE. Ciudad de la Habana. 1995.

49. Manual de operaciones de la planta Preparación de mineral de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", 2005. 219 p.
50. Martínez-Pinillo, E. Diseño y ensayo de un secador solar para madera. *Madera y Bosques* 3 (2). 1997:13-28.
51. Menon and Mujundar. *Drying of solids*. Mc Graw Hill, Montreal, Canadá.1992.
52. Miler, I.; J. Freund; R. Jonson. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. Holguín, 2005.
53. Miranda, J. Composición y conjugación de métodos de determinación de humedad de la industria del Níquel. *Revista Minería y Geología*. Moa. 13(2): 39-45,1996.
54. Mitrofánov, S; L. Barski; V. Samygin. *Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales*. Editorial Mir. Moscú, 1982. 439p.
55. Muregesan, K.; N. Seetharamu. A one dimensional analysis of convective drying of porous materials. *Heat and Mass Transfer* 32: 81-88. Springer – Velag .1996.
56. Nonhebel, G.; H. Moss. *Secado de sólidos en la industria química*. Editorial Butterworths, Canadá, 1971.
57. Novoa, R.; M. Boizán. Secado de Zeolita a escala de laboratorio (II). *Revista Tecnología Química*. Santiago de Cuba, No.1: 37-32, 1994.
58. Novoa, R.; M. Boizán. Secado de Zeolita a escala de laboratorio (III). *Revista Tecnología Química*. Santiago de Cuba, No.1: 24-29, 1995.
59. Oriol, J.; F. Aguilar. *Máquinas de transporte continuo*. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana, 1988. 232p.
60. Peishi, C.; D. Pei. A Mathematical model of drying processes. *Int.J.Heat Mass Transfer* 32(2): 297-310. 1989.
61. Pereira, A. Modelo matemático de secadores solares con chimenea. *Revista Tecnología Química*. Año 13 (2): 1-7. 1992.
62. Perrin, B.; Javelas, D. Transferts couples de chaleur et de masse dans les materiaux consolidés utilisés en Genie Civil. *Int. J.Heat Mass Transfer* 30: 297-309. 1987.
63. Perry, J. *Chemical Engineering Handbook*. 4ta Edición. Mc Graw Hill. New York, 1979.
64. Perry, J. *Chemical Engineering Handbook*. 6ta Edición. Mc Graw Hill. New York, 1985.
65. Philip, J.; De Vries, D.; Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Trans. Am. Geophys. Union* 18: 222-232. 1957.
66. Pikus, F. Método del cálculo de la cinética del calentamiento de un material húmedo fluidizado en colección transferencia de masa en sistemas dispersos. Editorial Nauta y Tiejmika. Minsk, 1965.



67. Plumb, O.; G. Spolek; B. Olmstead. Heat and Mass Transfer in Wood during drying. *Int.J. Heat Mass Transfer* 28(9): 169-178.1985.
68. Quintana, P. Consideraciones sobre la composición química elemental de las fracciones granulométricas y magnéticas de las pulpas lateríticas crudas del yacimiento Moa. *Rev. Cubana de Química*. Vol.1. No.4. 1985.
69. Quintana, R. Conferencia Sobre la Industria Cubana del Níquel. II Seminario de Perfeccionamiento de Cuadros, ISMM, Octubre 1999.
70. Ramírez, Y. Influencia de los parámetros climatológicos en el secado solar del mineral laterítico. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM, 2006. 52p.
71. Rebinder, P. Secado de materiales dispersos en la industria química. Editorial XIMIA. Moscú, 1979.
72. Rezhikov, V.; A. Guinsburg. Secado de productos alimenticios en cama fluidizante. Editorial Pischevaya Promyshlennost, Moscú, 1966.
73. Rodríguez, A. Prospección y exploración en las cortezas de intemperismo sobre ultramafitas en Nicaro y Pinares de Mayarí. Tesis Doctoral. ISMM, Moa. 1990.120p.
74. Rojas, A. Evidencias a favor de que la goethita es la principal portadora de níquel en los horizontes lateríticos de las cortezas ferroniquelíferas. *Revista Minería y Geología*. 21-31. Vol. 18. No. 3-4. 2001.
75. Rojas, A.; G. Orozco; O. Vera, A. Arderí. Caracterización mineralógica de los perfiles lateríticos del yacimiento Punta Gorda. I CONVENCIÓN CUBANA DE CIENCIAS DE LA TIERRA. La Habana, abril 2005. ISSN 0258 5979.
76. Romankov, P.; B. Rashkovskaya; V. Frolov. Procesos de transferencia de masa en las tecnologías químicas. Editorial XIMIA. Leningrado, 1975.
77. Romero, Y. Estudio experimental a escala piloto del secado solar del mineral laterítico. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM, Moa, 2006. 55p.
78. Salazar. J. Secado natural de mineral laterítico en la mina de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. ISMM. Moa. 2001.
79. Santos, Y. Estudio preliminar a escala de laboratorio del secado solar del mineral laterítico. Trabajo de Diploma. ISMM, Moa, 2005. 71p.
80. Sazhin, B. Fundamentos de la técnica del secado. Editorial XIMIA, 1984.
81. Sierra, R. Perfeccionamiento de la metodología de cálculo de los transportadores de banda. Tesis de Maestría. ISMM, Moa, 2005. 92p.
82. Sherwood, T. Secado de los sólidos. Editorial Goslesizg. Moscú, 1936.

83. Strumillo, C. Fundamentos de la teoría y práctica del secado. Editorial W.N.T. Varsovia, 1975.
84. Todd, F. Secado por aire y solar de la madera. Centro de agricultura de Louisiana State University. Estados Unidos, 2001.
85. Thomas, H; K. Morgan; R. Lewis. A Fully nonlinear analysis of heat and mass transfer problems in porous bodies. Int. J. Num. Methods Eng.15: 381-393.1980.
86. Torres, E. Investigación del arrastre de partículas en los gases durante el secado del mineral en tambores cilíndricos rotatorios. Tesis de maestría. Moa, 1999.
87. Torres, E. Modelación matemática y simulación del transporte neumático del mineral laterítico. Tesis doctoral. ISMM. Moa, 2003. 105p.
88. Torres. T.; A. Fonseca. Análisis térmico de un secador solar de tambor rotatorio para granos. Santiago de Cuba, 2001.
89. Treybal, R. Operaciones con transferencia de masa. Capítulo. XII./pág 653. 1985.
90. Vanecek, V., R. Drbohlav; M. Markvart. Secado fluidizado Editorial Leonard Hill, Londres, 1965.
91. Vera, L. Procedimiento para la determinación de las redes racionales de exploración de los yacimientos lateríticos de níquel y cobalto en la región de Moa. Tesis doctoral. ISMM, Moa, 2001. 111 p.
92. Voskresenskaya, N.; C. Cordeiro. Hallazgo de Elizabetinskita en las formaciones ocosas de la corteza de intemperismo del yacimiento Levisa, Holguin. revista Minería y Geología 3/86. pp 53-62. 1986.
93. Whitaker, S. Simultaneous heat, mass and momentum transfer and theory of drying. Adv.Heat Transfer 13: 119-203.1977.
94. Zhidko, V.; M. Boizan. Secado fluidizado de productos alimenticios. Editorial oriente. Santiago de cuba, 1986.

ANEXOS

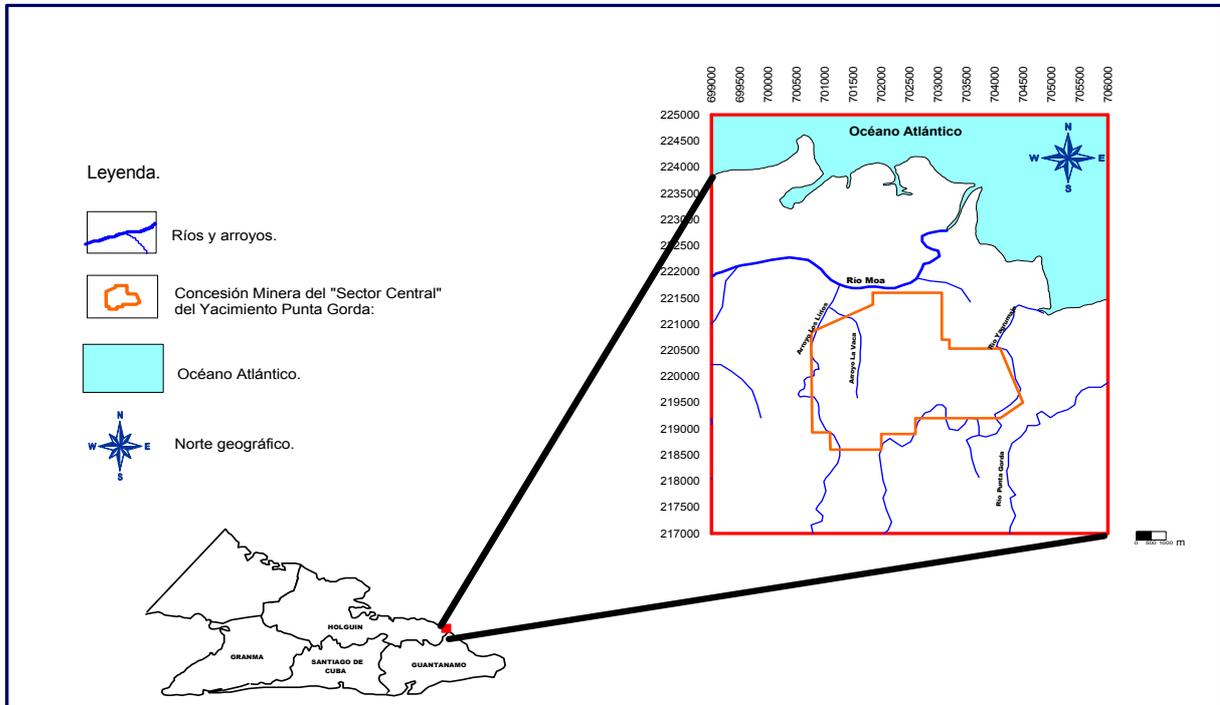


Figura 1. Mapa de ubicación geográfica del yacimiento Punta Gorda.

Fuente: De Dios et al., 2003.



Figura 2. Pilas de mineral de 1, 2 y 4 toneladas (observando desde el fondo).



Figura 3. Pila de mineral de 16 toneladas.



Figura 4. Balanza digital utilizada para el pesaje de las muestras.



Figura 5. Estufa empleada para el secado de las muestras de mineral.

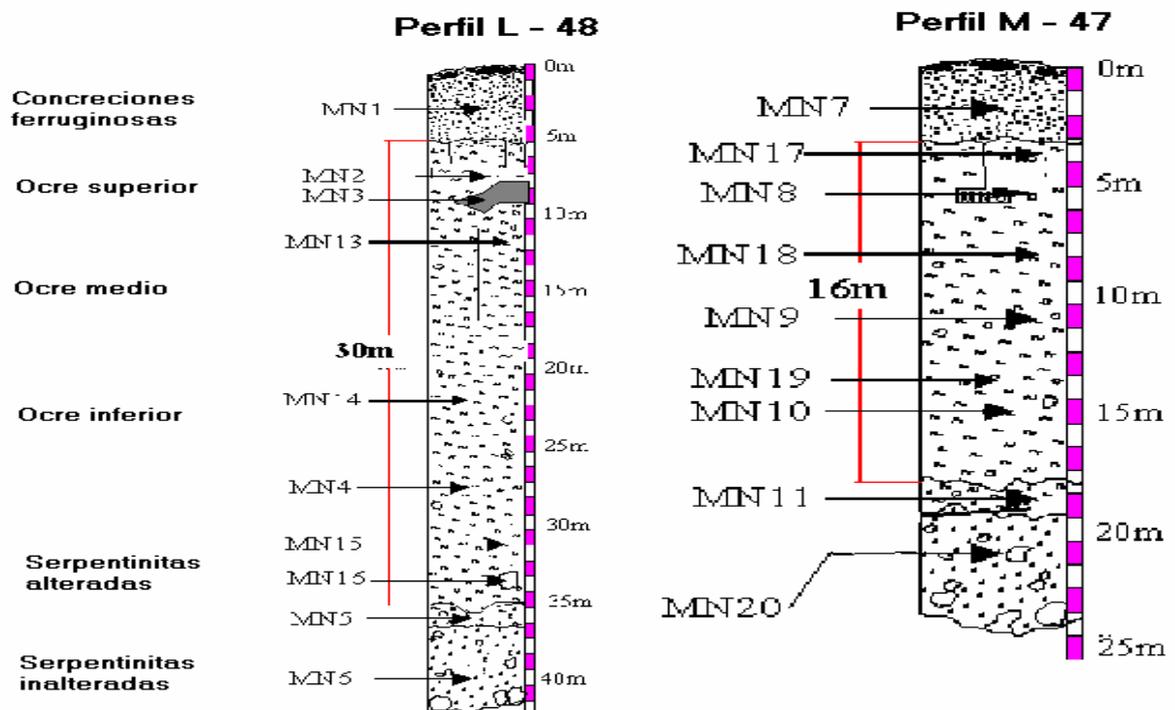


Figura 6. Esquema de los perfiles lateríticos (L-48 y M-47) del yacimiento Punta Gorda.

Observaciones: Mn1: toma de muestra. El dibujo no está realizado a escala.

Fuente: Rojas et al., 2005.

Tabla 1. Composición química por horizonte del perfil L-48 del yacimiento Punta Gorda.

Componente	Muestras						
	MN1	MN2	MN3	MN14	MN4	MN5	MN6
Contenido (%)							
SiO ₂	1,32	1,6	1,7	1,5	2	35,9	40,9
TiO ₂	0,29	0,61	0,1	0,03	0,04	0,01	0
Al ₂ O ₃	10,7	20,2	8,4	7,9	6,8	1,6	0,6
Fe ₂ O _{3T}	68,5	57,5	59,5	73,2	71,7	14,5	8,6
MnO	0,11	0,39	9,91	1,98	0,83	0,12	0,1
MgO	0,26	0,41	0,21	0,74	0,42	32,3	35,9
CaO	0,01	0,22	0,03	0,01	0,02	0,02	0,28
Na ₂ O	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06
K ₂ O	0,01	0,01	0,18	0,01	0,01	0,01	0,01
P ₂ O ₅	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Co ₃ O ₄	0,05	0,04	1,02	0,28	0,1	0,02	0,01
Cr ₂ O ₃	3,53	2,88	1,63	2,44	2,54	0,74	0,39
NiO	0,93	0,54	2,2	0,95	1,62	2,37	1,69
P.F.(1000°C)	14	15,5	14,4	10,8	13,7	12,3	11,5
(µg g ⁻¹)							
Ba	43	<40	3407	45	<40	<40	<40
Cu	132	63	168	93	101	39	<20
V	427	520	467	326	444	<30	<30
Zn	234	175	336	220	339	92	52

Tabla 2. Composición química por horizonte del perfil M-47 del yacimiento Punta Gorda.

Componente	Muestras			
	MN7	MN8	MN10	MN11
Contenido (%)				
SiO ₂	1,5	1,9	1,9	39,2
TiO ₂	0,06	0,03	0,03	0,01
Al ₂ O ₃	6,8	7,2	6,2	2,6
Fe ₂ O _{3T}	73,5	72,8	74,3	9
MnO	0,34	1,35	0,89	0,11
MgO	0,61	0,47	0,62	34,1
CaO	0,01	0,01	0,01	0,11
Na ₂ O	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06

Continuación de la Tabla 2

Componente	Muestras			
	K_2O	<0,01	0,01	0,01
P_2O_5	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Co_3O_4	0,06	0,34	0,16	0,01
Cr_2O_3	3,41	2,52	2,53	0,43
NiO	1,42	1,22	1,29	1,43
P.F.(1000°C)	12	11,9	11,8	12,9
($\mu g\ g^{-1}$)				
Ba	<40	44	<40	<40
Cu	149	144	92	<20
V	367	409	414	<30
Zn	302	491	430	52