

**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 INGENIERO MECÁNICO**

**Título: Evaluación de la transferencia de masa en el  
secado solar natural de las menas lateríticas.**

**Autor: Daykel Socarras Rey**

**Tutor: M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja**

**Moa-2009**

**“Año del 50 Aniversario del triunfo la Revolución”**



## DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

---

Yo: **Daykel Socarras Rey**, autor de este trabajo y el tutor M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja declaramos la propiedad intelectual del mismo al servicio del Departamento de Ingeniería Mecánica del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

---

Daykel Socarras Rey

---

M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja



## PENSAMIENTOS

---

*"La virtud, como el arte, se consagra constantemente a lo que es difícil de hacer, y cuanto más dura es la tarea más brillante es el éxito"*

**Aristóteles**

*"Un libro hermoso es una victoria ganada en todos los campos de batalla del pensamiento humano."*

**Balzac**

*"Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber."*

**Einstein**

*"Lo que sabemos es una gota de agua; lo que ignoramos es el océano."*

**Newton**

*"Sólo el conocimiento que llega desde dentro es el verdadero conocimiento."*

**Sócrates**



## AGRADECIMIENTOS

---

*Luchar por un porvenir mejor es el esfuerzo diario de un hombre cuando tiene una convicción segura de su futuro, reconoce el valor de aquellos que han brindado sus experiencias, conocimientos y literaturas técnicas.*

*Es por ello que dejo constancia de mi especial agradecimiento:*

*A mi tutor M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja, por su dedicación y orientación durante el desarrollo de la investigación, y por haber influido en mi formación profesional e investigativa.*

*A mis padres y mi abuela, por el apoyo que me ha brindado y la confianza que depositan en mí, por sus esfuerzos realizados en todas las esferas de la vida para que pudiera realizar este sueño, por su cariño, amor y comprensión que nunca me han faltado.*

*A mi Hermano y mi cuñada, por el apoyo que me ha brindado y la confianza depositada en mí, por sus incontables consejos de los cuales tanto he aprendido.*

*A mi novia, por su comprensión e incondicional apoyo, por sus demostraciones de amor y cariño y toda la ayuda que me ha dado durante este tiempo.*

*A mi familia y especialmente a mi primo Alberto, por su apoyo incondicional y constante preocupación respecto a mi superación profesional.*

*A todos aquellos que contribuyeron a mi formación Profesional y se me quedan sin mencionar igualmente les agradezco de todo corazón.*

*A Todos Muchas Gracias*



## DEDICATORIA

---

*Dedico este trabajo a las personas que han intervenido de cierta manera en mi preparación tanto profesional como moral.*

*A aquellos que me han hecho comprender el sentido de la vida y tanto amor y devoción aportan a mi persona, estas personas son: mis padres, mi hermano, mi cuñada y mi novia.*

*A mis amigos y familiares, tanto a los presentes como a los que infelizmente la vida no les permitió compartir este momento conmigo.*

*En fin, a todos aquellos que siempre estuvieron apoyándome para poder seguir adelante.*

*El autor.*



## RESUMEN

---

En las empresas cubanas productoras de níquel se realiza el secado de las menas lateríticas utilizando cilindros rotatorios, los cuales son grandes consumidores de energía debido al elevado contenido de humedad del mineral alimentado. En la actualidad solo se ha logrado determinar la transferencia de masa mediante métodos empíricos, demostrándose que el proceso de secado solar natural de las menas lateríticas ha sido poco estudiado desde el punto de vista teórico. En el presente trabajo se estableció el procedimiento de cálculo para la evaluación de la transferencia de masa durante el secado solar natural de las menas lateríticas, comprobándose en general una reducción del contenido de humedad en un 13% y el carácter aleatorio de la transferencia de masa, debido a la absorción de humedad por parte de las menas durante la ocurrencia de precipitaciones y en los períodos nocturnos. Se comprobó el predominio del régimen de velocidad de secado decreciente siendo el coeficiente de transferencia de masa por convección inferior a 0.01 m/s en ambas pilas. El ahorro anual de combustible asociado al proceso es 11232 toneladas, el cual al precio actual del petróleo genera utilidades a la empresa que ascienden a 3 068 245.44 USD. Finalmente se estima una reducción en las emisiones de Dióxido de carbono, Óxido nítrico, Monóxido de carbono y Dióxido de azufre, las cuales son producto de la combustión del petróleo.

**ABSTRACT**

---

In the producers Cuban nickel companies is carried out the drying of the ores lateríticas using rotational cylinders, which are big energy consumers due to the high content of humidity of the fed mineral. Nowadays it has been possible to determine the transfer of mass by means of empiric methods, being demonstrated that the process of drying natural lot of the ores lateríticas has been little studied from the theoretical point of view. In this work the procedure of calculation was settled down for the evaluation of the mass transfer during the natural solar drying of the ores lateríticas, being proven in general a reduction of the content of humidity in 13% and the random character of the mass transfer, due to the absorption of humidity on the part of the ores during the occurrence of precipitations and in the night periods. It was proven the prevalence of the regime of speed of falling drying being the coefficient of mass transfer for inferior convection to 0.01 m/s in both piles. The annual saving of fuel associated to the process is 11232 tons, which generates utilities to the company that ascend 3 068 245.44 USD to the current price of the petroleum. Finally it is considered a reduction in the emissions of carbon Dioxide, nitric Oxide, carbon Monoxide and sulphur Dioxide, which are product of the combustion of the petroleum.

**ÍNDICE**

<b>Contenido</b>	<b>Págs.</b>
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo I Marco teórico de la investigación</b>	<b>4</b>
1.1- <i>Introducción.....</i>	4
1.2- <i>Trabajos precedentes sobre el proceso de secado</i>	4
1.3- <i>Transferencia de masa en el secado</i>	13
1.4- <i>Fundamentos teóricos del secado solar</i>	15
1.5- <i>Movimiento de la humedad durante el secado</i>	18
1.6- <i>Conclusiones del capítulo I.....</i>	21
<b>Capítulo II Materiales y Métodos empleados en la investigación</b>	<b>22</b>
2.1- <i>Introducción.....</i>	22
2.2- <i>Materiales Empleados</i>	22
2.3- <i>Diseño experimental</i>	23
2.4- <i>Método de cálculo para la evaluación de la transferencia de masa durante el secado solar de las menas lateríticas</i>	25
2.5- <i>Conclusiones del capítulo II.....</i>	35
<b>Capítulo III Análisis de los resultados de la investigación</b>	<b>36</b>
3.1- <i>Introducción.....</i>	36
3.2- <i>Resultados y discusión.....</i>	36
3.3- <i>Valoración Económica</i>	47
3.4- <i>Impacto ambiental asociado al proceso de secado solar natural.....</i>	49
3.5- <i>Conclusiones del capítulo III.....</i>	51
<b>Conclusiones.....</b>	<b>52</b>
<b>Recomendaciones.....</b>	<b>53</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>54</b>
<b>Anexos</b>	<b>---</b>

## INTRODUCCIÓN

---

El aprovechamiento de la energía solar como alternativa a las energías no renovables es un área de gran desarrollo en la minería y cada vez alcanza mayor relevancia en el mundo actual, debido a que son fuentes limpias que permiten eliminar o disminuir el impacto ambiental y además puede ser una alternativa de bajo costo respecto al secado convencional.

Las condiciones ambientales y de radiación en los países tropicales como Cuba hacen el uso de la energía solar una práctica atractiva ya que las tasas de secado dependen de un número de parámetros externos variables (radiación solar, temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad de viento) y parámetros internos (contenido inicial de humedad, tipo de cultivo y masa del producto por unidad de área expuesta).

En la actualidad Cuba se encuentra inmersa en el desarrollo y modernización de la industria niquelífera, con el objetivo de aumentar su producción y a la vez disminuir sus costos por lo que no puede obviar el avance tecnológico a través de la aplicación consecuente de la ciencia y la técnica.

En Cuba existen actualmente en funcionamiento dos fábricas dedicadas a 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 niquelíferas se desarrollan complejos procesos entre ellos se encuentran en la planta de preparación de mineral los procesos de secado térmico en cilindros rotatorios y el secado solar.

En Cuba el empleo del proceso de secado solar natural de las menas lateríticas es poco aplicado pero a partir del desarrollo de la Revolución Energética en la cual el factor principal es llevar a cabo una campaña de ahorro de energía y combustible, se hace necesario implementar eficientemente dicho proceso con el que se contribuirá al incremento de la productividad de la planta y la reducción de los gastos energéticos.

Teniendo en cuenta que la energía que se consume en el proceso de secado de las menas lateríticas es el 23% del total de la energía consumida en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara (Informe económico anual de la empresa Ernesto

Che Guevara, 2006), por lo tanto, la dirección de esta empresa se ha planteado en función de disminuir dicho consumo energético la implementación del secado solar natural de las menas previo al secado en los cilindros rotatorios.

A pesar de las ventajas que genera el secado solar natural en otros materiales muy poco se ha hecho en la empresa Ernesto Che Guevara, debido a 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, y porque la variación de humedad depende de las propiedades físicas y térmicas de las menas las cuales también son dependientes de las características climatológicas de la región de Moa, que se caracteriza por presentar un microclima de constantes cambios lo cual hace que se dificulte su predicción y pronóstico. 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.

En general los procedimientos expuestos en la literatura científica tienen un carácter general y no pueden ser considerados para la predicción de la cinética del proceso de secado para las menas lateríticas.

*A partir de los aspectos antes expuestos se declara como **problema**:*

***La necesidad de evaluar el comportamiento de la transferencia de masa durante el secado solar natural de las menas lateríticas, para las condiciones de explotación de la empresa Ernesto Che Guevara.***

*Como **objeto de estudio de la investigación** se plantea:*

***El proceso de secado solar natural de las menas lateríticas.***

*El **Campo de acción** donde se desarrolla la investigación es:*

***La transferencia de masa durante el secado solar natural de las menas lateríticas.***

*La presente investigación tiene como **Objetivo:***

***Evaluar la transferencia de masa durante el secado solar natural de las menas lateríticas en la empresa Ernesto Che Guevara.***

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

***Si se realiza un análisis teórico del secado solar natural de las menas lateríticas y se conjuga con el estudio experimental del proceso, entonces se puede determinar el régimen de secado y evaluar la transferencia de masa durante el desarrollo del mismo.***

*Para dar cumplimiento al objetivo se desarrollaron las siguientes **tareas:***

- 1- Establecer el estado del arte sobre los procesos de transferencia de masa en secado convencional y solar*
- 2- Establecer el procedimiento de cálculo para la evaluación de la transferencia de masa durante el secado solar natural de las menas lateríticas.*
- 3- Calcular la transferencia de masa en el proceso objeto de estudio.*
- 4- Establecer gráficos de comportamiento relacionados con la transferencia de masa.*
- 5- Valorar el impacto económico del proceso de secado solar natural de las menas lateríticas.*
- 6- Determinar los impactos medioambientales asociados a la implementación del secado solar de las menas lateríticas.*

## CAPÍTULO I

---

### MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 1.1- Introducción

En la actualidad el aprovechamiento de la energía solar es un aspecto de vital importancia para la humanidad debido a que es una alternativa para la disminución del consumo de combustibles los cuales a causa del desarrollo industrial sus yacimientos han sido reducidos considerablemente y sus precios en el mercado mundial van en ascenso, por ello es de gran interés el estudio de la temática del secado mediante el uso de la energía solar para el desarrollo de técnicas que permitan dar solución a los problemas relacionados con este importante proceso.

El **objetivo** de este capítulo es:

Establecer los fundamentos teóricos necesarios para la evaluación de la transferencia de masa durante el proceso de secado solar natural de las menas lateríticas.

#### 1.2- Trabajos 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 a la primera tendencia se encontraron numerosos trabajos experimentales los cuales describen el comportamiento de la transferencia de calor y de masa en el secador y caracterizan 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 corresponden las menas lateríticas según la clasificación dada por Kasatkin (1987).

Philip et al. (1957), estudian las fuerzas capilares que provocan 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.

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.

Dinulescu et al. (1985), presenta un resultado analítico 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), desarrolló sistemas de ecuaciones que describen el transporte capilar y el difusivo de humedad y calor para el secado de madera, sus predicciones numéricas se basaron en funciones empíricas para pronosticar la transferencia de calor por convección en la superficie como una función del contenido de humedad de dicha superficie. Los resultados que se obtuvieron para el secado de la madera son fiables pero estos no pueden ser generalizados a las menas lateríticas debido a las diferencias en las propiedades térmicas de estos materiales.

Peishi et al. (1989), para la región húmeda tuvieron en cuenta diferentes ecuaciones matemáticas, en estas el mecanismo de transferencia es el flujo capilar de agua libre y la región de absorción 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), utilizó 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.

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 el método de elementos finitos validaron los resultados obtenidos de la técnica del volumen de control como un punto de referencia; establecieron una ligera diferencia entre los resultados de ambos métodos durante la última etapa de secado.

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 donde se puede analizar el comportamiento de la cinética del secado del producto siguiendo el modelo propuesto por Hall (1983), obteniéndose además, para diferentes temperaturas y humedad inicial los valores de humedad de equilibrio; finalmente realizaron un software para simular el proceso y predecir su comportamiento bajo determinadas condiciones de operación con todos los resultados alcanzados.

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.

### 1.2.1- 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 periodo (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  $\tau$ , 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.

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

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

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  $\tau$ .

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

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 períodos 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 período 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.

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.

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.

Retirado et al. (2007) obtiene los modelos matemáticos estadísticos que describen el comportamiento de la humedad del mineral laterítico durante el secado solar natural.

Ricardo (2008) establece un procedimiento de cálculo teórico que permite la determinación de la variación de la humedad durante el secado solar natural del mineral laterítico.

### 1.3 – Transferencia de masa en el secado

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.

La transferencia de masa entre fase sólida y móvil líquida (gaseosa o de vapor) es y se compone de dos procesos:

1. Desplazamiento de la materia a distribuir dentro de los poros del cuerpo sólido hacia la superficie divisora (o desde ella) debido al traspaso másico interno: **conductividad másica.**
2. Transporte de la misma sustancia en el líquido (gas o vapor) por traspaso másico externo

**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.

**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.

La transferencia de masa es el resultado de las difusiones externas e internas (Madariaga, 1995).

El transporte de la materia en una capa inmóvil de material sólido es de por sí un proceso no estacionario, lo que condiciona el carácter específico de las operaciones para la transferencia de masa con fase sólida en comparación con la misma en los sistemas de gas (vapor) – líquido y líquido – líquido.

El calor se transfiere de más a menos temperatura por lo tanto independientemente del mecanismo de transferencia que se analice 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 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).

#### **1.4- Fundamentos teóricos del secado solar**

El secado solar o natural aplicado a las menas lateríticas hasta la actualidad se realiza en la mina de la empresa y en la planta de preparación de mineral a la intemperie, debido a lo cual este proceso presenta un gran inconveniente: el carácter periódico de la radiación solar y la variación de la intensidad de la radiación incidente en función del tiempo, siendo ésta una circunstancia que requerirá una estrategia de diseño y control adecuada para posibilitar el secado efectivo. Para su total comprensión es necesario establecer los parámetros más influyentes en el secado solar.

A través de la consulta a los trabajos precedentes de la temática podemos decir que los parámetros de los cuales depende directamente la humedad final de las menas lateríticas son los siguientes:

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

#### **Ventajas del secado natural de las menas**

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

## Desventajas

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

## Características que debe cumplir el patio para el secado solar natural

- **Piso nivelado:** permite el secado uniforme de las menas 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 la mena 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 de las menas, 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.

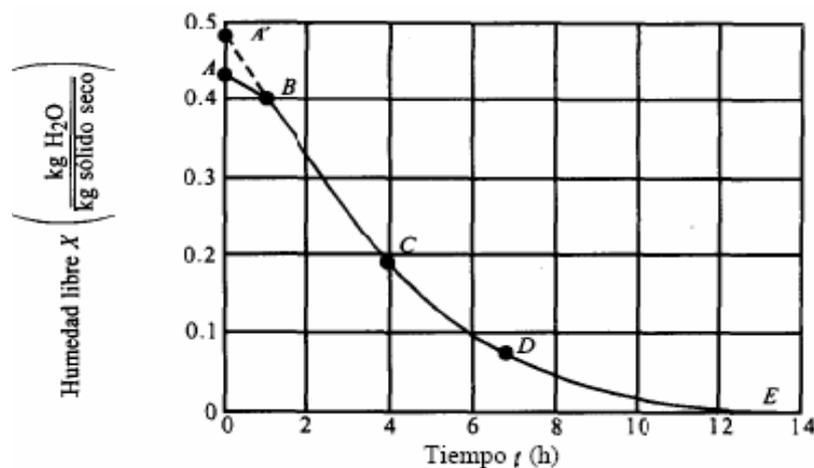
Por tanto y como se ha puesto de manifiesto, la aplicación del proceso de secado solar natural implica un proceso de estudio e investigación adecuado a las características de las menas lateríticas y a la zona geográfica en cuestión.

### 1.4.1- Principios técnicos del secado

El proceso de secado no es más que eliminar el agua de la superficie del producto a través de la evaporación y transferirla al aire circundante. La rapidez de este proceso depende de la velocidad con que el aire fluya alrededor de las menas, del grado de sequedad del mismo y de las características físico- mecánicas de las menas (composición química, mineralógica, contenido de humedad y tamaño de las partículas).

El aire que circula alrededor de las menas además de poseer un por ciento de agua tiene la capacidad de 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 deseca rápidamente. Cuanto mayor sea el flujo de aire más rápidamente se eliminará el agua del producto a secar (Sazhin, 1984).

La cinética de secado de las menas es la variación de la humedad respecto al tiempo (Treybal, 1995). La intensidad de evaporación se determina a través de la velocidad de secado, que es el cambio de humedad (base seca) en el tiempo. La migración de agua desde la mena al medio exterior depende de su contenido de agua y de su composición química, de la temperatura y humedad relativa ambiente (Brennan et.al., 1980; Cheftel, 1992; Felows, 1994). En el proceso de secado se puede construir una gráfica que relacione la cantidad de agua con respecto del tiempo; se construye registrando la pérdida de peso en intervalos iguales de tiempo hasta que se logra eliminar la mayor parte de agua posible (Geankoplis, 2004). Una gráfica típica se muestra en la figura 1.1



**Figura 1.1-** Gráfica de datos de humedad libre en función del tiempo.

**Fuente:** Geankoplis, 2004.

En la gráfica de contenido de humedad respecto al tiempo se pueden distinguir fases importantes que caracterizan el proceso de secado:

**1. Estabilización.** Del punto A al punto B las condiciones del aire se equilibran con la superficie de la mena (esta superficie alcanza la temperatura de bulbo húmedo. (Brennan et.al., 1980).

**2. Fase de velocidad constante.** Compreendida entre el punto B y C, el agua migra a la misma velocidad que se produce la evaporación. La mena permanece húmeda. En el punto C se presenta la humedad crítica, que depende de la temperatura y velocidad de aire. El aire debe tener una temperatura moderadamente elevada, baja humedad relativa y una velocidad elevada. Durante éste periodo se elimina la humedad no ligada. (Lund, 1992).

**3. Segunda fase de velocidad constante.** Del punto C al D las áreas húmedas de la superficie se vuelven completamente secas. (Lund, 1992).

**4. Fase de velocidad decreciente.** La velocidad de pérdida de humedad disminuye considerablemente, alargándose el tiempo de remoción de agua, en este periodo influye la temperatura del aire, el grosor y la humedad relativa de la mena, al final del proceso de secado, este llega a alcanzar la temperatura de bulbo seco (Brennan et.al., 1980).

### **1.5 – Movimiento de humedad durante el secado**

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 de secado de las menas húmedas bajo la acción del calor, en la superficie del material se forma una película de vapor de agua; si la presión de este vapor es mayor que la presión del vapor de agua en el medio circundante, entonces se produce la difusión del vapor hacia el medio y la humedad es eliminada de la superficie del material. Durante este proceso, la humedad de la mena sobre la superficie

disminuye y en el interior de él surge una diferencia de humedad que estará relacionada con la unidad de longitud por la normal (gradiente de humedad  $\Delta\omega$ ). Este gradiente constituye el indicador de la velocidad de movimiento de la humedad en el material. En presencia del gradiente de humedad en el material comienza el traslado de la humedad, que recibe el nombre de conductor de humedad.

El coeficiente de conducción de la humedad  $k$ , cuando los valores de humedad del material que se deseca son grandes, no depende de esta; pero con la disminución de la humedad dicho coeficiente también disminuye. Con el aumento de la temperatura de la mena, el coeficiente  $k$  de conducción de la humedad se incrementa (Rudenko y Shemajanov, 1984).

Por consiguiente, el proceso de traslado de la humedad en el interior de las menas se determina por las características termofísicas de este, por la porosidad, estructura y forma de la unión de la humedad con el esqueleto de las menas. Este proceso se encuentra en la correlación con el desplazamiento exterior y con el intercambio térmico.

Cuando se produce la eliminación del agua combinada sólidamente en el material, el desplazamiento de la humedad en su interior llega a ser un factor determinante en el proceso de secado.

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 sorción. 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 sorción 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 natural de las menas 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.

Cuando se produce la evaporación superficial, debe haber una migración de la humedad desde las profundidades del sólido hacia la superficie. En las menas lateríticas 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.

#### **1.6- Conclusiones del capítulo I**

- El desarrollo del marco teórico de la investigación permitió establecer los fundamentos técnicos necesarios para la comprensión y el estudio del proceso de transferencia de masa en el secado solar natural de las menas lateríticas.
- Desde el punto de vista teórico experimental el proceso de secado solar natural de las menas lateríticas ha sido poco estudiado y los trabajos existentes relacionados con la temática no tienen en cuenta el fenómeno de intercambio de masa presente en dicho proceso.

## CAPÍTULO II

---

### MATERIALES Y MÉTODOS EMPLEADOS EN LA INVESTIGACIÓN

#### 2.1- Introducción

Debido a la gran complejidad del estudio del proceso de secado solar natural de las menas lateríticas es de vital importancia establecer un sistema de ecuaciones que permita determinar los factores que intervienen en dicho proceso y describir su comportamiento.

Teniendo en cuenta que las variables fundamentales que caracterizan este proceso experimentan cambios sistemáticos, resulta difícil pronosticar su comportamiento por vías analíticas puras por lo que es necesario acudir a los métodos empíricos o semi-empíricos, por lo tanto el **objetivo** del capítulo es:

Establecer el procedimiento de cálculo para la evaluación de la transferencia de masa en las menas lateríticas durante el proceso de secado solar natural.

#### 2.2- Materiales empleados

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, entre otros). Todos formaron parte de las pruebas de humedad.

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, velocidad y dirección del viento, precipitaciones.

### **2.2.1- 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.

### **2.2.2- Instalación experimental para el estudio de la humedad**

Para el experimento las pilas se formaron con minerales de los perfiles L48 y M47, se extrajeron 150 kg de menas lateríticas 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.

## **2.3- Diseño experimental**

### **2.3.1- Selección de las variables**

De acuerdo con los trabajos consultados (Estenoz et al., 1997; Salazar, 2001; Retirado et al., 2007; Retirado et al., 2009) el secado solar natural de la menas lateríticas depende de varios parámetros (epígrafe 1.4).

Las variables medidas de forma directa en las pilas de mena depositada son: masa de menas a secar, humedad inicial de las menas, ángulo de talud natural, humedad final de las menas. Las restantes se obtuvieron de acuerdo con la estación meteorológica de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

### **Masa de menas lateríticas a secar**

Para el estudio a escala de laboratorio se utilizaron dos pilas de mineral, una de 100 kg y otra de 50 kg. Se experimentaron con dos valores diferentes para determinar la influencia que tiene la masa de menas a secar en la transferencia de humedad durante el proceso.

### **Humedad inicial de las menas**

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 realizado (Tabla 3.1), las mediciones se realizaron tomando una muestra de cada pila de mena laterítica depositada.

### **Humedad final de las menas**

Para analizar el comportamiento de esta variable en los días de experimentación se hicieron mediciones de humedad como se ilustra en la Tabla 3.1 por cada pila de MENA depositada, las mediciones muestran el comportamiento del secado (o la absorción de humedad) para las diferentes masas de menas. En ambos casos (humedad inicial y final) se determinaron por el método de diferencia de pesadas.

Las variables climatológicas (temperatura del aire;  $T_a$ , velocidad del aire;  $V_a$ , precipitaciones;  $P$ ), 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 3.1.

### **2.3.2- Número de corridas experimentales**

Para el experimento se realizaron 24 mediciones para el análisis de la humedad de las dos pilas formadas. 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).

### 2.3.3- Técnica experimental para la prueba de humedad

El proceso de medición de la humedad de las menas lateríticas se realizó por el método tradicional de diferencias de pesadas, dada su confiabilidad para los resultados, además de su sencillez y fácil aplicación (Miranda, 1996). Para determinar el contenido de humedad se tomaron 100 g de muestras de las capas superficiales del depósito de lateritas. Posteriormente se sometieron al secado durante cinco horas en estufa a una temperatura de 105 °C, luego se enfriaron en una desecadora, pesándose la muestra seca. Con estos valores se procede a determinar el contenido de humedad empleando la expresión de Martínez-Pinillos (1997):

$$H = \frac{\omega_I - \omega_F}{\omega_I} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Donde:

$H$ : contenido de humedad; (%).

$\omega_I$  masa inicial de la muestra; (g).

$\omega_F$  : masa final de la muestra; (g).

### 2.4- Método de cálculo para la evaluación de la transferencia de masa durante el secado solar de las menas lateríticas

El procedimiento de cálculo establecido en el presente trabajo (excepto para la determinación del área de transferencia de masa) es reportado por Rudenko y Shemajanov (1984) para el análisis de los procesos de secado y particularizado por el autor para las menas lateríticas.

En el proceso de secado se produce la eliminación de la humedad del material y el cambio de la masa de éste; por lo tanto, la cantidad de masa absoluta del material seco se calcula por la expresión:

$$M_{m.s} = M_1 \frac{100 - \omega_1}{100} \quad (2.2)$$

Siendo:

$$M_2 = M_1 \frac{100 - \omega_1}{100 - \omega_2} \quad (2.3)$$

Donde:

$M_1$ : cantidad de material que se somete al secado; (kg)

$M_2$ : cantidad de material después de comenzado el proceso de secado; (kg)

$\omega_1$ : humedad inicial del material; (%)

$\omega_2$ : humedad final del material; (%)

En el proceso de secado siempre tiene lugar alguna pérdida del material que se seca como consecuencia del arrastre de las partículas finas del material con el agente desecante, de acuerdo con esto la cantidad de material que se seca extraído ( $M_2$ ) que se obtiene prácticamente es menor y se le considera ( $M_{2real}$ ).

$$M_{2real} = \zeta \cdot M_1 \frac{100 - \omega_1}{100 - \omega_2} \quad (2.4)$$

Donde:

$\zeta$ : coeficiente menor que la unidad (para la menas lateríticas se puede asumir 0.99).

La cantidad de humedad que se evapora (kg) será:

$$W = M_1 - M_2 = \frac{M_1 \cdot \omega_1 - M_2 \cdot \omega_2}{100} \quad (2.5)$$

De aquí que:

$$W = M_1 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_2} \quad (2.6)$$

$$W = M_2 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_1} \quad (2.7)$$

Relacionando la humedad del material con su masa seca absoluta se obtiene:

$$\frac{M_{m.s} \cdot \omega_1^S}{100} = \frac{M_1 \cdot \omega_1}{100} \quad (2.8)$$

Siendo:

$$\omega_1^S = \frac{M_1}{M_{m.s}} \omega_1 \quad (2.9)$$

$$\frac{M_{m.s} \cdot \omega_2^S}{100} = \frac{M_2 \cdot \omega_2}{100}$$

Sustituyendo la ecuación 2.2 en la 2.9 se obtiene:

$$\omega_1^S = \frac{100}{100 - \omega_1} \omega_1 \quad (2.10)$$

Donde:

$\omega_1^S$ : humedad inicial del material en relación con su masa seca absoluta; (%)

$$\omega_2^S = \frac{100}{100 - \omega_2} \omega_2 \quad (2.11)$$

Donde:

$\omega_2^S$ : humedad final del material en relación con su masa seca absoluta; (%)

### Densidad del flujo de humedad

En presencia del gradiente de humedad en el material comienza el traslado de la humedad, que recibe el nombre de conductor de humedad. La densidad del flujo de humedad  $i$ , es decir, la cantidad de humedad trasladada en el interior del material en la unidad de tiempo a través de la unidad de la superficie según Likov (1968) se determina por la ecuación:

$$i_{\omega} = -K \cdot \rho_s \cdot \nabla \omega \quad (2.12)$$

Donde:

$i_{\omega}$  : densidad del flujo de humedad; (kg/m<sup>2</sup> h)

$\nabla \omega$  : gradiente de humedad. (1/m)

$K$  : coeficiente de conducción de la humedad; (m<sup>2</sup>/h)

$\rho_s$  : densidad de la masa de material seco en términos absolutos; (Kg/m<sup>3</sup>).

Como consecuencia del calentamiento del material, el desplazamiento de la humedad (al producirse la desecación) ocurre también producto al gradiente de temperatura  $\Delta t$ , al mismo tiempo la humedad se traslada desde las capas más calientes hacia las menos calientes.

La densidad de flujo de la humedad  $i_t$  que depende del gradiente de temperatura se determina por la ecuación:

$$i_t = K \cdot \rho_s \cdot \delta \cdot \nabla t \quad (2.13)$$

Donde:

$i_t$  : densidad del flujo de la humedad; (kg/m<sup>2</sup> h)

$\delta$  : coeficiente térmico de conducción de la humedad; (1/°C).

$K$  : coeficiente de conducción de la humedad; (m<sup>2</sup>/h).

$\rho_s$  : densidad de la masa de material seco en términos absolutos; ( Kg/m<sup>3</sup>)

$\nabla t$  : variación de la temperatura del material; (°C/m).

El Flujo total de humedad (kg/m<sup>2</sup> h) será

$$i = -K \cdot \rho_s (\nabla \omega \pm \delta \cdot \nabla t) \quad (2.14)$$

Si el gradiente  $k$  y  $\delta$  alcanza magnitudes constantes, no dependientes de la humedad del material, entonces de la expresión 11 se obtendrá la ecuación diferencial del intercambio de humedad en el interior del cuerpo poroso según Likov (1968)

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = k_u \cdot (\nabla^2 \cdot u + \delta \cdot \nabla^2 \cdot T) \quad (2.15)$$

Siendo:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.16)$$

Donde:

$\nabla^2$  : operador de Laplace en el sistema de coordenadores rectangulares.

$u$ : contenido de humedad del material en el punto de coordenada  $x, y, z$  en el instante  $\tau$ .

$T$  : temperatura del material bajo los parámetros señalados anteriormente.

Al sustituir la ecuación 2.16 en la expresión 2.15 se obtiene:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = k_u \cdot \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \delta \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \right] \quad (2.17)$$

De la integración de la ecuación anterior se obtiene la expresión de cálculo (2.18) para determinar la velocidad de evaporación.

### Velocidad de evaporación o régimen de secado

La determinación de la velocidad de evaporación o régimen de secado se realiza a través de la siguiente ecuación:

$$z = \frac{W}{A \cdot \tau} = \frac{M_{m.s}}{A} \frac{\Delta \omega^S}{\tau} \quad (2.18)$$

Donde:

$z$  : velocidad de evaporación; ( $\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}$ )

$W$  : cantidad total de humedad evaporada; (Kg)

$A$  : superficie geométrica del material sometido al secado; ( $\text{m}^2$ )

$M_{m.s}$  : masa del material seco; (kg)

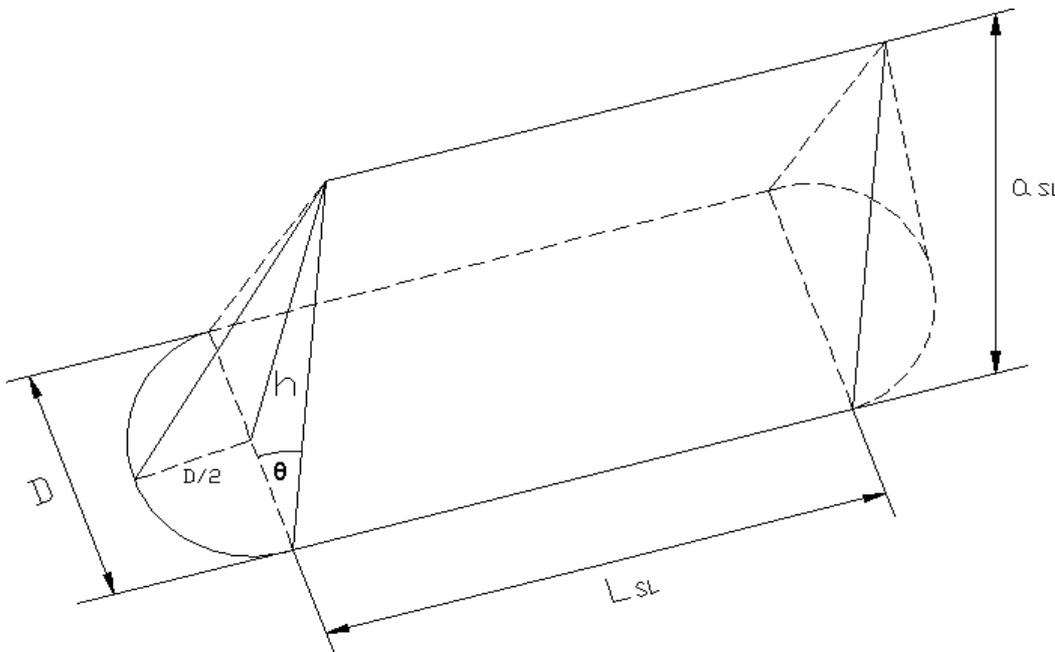
$\tau$  : duración del proceso de secado; (h)

$\Delta \omega^s$ : cantidad de humedad evaporada del material en el tiempo; (kg/kg de masa seca).

Debido a que la superficie del material en el proceso de secado disminuye como consecuencia del asentamiento, es necesario tomar el valor de  $A$  como una magnitud media (para el comienzo y final del estado del material durante el secado) en el tiempo.

### Determinación del área de transferencia de masa

Según Retirado (2009) para obtener el área de transferencia de calor y masa ( $A$ ) en una pila de menas lateríticas se consideran las áreas laterales y frontales presentes en la misma, considerando que las primeras corresponden a superficies rectangulares y las segundas a superficies cónicas, en correspondencia con la Figura 2.2.



**Figura 2.2** Área de transferencia de masa

Luego la expresión de cálculo es:

$$A = 2 \cdot A_{SL} + A_C \quad (2.19)$$

Donde:

$A_{SL}$ : área de la superficie lateral; ( $m^2$ )

$A_C$ : área lateral del cono formado entre los dos extremos de la pila de menas lateríticas; ( $m^2$ )

Teniendo en cuenta que las superficies laterales son rectangulares, las áreas pueden ser calculadas por la expresión 2.20

$$A_{SL} = a_{SL} \cdot l_{SL} \quad (2.20)$$

Donde:

$a_{SL}$ : ancho de la superficie lateral de la pila; (m)

$l_{SL}$ : longitud de la superficie lateral de la pila; (m)

Aplicando trigonometría se obtiene que:

$$\cos \theta = \frac{D}{2 \cdot a_{SL}} \quad (2.21)$$

Despejando

$$a_{SL} = \frac{D}{2 \cdot \cos \theta} \quad (2.22)$$

Donde:

$D$ : ancho de la base de la pila de menas lateríticas; (m)

$\theta$ : ángulo de talud natural de las menas lateríticas; (grados)

Sustituyendo la ecuación 2.22 en la 2.20 se obtiene:

$$A_{SL} = \frac{D}{2 \cdot \cos \theta} \cdot l_{SL} \quad (2.23)$$

Luego el área lateral del cono formado por los extremos de la pila de menas lateríticas se determina por la ecuación 2.24.

$$A_c = \pi \cdot \frac{D}{2} \cdot \sqrt{\frac{D^2}{4} + h^2} \quad (2.24)$$

Donde:

$h$  : altura de la pila de menas lateríticas; (m)

Sustituyendo las expresiones 2.23 y 2.24 en la ecuación 2.19 se obtiene:

$$A = \frac{D}{\cos \theta} \cdot l_{SL} + \left( \pi \cdot \frac{D}{2} \cdot \sqrt{\frac{D^2}{4} + h^2} \right) \quad (2.25)$$

El parámetro  $D$  puede ser calculado en función del ángulo de talud natural de las menas lateríticas ( $\theta$ ) y la altura de la pila ( $h$ ), luego:

$$\tan \theta = \frac{h}{D/2} \quad (2.26)$$

Despejando se obtiene:

$$D = \frac{2 \cdot h}{\tan \theta} \quad (2.27)$$

Sustituyendo la ecuación 2.27 en la 2.25 resulta:

$$A = \frac{2 \cdot h}{\tan \theta} \cdot \frac{l_{SL}}{\cos \theta} + \left( \pi \cdot \frac{h}{\tan \theta} \cdot \sqrt{\frac{h^2}{\tan^2 \theta} + h^2} \right) \quad (2.28)$$

La expresión 2.28, obtenida para el proceso analizado, permite calcular el área total de transferencia de masa en una pila de menas lateríticas formada simétricamente con altura  $h$ , longitud de la superficie lateral  $l_{SL}$  y ángulo de talud natural  $\theta$  para el valor promedio de las mediciones realizadas por Retirado (2007).

### Velocidad media de secado en 1kg/h para 1 kg de material seco

La cantidad de humedad evaporada se relaciona con la cantidad de masa seca absoluta del material, obteniendo la velocidad media de secado 1kg/ (kg hr) para 1 kg de material seco la cual se expresa por la siguiente ecuación:

$$Z = \frac{W}{M_{m.s} \cdot \tau} = \frac{\Delta\omega^S}{\tau} \quad (2.29)$$

Si  $\tau \rightarrow 0$ , entonces

$$Z = \lim \frac{\Delta\omega^S}{d\tau}$$

Las magnitudes  $z$  y  $Z$ , que caracterizan la velocidad de secado, están relacionadas mediante la expresión:

$$z = Z \frac{M_{m.s}}{A} = \frac{d\omega^S}{d\tau} \frac{M_{m.s}}{A} \quad (2.30)$$

### Duración del proceso de secado

Conociendo la velocidad media de secado ( $z$ ), se puede determinar también la duración del proceso ( $\tau$ ). Para el secado solar natural de las menas lateríticas el tiempo de secado es conocido.

$$\tau = \frac{W}{z \cdot A} = \frac{W}{Z \cdot M_{m.s}} \quad (2.31)$$

### Coeficiente de transferencia de masa por convección en el secado solar natural de las menas lateríticas

Número de Sherwood

$$Sh = \frac{h_m \cdot L}{D_{AB}} = C \cdot \text{Re}_L^x \cdot \text{Sc}^n \quad (2.32)$$

$$Sh = f_7 \cdot (x^*, \text{Re}_L, \text{Sc})$$

Los coeficientes  $C$ ,  $x$  y  $n$  son constantes que varían con el material y las condiciones en que se desarrolla la convección.

### Flujo Laminar

$$Sh_x \equiv \frac{h_{m,x} \cdot L_{SL}}{D_{AB}} = 0,332 \cdot Re_x^{1/2} \cdot Sc^{1/3} \quad (2.33)$$
$$Sc \geq 0,6$$

### Flujo turbulento

El número de Sherwood local es

$$Sh_x = St_m \cdot Re_x \cdot Sc = 0,0296 \cdot Re_x^{4/5} \cdot Sc^{1/3} \quad (2.34)$$
$$0,6 < Sc < 3000$$

### Condiciones de mezcla para la capa límite

$$\bar{Sh}_L = 0,037 \cdot Re_L^{4/5} \cdot Sc^{1/3} \quad (2.35)$$

Los números de Reynolds y Schmidt se determinan por las expresiones 2.36 y 2.37 respectivamente

$$Re = \frac{V_a \cdot L_{SL}}{\nu_a} \quad (2.36)$$

$$Sc \equiv \frac{\nu}{D_{AB}} \quad (2.37)$$

Por lo tanto

$$h_m = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{L_{SL}} \quad (2.38)$$

Donde:

$h_m$ : coeficiente de transferencia de masa por convección; (m/s).

$L_{SL}$  : longitud de la superficie de secado; (m)

$D_{AB}$  : propiedad de la mezcla binaria conocida como coeficiente de difusión de la mezcla binaria; ( $m^2/s$ )

$V_a$  : velocidad del aire; (m/s)

$\nu_a$  : coeficiente cinemático de viscosidad del aire; ( $m^2/s$ )

$Sc$  : número de Schmidt; (adimensional)

$Re$ : número de Reynolds; (adimensional).

## 2.5- Conclusiones del capítulo II

- Se estableció el procedimiento de cálculo para la evaluación de la transferencia de masa durante el secado solar de las menas lateríticas. El mismo conjuga los aspectos teóricos y empíricos establecidos en investigaciones precedentes.
- La expresión 2.28 que permite determinar el área de transferencia de calor y masa se obtiene de investigaciones precedentes realizadas a pilas de menas lateríticas formadas simétricamente con altura  $h$ , longitud de la superficie lateral  $l_{SL}$  y ángulo de talud natural ( $\theta$ ).

## CAPÍTULO III

### ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1- Introducción

El desarrollo de investigaciones relacionadas con la explotación de las fuentes de energías naturales como la solar, la eólica, entre otras es un aspecto de vital importancia para la industria minero metalúrgica de la región de Moa, debido a que estas energías son naturales y disminuyen el impacto ambiental negativo que ejerce dicha industria sobre la región, por lo tanto el objetivo del capítulo es:

Analizar los resultados obtenidos considerando el impacto económico y medioambiental asociado al secado solar natural de las menas lateríticas.

#### 3.2- Resultados y discusión

##### 3.2.1- Determinación de la humedad de las menas lateríticas sometidas a secado solar natural

El estudio experimental que se expone a continuación se basó esencialmente en el análisis de la humedad de las menas lateríticas durante el proceso de secado solar natural, para ello se tuvo en cuenta la influencia de las variables seleccionadas en el epígrafe 2.3.1 (selección de las variables)

En la Tabla 3.1 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 3.1** Valores de la humedad de las menas en correspondencia con la variación de los parámetros climatológicos.

Exp.1	Días	Hora	Humedad de las menas (%)	T <sub>a</sub> (°C)	R <sub>s</sub> (W/m <sup>2</sup> )	V <sub>a</sub> (m/s)	Dir. aire	P (mm)	H <sub>r</sub> (%)	T <sub>pr</sub> (°C)
	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

<b>Pila 1</b> <b>100kg</b>	1	4:00 PM	<b>35</b>	32,4	536	1,3	N	0	67	25,5
	2	8:00 AM	<b>37</b>	28,1	70,0	1,8	SSE	0	75	23,3
	2	10:00 AM	<b>34</b>	30	529	2,7	ENE	0	69	23,7
	2	2:00 PM	<b>31</b>	31,4	244	3,1	ENE	0	74	26,3
	2	4:00 PM	<b>29</b>	30,9	145	2,7	ESE	0	71	25,0
	3	8:00 AM	<b>40</b>	24,8	174	0,4	E	12,5	77	22,6
	3	10:00 AM	<b>38</b>	28,1	605	1,3	E	0	71	22,4
	3	2:00 PM	<b>33</b>	31,6	980	2,2	NE	0	61	23,1
	3	4:00 PM	<b>30</b>	32,4	648	2,2	ENE	0	59	23,3
	4	8:00 AM	<b>32</b>	27,6	158	0,0	SSE	0	69	21,4
	4	10:00 AM	<b>30</b>	30,4	602	2,7	ENE	0	64	22,8
	5	8:00 AM	<b>28</b>	28,1	164	0,1	SE	0	66	21,1
5	2:00 PM	<b>26</b>	33,8	695	3,1	E	0	62	25,6	
<b>Pila 2</b> <b>50kg</b>	1	8:00 AM	<b>38</b>	27,9	152	0,0	WSW	0	75	23,1
	1	10:00 AM	<b>36</b>	30,2	596	1,3	NNE	0	68	23,7
	1	2:00 PM	<b>34</b>	32,9	556	1,8	ENE	0	62	24,7
	2	8:00 AM	<b>34</b>	28,7	168	0,9	S	0	72	23,1
	2	10:00 AM	<b>30</b>	31,3	586	2,2	ENE	0	67	24,5
	2	2:00 PM	<b>28</b>	33,9	919	2,7	ENE	0	65	26,4
	3	8:00 AM	<b>30</b>	30,1	149	1,3	SE	0	72	24,4
3	11:00 AM	<b>25</b>	32,3	775	3,6	ENE	0	70	26,1	

**Fuente:** Retirado et al., 2007

La humedad de las menas lateríticas depende considerablemente del comportamiento de los parámetros climatológicos expuestos en la Tabla 3.1. A medida que aumenta la temperatura del aire se intensifica el proceso de secado de las menas. Con la disminución de la humedad relativa y el incremento de la radiación solar y de la velocidad del aire, el proceso de desorción de la humedad se hace más intenso. Además, en ciertos horarios la velocidad de secado aumenta y en otros disminuye.

La evaporación de la humedad se intensifica en el horario 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 esta. 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 varía con el tiempo en función de la hora del día.

Debido al rechazo en la noche del calor almacenado durante el día 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 se enfría 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 de las menas, es por ello que en horas de la mañana las menas tienen un contenido de humedad similar o mayor al de la última medición realizada el día anterior.

Por otra parte la disminución de la humedad no es un fenómeno ajeno a la velocidad del aire ya que mientras más intensa y constante sea ésta, mayor capacidad tendrá de arrastrar la masa de vapor de agua que se encuentra alrededor y en la superficie de las pilas. Por otra parte, el factor que más influye en el aumento de la humedad de las menas es la ocurrencia frecuente de precipitaciones.

### 3.2.2- Resultados de la Transferencia de masa

La transferencia de masa en el secado es un proceso de mucha importancia por cuanto permite conocer en que medida ocurre la desorción de la humedad durante el desarrollo del proceso de secado. Para la obtención de los resultados que se muestran en las Tablas 3.2-3.5 se emplearon los software Microsoft Excel 2003 y Mathcad Professional 2001.

**Tabla 3.2** Resultados del coeficiente de transferencia de masa para la pila 1

H (%)	Ta (°C)	Va (m/s)	L (m)	Re adimensional	Sc adimensional	Sh adimensional	hm (m/s)	Ecuación Utilizada
39	25,7	1,3	1,8	136864,52	0,6576	330,86	0,00477	Re (2.36)
38	28,8	2,2	1,8	232987,77	0,6537	505,38	0,00730	
36	31,7	2,2	1,8	235778,84	0,6460	508,20	0,00734	
35	32,4	1,3	1,8	140163,40	0,6421	334,56	0,00483	
37	28,1	1,8	1,8	191761,36	0,6498	431,62	0,00623	Sc (2.37)
34	30,0	2,7	1,8	292873,41	0,6382	602,05	0,00869	
31	31,4	3,1	1,8	342490,98	0,6266	678,19	0,00979	
29	30,9	2,7	1,8	302028,44	0,6189	610,76	0,00882	

<b>40</b>	24,8	0,4	1,8	41865,82	0,6615	128,51	<b>0,00185</b>	<b>Sh</b> (2.34)
<b>38</b>	28,1	1,3	1,8	137674,59	0,6537	331,77	<b>0,00479</b>	
<b>33</b>	31,6	2,2	1,8	240093,13	0,6344	512,52	<b>0,00740</b>	
<b>30</b>	32,4	2,2	1,8	244568,24	0,6228	516,95	<b>0,00746</b>	
<b>32</b>	27,6	0,1	1,8	10980,30	0,6305	43,35	<b>0,00062</b>	<b>hm</b> (2.38)
<b>30</b>	30,4	2,7	1,8	300151,93	0,6228	608,98	<b>0,00879</b>	
<b>28</b>	28,1	0,1	1,8	11256,61	0,6150	43,86	<b>0,00063</b>	
<b>26</b>	33,8	3,1	1,8	336466,05	0,6379	672,59	<b>0,00971</b>	

Los resultados de la transferencia de masa para la pila 2 se obtienen de forma análoga a la pila 1 y se muestran en la tabla 3.3

**Tabla 3.3** Resultados del coeficiente de transferencia de masa para la pila 2

<b>H (%)</b>	<b>Ta (°C)</b>	<b>Va (m/s)</b>	<b>L (m)</b>	<b>Re adimensional</b>	<b>Sc adimensional</b>	<b>Sh adimensional</b>	<b>hm (m/s)</b>	<b>Ecuación Utilizada</b>
<b>38</b>	27,9	1,3	1,8	146428,09	0,6146	341,45	<b>0,00493</b>	<b>Re</b> (2.36)
<b>36</b>	30,2	2,2	1,8	244264,71	0,6235	516,66	<b>0,00746</b>	
<b>34</b>	32,9	2,2	1,8	240239,66	0,6340	512,66	<b>0,00741</b>	<b>Sc</b> (2.37)
<b>34</b>	28,7	1,3	1,8	140617,39	0,6400	335,06	<b>0,00484</b>	
<b>30</b>	31,3	1,8	1,8	198498,03	0,6278	438,63	<b>0,00634</b>	<b>Sh</b> (2.34)
<b>28</b>	33,9	2,7	1,8	293051,07	0,6379	602,22	<b>0,00870</b>	
<b>30</b>	30,1	3,1	1,8	344404,90	0,6231	679,95	<b>0,00982</b>	<b>hm</b> (2.38)
<b>25</b>	32,3	2,7	1,8	295923,20	0,6317	604,96	<b>0,00874</b>	

Al analizar los resultados en las Tablas 3.2 y 3.3 se aprecian en general elevados valores de números de Reynolds para las pilas 1 y 2, sin embargo el coeficiente de transferencia de masa por convección es pequeño y en ninguno de los cálculos es superior a 0.01 m/s, este comportamiento permite explicar la lenta desorción de la humedad en el proceso analizado.

De los resultados obtenidos para el coeficiente de transferencia de masa por convección también se infiere el comportamiento aleatorio que presenta respecto a la humedad, lo que puede ser atribuible al gran número de parámetros termodinámicos y físicos que influyen sobre el mismo.

**Tabla 3.4** Resultados del régimen de secado para la pila 1

H (%)	A (m <sup>2</sup> )	$\tau$ (h)	M <sub>1</sub> (kg)	M <sub>2</sub> (kg)	M <sub>ms</sub> (kg)	W (kg)	W <sub>1</sub> <sup>s</sup> (%)	W <sub>2</sub> <sup>s</sup> (%)	z (kg/m <sup>2</sup> h)	Z (kg/kg h)	Ecuación Utilizada
39	2,601	0	100,00								A (2.28)
38	2,601	2	100,00	98,38	61,00	1,61	63,93	61,29	0,310	0,013	
36	2,601	4	97,40	94,35	60,39	3,04	61,29	56,25	0,293	0,013	M <sub>1</sub> (dato)
35	2,601	2	93,41	91,97	59,79	1,43	56,25	53,84	0,276	0,012	
37	2,601	16	91,05	93,95	59,19	-2,89	53,84	58,73	-0,069	-0,003	M <sub>2</sub> (2.3)
34	2,601	2	93,01	88,78	58,60	4,22	58,73	51,51	0,813	0,036	
31	2,601	4	87,89	84,07	58,01	3,82	51,51	44,92	0,367	0,016	M <sub>ms</sub> (2.2)
29	2,601	2	83,23	80,88	57,43	2,34	44,92	40,84	0,451	0,020	
40	2,601	16	80,05	94,73	56,84	-14,67	40,84	66,66	-0,353	-0,016	W (2.7)
38	2,601	2	93,78	90,76	56,27	3,02	66,66	61,29	0,582	0,027	
33	2,601	4	89,85	83,15	55,71	6,70	61,29	49,25	0,645	0,030	W <sub>1</sub> <sup>s</sup> (2.10)
30	2,601	2	82,31	78,79	55,15	3,52	49,25	42,85	0,678	0,032	
32	2,601	16	78,00	80,29	54,60	-2,29	42,85	47,05	-0,055	-0,003	W <sub>2</sub> <sup>s</sup> (2.11)
30	2,601	2	79,49	77,22	54,06	2,27	47,05	42,85	0,437	0,021	
28	2,601	4	76,45	74,32	53,52	2,12	42,85	38,88	0,204	0,010	z (2.18)
26	2,601	6	73,58	71,59	52,98	1,98	38,88	35,13	0,127	0,006	Z (2.29)

**Tabla 3.5** Resultados del régimen de secado para la pila 2

H (%)	A (m <sup>2</sup> )	$\tau$ (h)	M <sub>1</sub> (kg)	M <sub>2</sub> (kg)	M <sub>ms</sub> (kg)	W (kg)	W <sub>1</sub> <sup>s</sup> (%)	W <sub>2</sub> <sup>s</sup> (%)	z (kg/m <sup>2</sup> h)	Z (kg/kg h)	Ecuación Utilizada
38	2,601	0	50,00								A (2.28)
36	2,601	2	50,00	48,43	31,00	1,563	61,29	56,250	0,300	0,025	M <sub>1</sub> (dato)
34	2,601	4	47,95	46,50	32,00	1,453	53,94	51,515	0,146	0,012	M <sub>2</sub> (2.3)
34	2,601	18	46,03	46,03	31,65	0,000	49,45	51,515	0,000	0,000	M <sub>ms</sub> (2.2)
30	2,601	2	45,57	42,97	30,38	2,604	51,00	42,857	0,506	0,043	W (2.7)
28	2,601	4	42,54	41,35	31,90	1,182	40,00	38,889	0,122	0,010	W <sub>1</sub> <sup>s</sup> (2.10)
30	2,601	18	40,94	42,11	30,63	-1,170	37,43	42,857	-0,026	-0,002	W <sub>2</sub> <sup>s</sup> (2.11)
25	2,601	3	41,69	38,91	28,66	2,780	43,64	33,333	0,350	0,032	z (2.18) Z (2.29)

Las Tablas 3.4 y 3.5 reflejan la humedad evaporada (W) en ambas pilas de menas lateríticas, en general se observan valores aleatorios que están en correspondencia con

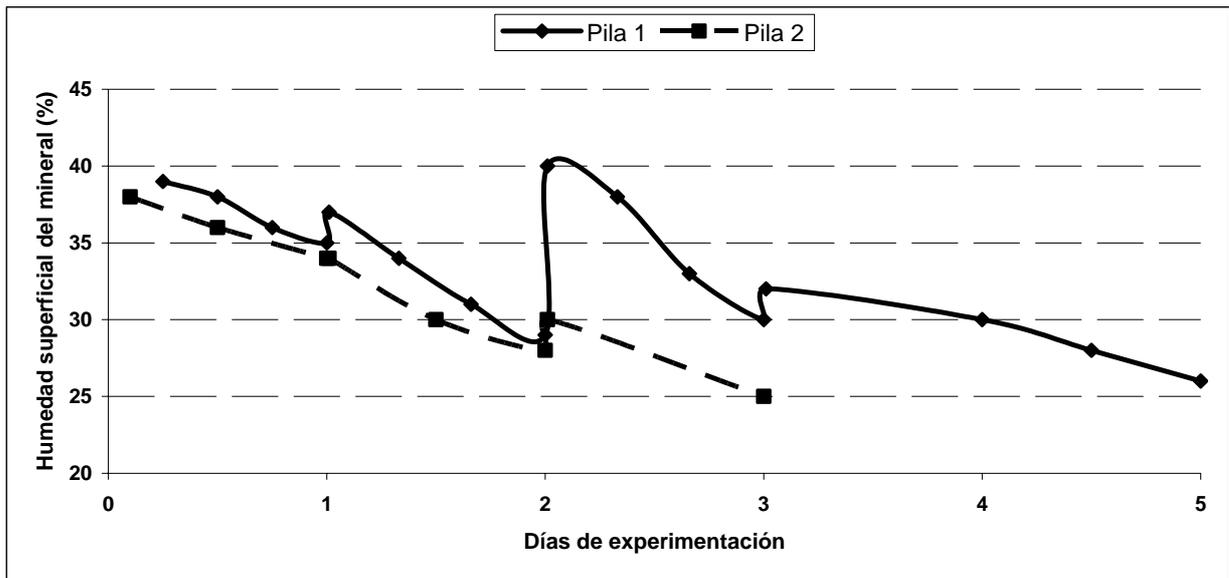
el tiempo de secado al que fueron sometidas las muestras, sin embargo se destacan en ambas tablas valores negativos (-2.89, -14.67, -2.29 y -1.170) que se corresponden con el aumento de la humedad de las menas, de lo anterior se deduce que en signo menos indica el fenómeno físico de absorción de humedad del material que para el caso analizado se correspondieron con el período nocturno y con la ocurrencia de precipitaciones siendo lógicamente esta última la de mayor incidencia en la absorción de la humedad.

El comportamiento de régimen de secado ( $z$ ) fue en sentido general decreciente, pero en ocasiones hay incrementos del valor que pueden ser atribuidos entre otros factores a la inexactitud en la determinación del área de transferencia de masa y a la masa de sólido seco producto de las dificultades que generan las mediciones de estos parámetros durante el proceso de experimentación y las irregularidades cometidas en la medición del período de secado.

También se aprecia en las referidas Tablas (3.4 y 3.5) valores negativos del régimen de secado, los mismos indican que cuando se someten muestras de menas lateríticas al secado solar natural pueden ocurrir dos procesos físicos diferentes como son la desorción y absorción de la humedad, este último relacionado fundamentalmente con la ocurrencia de precipitaciones y la llegada del período nocturno, como ya se explicó con anterioridad.

### **3.2.3- Comportamiento de la humedad de las menas respecto al tiempo de secado**

En la pila 1 la humedad superficial se afectó en gran medida por las precipitaciones al comienzo del tercer día (Figura 3.1), elevando su valor hasta alcanzar un 40 %; se observan además pequeños picos en las curvas que indica un aumento de la humedad superficial. Estos incrementos se producen en las horas de la madrugada donde la humedad de las menas es afectada por la disminución de la temperatura del punto de rocío y el incremento de la humedad relativa del aire. La curva ilustra que en el horario comprendido entre las 8:00 A.M. y 2:00 P.M. se intensifica el proceso de secado y por consiguiente disminuye de forma acelerada la humedad como lo indica la inclinación de la pendiente de la curva en este horario. Se necesitaron cinco días para disminuir la humedad de las menas desde un 39 hasta el 26 %, el tiempo de secado para el experimento fue de 102 horas.



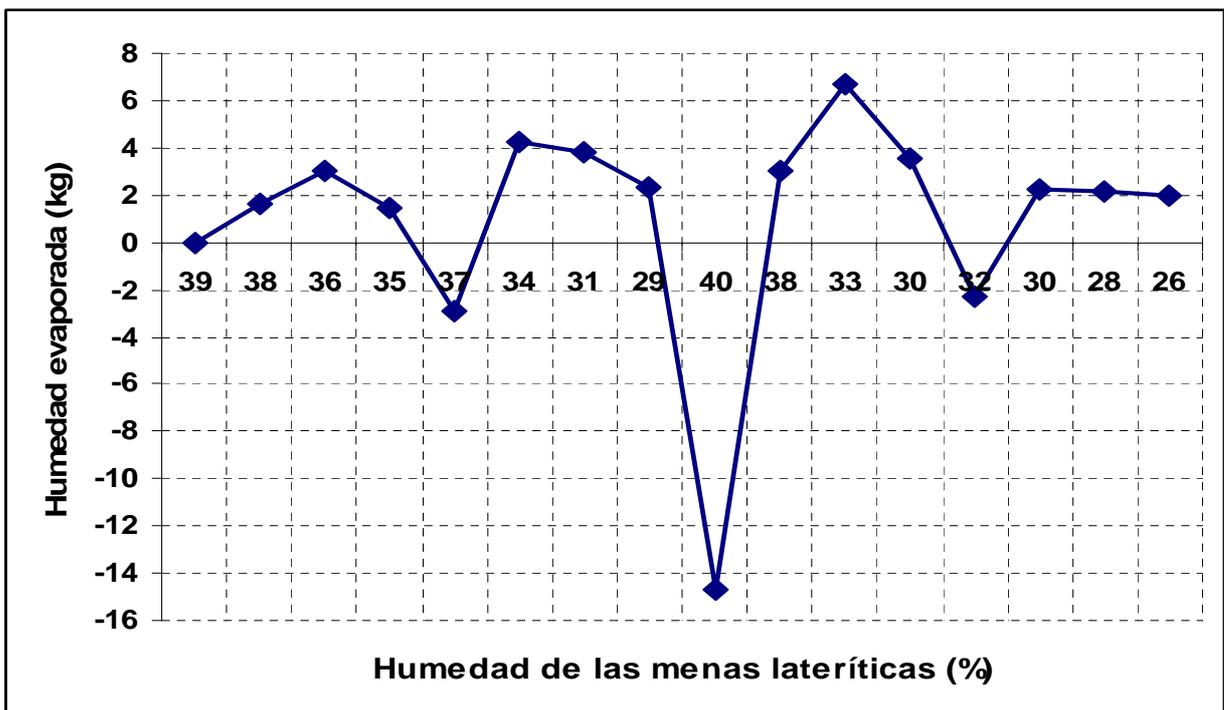
**Figura 3.1.** Influencia del tiempo de secado en la humedad superficial de las menas lateríticas para las masas de menas analizadas.

En la pila 2 el comportamiento de la humedad superficial se muestra más estable porque no hubo precipitaciones, la temperatura del punto de rocío y la humedad relativa tuvieron muy pocas influencias 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 este solamente de tres días, lo que demuestra que sin la influencia negativa de las precipitaciones y un comportamiento similar de la temperatura del medio ambiente y la velocidad del aire, se puede reducir considerablemente el tiempo de secado que para esta pila fue de 52 horas. Estos comportamientos también demuestran la influencia que tiene la masa de menas a secar en el tiempo de secado y la humedad final que se obtiene.

### 3.2.4- Comportamiento de la humedad evaporada respecto a la humedad de las menas lateríticas

Las figuras 3.2 y 3.3 muestran el comportamiento de la desorción de la humedad para las muestras analizadas en ambas pilas, en las mismas se observan aspectos comunes entre los que se destacan los siguientes:

- En general existe la desorción de la humedad aunque en determinados períodos la cantidad de humedad evaporada se reduce lo que hace el comportamiento irregular para el proceso analizado en el cual las variables tienen un comportamiento aleatorio.
- En ambos casos los períodos nocturnos favorecen la absorción de humedad por parte de las menas que se manifiesta en los picos inferiores (con valores negativos) excepto el más pronunciado que se corresponde con la absorción de humedad producto de la ocurrencia de precipitaciones.
- Es posible elevar la eficiencia en el proceso de secado solar natural si se aíslan las muestras en los períodos nocturnos y cuando es inminente la ocurrencia de precipitaciones.



**Figura 3.2.** Influencia de la humedad evaporada respecto a la humedad de las menas lateríticas (pila 1).

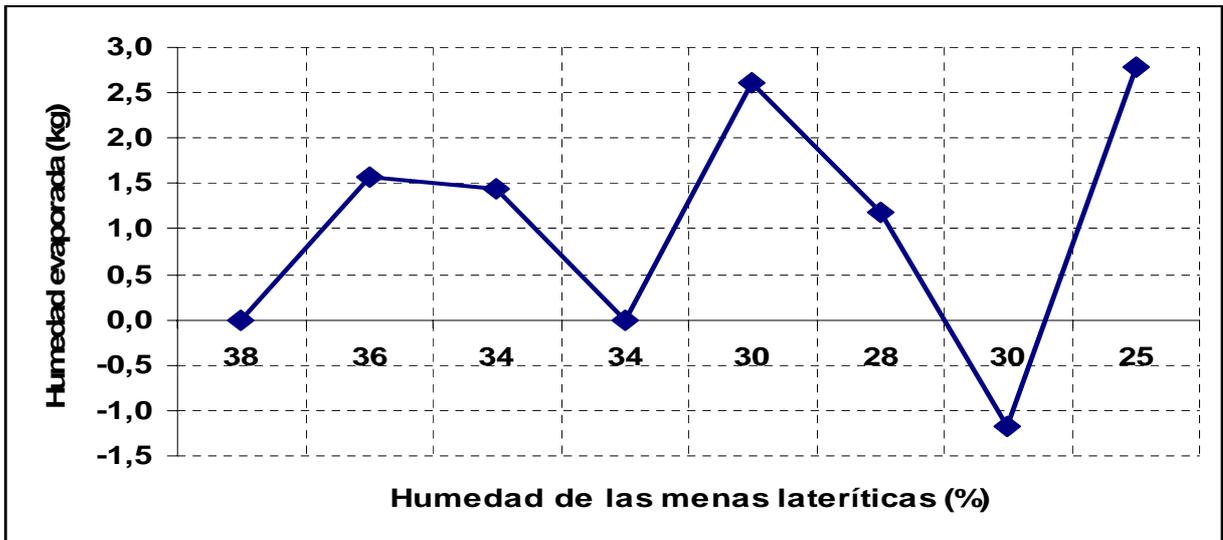


Figura 3.3. Influencia de la humedad evaporada respecto a la humedad de las menas lateríticas (pila 2).

### 3.2.5- Comportamiento del régimen de secado respecto a la humedad de las menas lateríticas

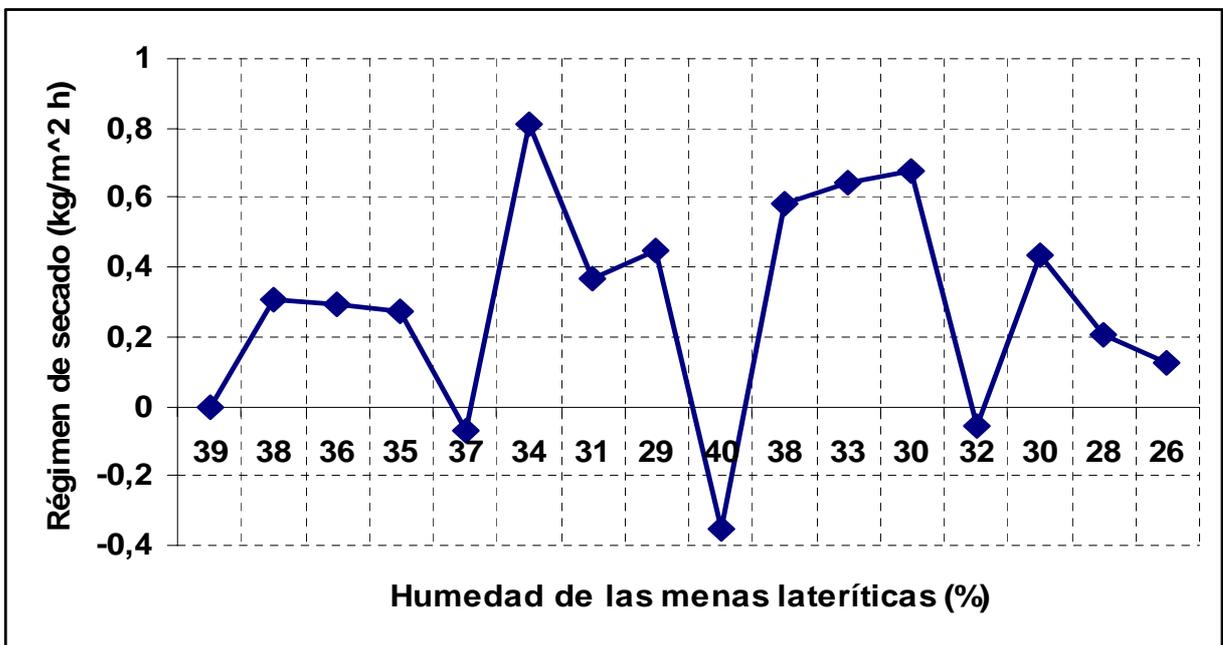
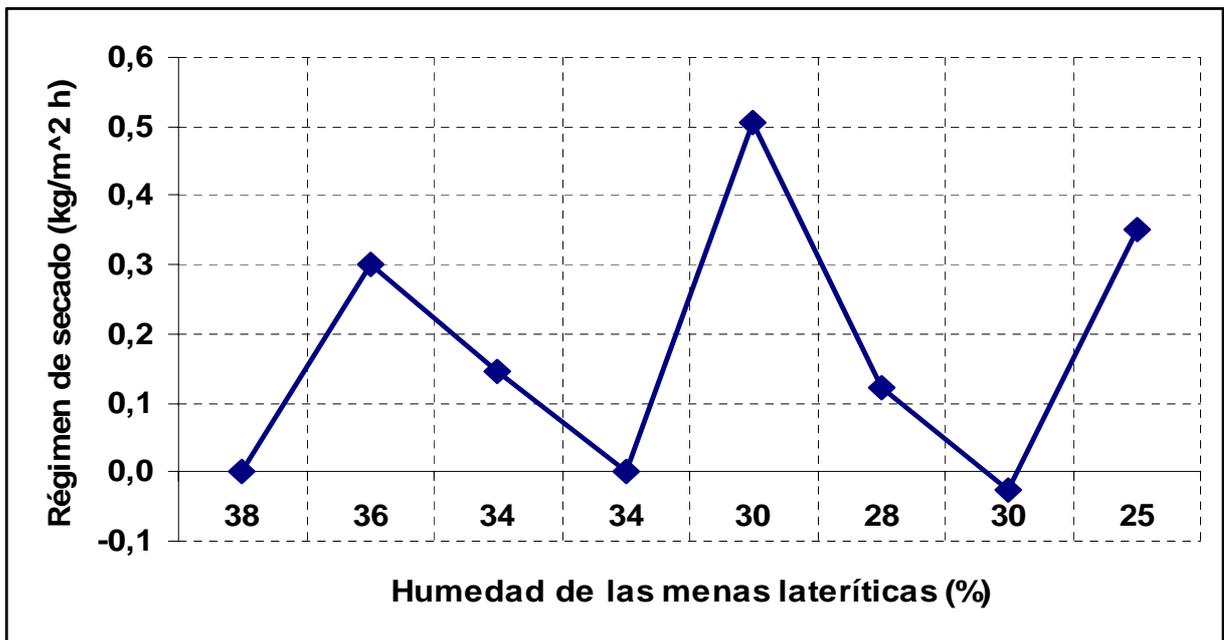


Figura 3.4. Comportamiento del régimen de secado respecto a la humedad de las menas lateríticas (pila 1).

Del análisis del comportamiento del régimen de secado (figuras 3.4 y 3.5) se deduce que en el proceso analizado predomina el período de velocidad de secado decreciente pero la irregularidad existente en el mismo propicia que en ocasiones el proceso se desarrolle en el período de secado constante, en general los picos inferiores ya mencionados se manifiestan de forma similar y en este caso no indican valor alguno del régimen de secado, sino por el contrario demuestran la humidificación de las muestras producto de la absorción de humedad ya explicada con anterioridad.



**Figura 3.5.** Comportamiento del régimen de secado respecto a la humedad de las menas lateríticas (pila 2).

### 3.2.5- Comportamiento del coeficiente de transferencia de masa por convección respecto a la velocidad del aire

El comportamiento del coeficiente de transferencia de masa por convección obedece a la misma tendencia mostrada por el coeficiente de transferencia de calor por convección analizado por Libén (2009) pero el coeficiente analizado en el presente trabajo tiene valores muy inferiores al otro ya mencionado lo cual es lógico debido a que en situaciones físicas similares los regímenes de transferencia de masa son inferiores a los de transferencia de calor.

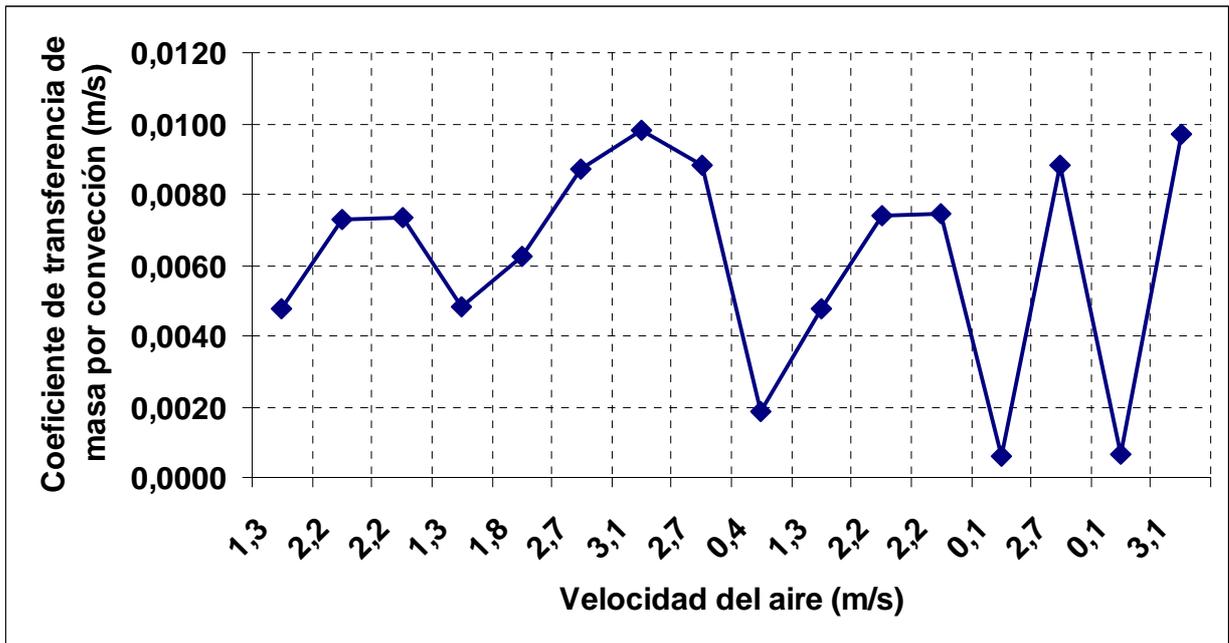


Figura 3.6. Influencia del coeficiente de transferencia de masa por convección respecto a la velocidad del aire (pila 1).

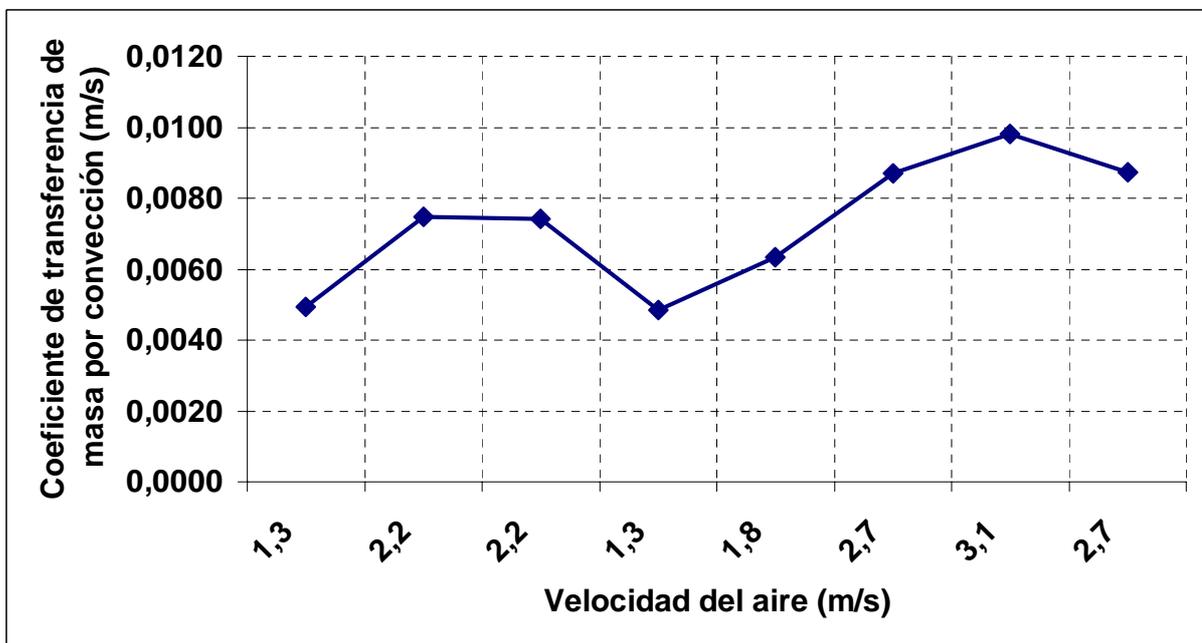


Figura 3.7. Influencia del coeficiente de transferencia de masa por convección respecto a la velocidad del aire (pila 2).

Al analizar en conjunto ambas figuras se observan tres picos inferiores en la figura 3.6 donde los valores de; coeficiente de transferencia de masa son muy inferiores a los restantes, esto se debe a que para los puntos ya señalados, la transferencia de calor y masa fue por convección libre y mixta y en los restantes predominó la convección forzada, este comportamiento se ratifica en la figura 3.7 donde la convección fue forzada en todos los casos y los valores del coeficiente siempre fueron superiores al correspondiente a los tres picos de la figura 3.6 y en general equivalentes a los restantes valores, siendo en ambas pilas superiores a 0.004 m/s.

### 3.3- Valoración económica

En la actualidad el consumo de combustibles es muy elevado debido al desarrollo industrial a nivel mundial y los enfrentamientos bélicos donde está involucrado el segundo productor mundial de petróleo (Irak), todo esto ha conllevado a una crisis económica, financiera, energética y estructural del sistema capitalista que afecta a todos los países.

En la industria cubana del níquel el consumo de combustible es un fenómeno que influye notablemente en los costos de producción. En la planta de preparación de mineral es un parámetro que depende considerablemente del contenido de humedad de las menas 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; Azman, 2009). En sentido general los cálculos económicos realizados 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 comparan los valores de consumo considerando la reducción de la humedad experimentada por las menas lateríticas durante el proceso de secado solar natural (26% y sin la aplicación de dicho proceso de secado 39%), se escogen los resultados de la pila 1 porque es la de mayor masa, se calcula el consumo de combustible para ambos contenidos de humedad y se realiza la

comparación entre los mismos, según metodología de cálculo expuesta por Castillo (2007) y Azmán (2009). El precio del petróleo empleado en el cálculo es 273.17 USD/t, el cual fue reportado por el departamento de Economía Energética de la empresa para el mes de mayo del 2009.

**Tabla 3.2.** Ahorro por concepto de consumo de combustible en los secaderos rotatorios.

Método	Humedad inicial del mineral (%)	Consumo de combustible t/h	Consumo de combustible t/día	Consumo de combustible t/mes	Consumo de combustible t/año
Sin secado solar	39	2,81	67.44	2023.2	24278.4
Con secado solar	26	1,51	36.24	1087.2	13046.4
<b>Ahorro (parcial)</b>	<b>13</b>	<b>1.3</b>	<b>31.2</b>	<b>936</b>	<b>11232</b>

Los resultados mostrados en la Tabla 3.2 se muestra un ahorro parcial en el consumo de combustible de 8812.8 t/año para un secador cilíndrico, lo cual indica que el consumo en los patios de secado es insignificante comparado con los beneficios que ofrece el proceso de secado solar natural.

**Tabla 3.3.** Comparación de los ahorros en USD con y sin la aplicación del proceso de secado solar natural.

Método	Humedad inicial del mineral (%)	Costo de combustible USD/h	Costo de combustible USD/día	Costo de Combustible USD/mes	Costo de combustible USD/año
Sin secado solar	39	767.6077	18422.5848	552677.544	6632130.528
Con secado solar	26	412.4867	9899.6808	296990.424	3563885.088
<b>Ahorro (parcial)</b>	<b>13</b>	<b>355.121</b>	<b>8522.904</b>	<b>255687.12</b>	<b>3 068 245.44</b>

En la Tabla 3.3 se muestra un ahorro parcial de **3 068 245.44** USD/año para un secador cilíndrico, aunque es bueno destacar que la aplicación del proceso a escala industrial genera un gasto mayor que el previsto en el trabajo y otros no considerados en la tesis.

De esta manera lo que se persigue con la implementación de la tecnología solar al proceso industrial es reducir el contenido de humedad de las menas entre un 3 y 5%, los ahorros en esas condiciones de trabajo serían diferentes.

### **3.4- Impacto ambiental asociado al proceso de secado solar natural**

El secado solar natural es considerado como un proceso poco dañino para el medio ambiente, debido a que el mismo las fuentes de secado que utiliza son la energía solar y eólica las cuales son naturales, no obstante mediante el desarrollo del secado, las emanaciones de polvo que se generan en el proceso de carga, descarga y remoción de las menas es una afectación constante al medio ambiente y los trabajadores, 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 al 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  $\mu\text{m}$ . 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  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$ , ya que se ha estimado que más del 50% de las partículas de 0,01 a 0,1  $\mu\text{m}$  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 natural 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 natural 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**

- Existe una pequeña transferencia de masa en el secado solar natural de las menas lateríticas que se manifiesta en el coeficiente de transferencia de masa por convección el cual fue inferior a 0.01 m/s en ambas pilas.
- En el secado solar natural de las menas lateríticas predomina el régimen de velocidad de secado decreciente que en ocasiones se altera producto a las irregularidades propias del proceso.
- Para las condiciones expuestas en el trabajo se obtuvo un ahorro económico considerable, el cual debe modificarse en la medida en que se consideren otros aspectos no considerados en el trabajo y varíen los precios del combustible.
- Con la aplicación del secado solar natural de las menas lateríticas se reduce el contenido de humedad del material antes de ser alimentado a los secaderos y por consiguiente se disminuyen las emisiones de gases contaminantes producto de la combustión de los combustibles fósiles.

## CONCLUSIONES

---

- Se demostró a través del marco teórico que el proceso de secado solar natural de las menas lateríticas ha sido poco estudiado desde el punto de vista teórico y experimental, en general los trabajos existentes relacionados con la temática no tienen en cuenta el fenómeno de intercambio de masa presente en dicho proceso.
- Quedó establecido el procedimiento de cálculo para la evaluación de la transferencia de masa durante el secado solar de las menas lateríticas. El mismo conjuga los aspectos teóricos y empíricos reportados en investigaciones precedentes y permite la determinación del área de transferencia de calor y masa para una pila de menas lateríticas de superficies cónicas y rectangulares formadas simétricamente.
- Durante el secado solar de las muestras de menas lateríticas, en general se redujo el contenido de humedad un 13%, pero la transferencia de masa en el proceso tuvo un comportamiento aleatorio, matizado por la absorción de humedad por parte de las menas durante la ocurrencia de precipitaciones y en los períodos nocturnos.
- Durante el secado solar natural de las menas lateríticas generalmente predomina el régimen de velocidad de secado decreciente. En el proceso existe una pequeña pérdida de materia que se manifiesta en el coeficiente de transferencia de masa por convección el cual es inferior a 0.01 m/s en ambas pilas.
- El ahorro anual de combustible determinado en el trabajo es 11232 toneladas, las cuales al precio actual considerado en la investigación genera utilidades a la empresa que ascienden a 3 068 245.44 USD. Las mismas deben modificarse en la medida en que se consideren otros aspectos no considerados en el trabajo y varíen los precios del combustible.
- Con la aplicación del secado solar natural de las menas lateríticas se reducen las emisiones de Dióxido de carbono, Óxido nítrico, Monóxido de carbono y Dióxido de azufre, las cuales son producto de la combustión de los combustibles fósiles en los secaderos convencionales utilizados en la empresa.



## RECOMENDACIONES

---

- Realizar ensayos de secado donde se controlen el área de transferencia de masa, la masa de sólido seco y el tiempo de secado para muestras de menas lateríticas.
- Conformar una monografía con los aspectos más importantes relacionados con el secado solar natural de materiales y particularmente de las menas lateríticas debido a la novedad del tema.
- Corregir el procedimiento de cálculo expuestos en las literaturas clásicas con los parámetros específicos de menas lateríticas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- AZMAN, G. *Evaluación energética de los secaderos rotatorios de la empresa Ernesto Che Guevara*. Trabajo de diploma. Moa. ISMM, 2009. 55p.
- BOIZAN, M. *Macrocinética del secado de Bagazo*. Santiago de Cuba: Ediciones ISJAM, 1991. 145p.
- DINULESCU, H. *Analysis of the one dimensional moisture migration caused temperature gradients in porous medium*. Institute Heat Mass Transfer. 1985: 28 (9)
- 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.
- ESTENOZ, S.; M. ESPINOSA. *Prueba de homogeneización y secado solar del mineral (Parte I)*: Centro de Investigaciones del Níquel, Cuba, Informe de Investigación, 2003.
- FAIRES, V. *Termodinámica*. La Habana: Edición Revolucionaria, 1991. 807p.
- 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.
- FILONENKO, G. *Secado de semillas de tomate*. Conferencia nacional de secado- Sección de energética. Editorial Profizdat, Moscú, 1958.
- HALL, C. *Drying technology An International Journal*. New York, 1983.
- HUANG, C. *Multi-Phase moisture transfer in porous media subjected to temperature gradient*. Int. J. Heat Mass Transfer 22: 295-307. 1979.
- 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.
- ILIC, M.; I. Turner. *Convective drying of a consolidated slab of wet porous materials*. Int. J. Heat Mass Transfer 32(12): 215-262. 1989.
- ISACHENKO, V.; V. OSIPOVA.; A. SUKOMEL. *Transmisión del calor*. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana, 1979. 566p.
- KASATKIN, A. *Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química*. Segunda parte. Editorial pueblo y Educación. 1987. /pág 262-366.
- KERN, D. *Procesos de transferencia de calor*. Edición Revolucionaria. La Habana, 1969. 980p.
- KRISHER, O. *Fundamentos científicos de la técnica del secado*. Editorial Izdatinlit. Moscú, 1961.
- LYKOV, A. *Fenómenos del transporte en cuerpos capilaroporosos*. Editorial gostejizdat. Moscú, 1954.

- LYKOV, A. *Teoría del secado*. Editorial Energía, 2da edición, Moscú, 1968.
- LYKOV, A. V. Y YU. A. MIJAILOV. *Teoría de la transferencia de calor y masa*. Editorial Gosenerjizdat. Moscú, 1963.
- MADARIAGA, J. *El secado de biomasa residual de la caña de azúcar*. Tesis Doctoral. ISJAE. Ciudad de la Habana. 1995.
- MENON AND MUJUNDAR. *Drying of solids*. Mc Graw Hill, Montreal, Canadá. 1992.
- NONHEBEL, G.; H. MOSS. *Secado de sólidos en la industria química*. Editorial Butterworths, Canadá, 1971.
- NOVOA, R.; M. BOIZÁN. *Secado de Zeolita a escala de laboratorio (III)*. Revista Tecnología Química. Santiago de Cuba, No.1: 24-29, 1995.
- PEISHI, C.; D. PEI. *A Mathematical model of drying processes*. Int.J.Heat Mass Transfer 32(2): 297-310. 1989.
- PERRY, J. *Chemical Engineering Handbook*. 4ta Edición. Mc Graw Hill. New York, 1979.
- PERRY, J. *Chemical Engineering Handbook*. 6ta Edición. Mc Graw Hill. New York, 1985.
- PHILIP, J.; DE VRIES, D.; *Moisture movement in porous materials under temperature gradients*. Trans. Am. Geophys. Union 18: 222-232. 1957.
- 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.
- PLUMB, O.; G. SPOLEK; B. OLMSTEAD. *Heat and Mass Transfer in Wood during drying*. Int.J. Heat Mass Transfer 28(9): 169-178. 1985.
- RAMÍREZ, Y. *Influencia de los parámetros climatológicos en el secado solar del mineral laterítico*. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM, 2006. 52p.
- REBINDER, P. *Secado de materiales dispersos en la industria química*. Editorial XIMIA. Moscú, 1979.
- RETIRADO, M. Y. *Comportamiento de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico*. Tesis de Maestría. Moa: ISMM, 2007. 60p.
- REZCHIKOV, V.; A. GUINSBURG. *Secado de productos alimenticios en cama fluidizante*. Editorial Pischevaya Promyshlennost, Moscú, 1966.
- RICARDO, P. M. *Procedimiento de cálculo teórico para la determinación de la variación de la humedad durante el secado solar del mineral Laterítico*. Trabajo de diploma. Moa. ISMM, 2008. 49p.
- ROMANKOV, P.; B. RASHKOVSKAYA; V. FROLOV. *Procesos de transferencia de masa en las tecnologías químicas*. Editorial XIMIA. Leningrado, 1975.



- K.G. RUDENKO ; M.M. SHEMAJANOV. *Eliminación de la humedad y el polvo*. Editorial Pueblo y Educación, 1989.
- SAZHIN, B. *Fundamentos de la técnica del secado*. Editorial XIMIA, 1984.
- STRUMILLO, C. *Fundamentos de la teoría y práctica del secado*. Editorial W.N.T. Varsovia, 1975.
- TODD, F. *Secado por aire y solar de la madera*. Centro de agricultura de Louisiana State University. Estados Unidos, 2001.
- TORRES, E. *Modelación matemática y simulación del transporte neumático del mineral laterítico*. Tesis doctoral. ISMM. Moa, 2003. 105p.
- TORRES. T.; A. FONSECA. *Análisis térmico de un secador solar de tambor rotatorio para granos*. Santiago de Cuba, 2001.
- TREYBAL, R. Operaciones con transferencia de masa. Capítulo. XII./pág 653. 1985.
- WHITAKER, S. *Simultaneous heat, mass and momentum transfer and theory of drying*. Adv.Heat Transfer 13: 119-203.1977.
- ZHIDKO, V.; M. BOIZAN. *Secado fluidizado de productos alimenticios*. Editorial oriente. Santiago de cuba, 1986.

## ANEXO 1 METODOLOGÍA DE CÁLCULO EN MATHCAD PARA UNA VARIANTE

### Área de transferencia de masa para una pila de menas lateríticas

$$h := 0.35 \cdot m \quad L_{SL} := 2 \cdot 0.90m \quad \theta := 40.93 \text{deg} \quad \sin(\theta) = 0.655$$

### Área de transferencia de masa en las superficies laterales (rectangulares)

$$A_1 := \frac{2 \cdot h \cdot L_{SL}}{\tan(\theta) \cdot \cos(\theta)}$$

$$A_1 = 1.923 \text{ m}^2$$

### Área de transferencia de masa en las superficies frontales (cónicas)

$$A_2 := \left( \pi \cdot \frac{h}{\tan(\theta)} \cdot \sqrt{\frac{h^2}{\tan(\theta) \cdot \tan(\theta)} + h^2} \right)$$

$$A_2 = 0.677 \text{ m}^2$$

### Área total de transferencia de masa para una pila de menas lateríticas

$$A_T := A_1 + A_2$$

$$A_T = 2.601 \text{ m}^2$$

$$A_{T1} := \frac{2 \cdot h \cdot L_{SL}}{\tan(\theta) \cdot \cos(\theta)} + \left( \pi \cdot \frac{h}{\tan(\theta)} \cdot \sqrt{\frac{h^2}{\tan(\theta) \cdot \tan(\theta)} + h^2} \right)$$

$$A_{T1} = 2.601 \text{ m}^2$$

Los cálculos que a continuación se muestran fueron obtenidos para una medición de variación de humedad (38 a 36 %)

### Cantidad de masa absoluta seca del material

$\omega_{1, \dots, 4}$  Humedades expresadas en (%)

$$\omega_1 := 38 \quad \omega_2 := 36 \quad M_1 := 97.403 \text{kg}$$

$$M_2 := M_1 \cdot \frac{100 - \omega_1}{100 - \omega_2}$$

$$M_2 = 94.359 \text{ kg}$$

### Cantidad de masa absoluta teniendo en cuenta la pérdida de material

$$\zeta := 0.99$$

$$M'_2 := \zeta \cdot M_1 \cdot \frac{100 - \omega_1}{100 - \omega_2}$$

$$M'_2 = 93.416 \text{ kg}$$

### Cantidad de humedad que se evapora

$$W_1 := M_1 - M_2$$

$$W_1 = 3.044 \text{ kg}$$

### Masa absoluta seca del material

$$M_{m.s} := M_1 \cdot \frac{100 - \omega_1}{100}$$

$$M_{m.s} = 60.39 \text{ kg}$$

### Humedad inicial del material en relación con su masa seca absoluta $\omega_1^s$

$$\omega_3 := \omega_1 \cdot \frac{100}{100 - \omega_1}$$

$$\omega_3 = 61.29$$

### Humedad final del material en relación con su masa seca absoluta $\omega_2^s$

$$\omega_4 := \omega_2 \cdot \frac{100}{100 - \omega_2} \quad \omega_4 = 56.25$$

### Velocidad de evaporación o Régimen de secado

$$\tau := 4 \cdot \text{hr} \quad \Delta\omega_2 := 0.050 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

$$z := \frac{M_{m.s} \cdot \Delta\omega_2}{A_{T1} \cdot \tau}$$

$$z = 0.29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}}$$

### Velocidad media de desecación para 1 kg de material

$$Z := \frac{\Delta\omega_2}{\tau}$$

$$Z = 0.013 \frac{\text{kg}}{\text{kg} \cdot \text{hr}}$$

### Duración del proceso

$$\tau_1 := \frac{W_1}{z \cdot A_{T1}} \quad \tau_2 := \frac{W_1}{Z \cdot M_{m.s}}$$

$$\tau_1 = 4.032 \text{ hr} \quad \tau_2 = 4.032 \text{ hr}$$

**NOTA:** para la obtención de los resultados del coeficiente de transferencia de masa por convección no se tiene en cuenta la variación de humedad por lo tanto se utilizaron los datos para 39 % de humedad.

### Cálculo del coeficiente de transferencia de masa por convección en el secado solar natural.

$$C_1 := 0.0296 \quad x := \frac{4}{5} \quad n := \frac{1}{3} \quad v_a := 17.09 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$V_a := 1.3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad D_{A.B} := 0.26 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\text{Re}_1 := \frac{V_a \cdot L_{SL}}{v_a} \quad \text{Sc} := \frac{v_a}{D_{A,B}}$$

$$\text{Re}_1 = 1.369 \times 10^5 \quad \text{Sc} = 0.657$$

$$\text{Sh} := C_1 \cdot \text{Re}_1^x \cdot \text{Sc}^n$$

$$\text{Sh} = 330.923$$

### Flujo turbulento

$$\text{Sh}_{x1} := 0.0296 \cdot \text{Re}_1^{\frac{4}{5}} \cdot \text{Sc}^{\frac{1}{3}}$$

$$\text{Sh}_{x1} = 330.923$$

### Coefficiente de transferencia de masa por convección

$$\text{hm} := \frac{\text{Sh} \cdot D_{A,B}}{L_{SL}}$$

$$\text{hm} = 4.78 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

**Anexo 2.** Resultados íntegros de los cálculos mostrados en la investigación

**Tabla 1.** Resultados del coeficiente de transferencia de masa para la pila 1

Humedad (%)	Taire (°C)	vaire (m <sup>2</sup> /s)x10 <sup>6</sup>	Va	l <sub>SL</sub> (m)	Re	Ts (°C)	DA.B (m <sup>2</sup> /s)x10 <sup>-4</sup>	Sc	Sh	hm (m/s)
39	25,7	17,097	1,3	1,8	136864,52	22,8	0,26	0,657	330,86	0,004779
38	28,8	16,997	2,2	1,8	232987,77	23,0	0,26	0,653	505,38	0,00730
36	31,7	16,795	2,2	1,8	235778,84	25,2	0,26	0,646	508,20	0,007341
35	32,4	16,695	1,3	1,8	140163,40	25,0	0,26	0,642	334,56	0,004832
37	28,1	16,896	1,8	1,8	191761,36	22,7	0,26	0,649	431,62	0,006235
34	30	16,594	2,7	1,8	292873,41	23,3	0,26	0,638	602,05	0,008696
31	31,4	16,292	3,1	1,8	342490,98	26,0	0,26	0,626	678,19	0,009796
29	30,9	16,091	2,7	1,8	302028,44	24,5	0,26	0,618	610,76	0,008822
40	24,8	17,198	0,4	1,8	41865,82	18,0	0,26	0,661	128,51	0,001856
38	28,1	16,997	1,3	1,8	137674,59	22,2	0,26	0,653	331,77	0,004792
33	31,6	16,494	2,2	1,8	240093,13	23,4	0,26	0,634	512,52	0,007403
30	32,4	16,192	2,2	1,8	244568,24	23,0	0,26	0,622	516,95	0,007467
32	27,6	16,393	0,1	1,8	10980,30	21,2	0,26	0,630	43,35	0,000626
30	30,4	16,192	2,7	1,8	300151,93	22,5	0,26	0,622	608,98	0,008796
28	28,1	15,991	0,1	1,8	11256,61	20,5	0,26	0,615	43,86	0,000634
26	33,8	16,584	3,1	1,8	336466,05	25,4	0,26	0,637	672,59	0,009715

**Tabla 2.** Resultados del coeficiente de transferencia de masa para la pila 2

Humedad (%)	Taire (°C)	vaire (m <sup>2</sup> /s)x10 <sup>6</sup>	Va	l <sub>SL</sub> (m)	Re	Ts (°C)	DA.B (m <sup>2</sup> /s)x10 <sup>-4</sup>	Sc	Sh	hm (m/s)
38	27,9	15,981	1,3	1,8	146428,09	22,5	0,26	0,6146	341,45	0,004779
36	30,2	16,212	2,2	1,8	244264,71	23,6	0,26	0,6235	516,66	0,00730
34	32,9	16,484	2,2	1,8	240239,66	24,2	0,26	0,6340	512,66	0,007341
34	28,7	16,641	1,3	1,8	140617,39	22,3	0,26	0,6400	335,06	0,004832
30	31,3	16,323	1,8	1,8	198498,03	23,5	0,26	0,6278	438,63	0,006235
28	33,9	16,584	2,7	1,8	293051,07	25,7	0,26	0,6379	602,22	0,008696
30	30,1	16,202	3,1	1,8	344404,90	24,2	0,26	0,6231	679,95	0,009796
25	32,3	16,423	2,7	1,8	295923,20	25,8	0,26	0,6317	604,96	0,008822

**Tabla 3.** Resultados del régimen de secado para la pila 1

H (%)	H (kgh/kgs)	A (m <sup>2</sup> )	t (h)	z (adim)	M1 (kg)	M <sub>2</sub> (kg)	M <sub>2</sub> real (kg)	Mms (kg)	W (kg)	W <sub>1</sub> <sup>s</sup> (%)	W <sub>2</sub> <sup>s</sup> (%)	z (kg/m <sup>2</sup> h)	Z (kg/kg h)
39	0,639	2,601	0	0,99	100,000	0,000	0,000						
38	0,613	2,601	2	0,99	100,000	98,387	97,403	61,00	1,613	63,934	61,290	0,310	0,013
36	0,563	2,601	4	0,99	97,403	94,359	93,416	60,39	3,044	61,290	56,250	0,293	0,013
35	0,538	2,601	2	0,99	93,416	91,979	91,059	59,79	1,437	56,250	53,846	0,276	0,012
37	0,587	2,601	16	0,99	91,059	93,950	93,010	59,19	-2,891	53,846	58,730	-0,069	-0,003
34	0,515	2,601	2	0,99	93,010	88,782	87,894	58,60	4,228	58,730	51,515	0,813	0,036
31	0,449	2,601	4	0,99	87,894	84,073	83,232	58,01	3,821	51,515	44,928	0,367	0,016
29	0,408	2,601	2	0,99	83,232	80,887	80,079	57,43	2,345	44,928	40,845	0,451	0,020
40	0,667	2,601	16	0,99	80,059	94,736	93,789	56,84	-14,677	40,845	66,667	-0,353	-0,016
38	0,613	2,601	2	0,99	93,789	90,764	89,856	56,27	3,025	66,667	61,290	0,582	0,027
33	0,493	2,601	4	0,99	89,856	83,150	82,319	55,71	6,706	61,290	49,254	0,645	0,030
30	0,429	2,601	2	0,99	82,319	78,791	78,003	55,15	3,528	49,254	42,857	0,678	0,032
32	0,471	2,601	16	0,99	78,003	80,297	79,494	54,60	-2,294	42,857	47,059	-0,055	-0,003
30	0,429	2,601	2	0,99	79,494	77,223	76,451	54,06	2,271	47,059	42,857	0,437	0,021
28	0,389	2,601	4	0,99	76,451	74,327	73,584	53,52	2,124	42,857	38,889	0,204	0,010
26	0,351	2,601	6	0,99	73,584	71,595	70,879	52,98	1,989	38,889	35,135	0,127	0,006

**Tabla 4.** Resultados del régimen de secado para la pila 2

H (%)	H (kgh/kgs)	A (m <sup>2</sup> )	t (h)	z (adim)	M1 (kg)	M <sub>2</sub> (kg)	M <sub>2</sub> real (kg)	Mms (kg)	W (kg)	W <sub>1</sub> <sup>s</sup> (%)	W <sub>2</sub> <sup>s</sup> (%)	z (kg/m <sup>2</sup> h)	Z (kg/kg h)
38	0,613	2,601	0	0,99	50,000								
36	0,563	2,601	2	0,99	50,000	48,438	47,953	31,00	1,563	61,290	56,250	0,300	0,025
34	0,515	2,601	4	0,99	47,953	46,500	46,035	32,00	1,453	53,947	51,515	0,146	0,012
34	0,515	2,601	18	0,99	46,035	46,035	45,575	31,65	0,000	49,455	51,515	0,000	0,000
30	0,429	2,601	2	0,99	45,575	42,970	42,541	30,38	2,604	51,000	42,857	0,506	0,043
28	0,389	2,601	4	0,99	42,541	41,359	40,946	31,90	1,182	40,004	38,889	0,122	0,010
30	0,429	2,601	18	0,99	40,946	42,116	41,695	30,63	-1,170	37,431	42,857	-0,026	-0,002
25	0,333	2,601	3	0,99	41,695	38,915	38,526	28,66	2,780	43,641	33,333	0,350	0,032