

## **Distribución de temperatura en pilas de mena laterítica expuestas a secado natural**

Yoalbys Retirado-Mediaceja  
Arístides Alejandro Legrá-Lobaina  
Marbelis Lamorú-Urgellés  
Enrique Torres-Tamayo  
Héctor Luis Laurencio-Alfonso  
Ever Góngora-Leyva

### **Resumen**

En la empresa productora de níquel y cobalto "Comandante Ernesto Che Guevara" de Moa la mena laterítica se expone, en pilas triangulares, al secado natural. Sin embargo, son imprecisos los métodos de cálculo actualmente empleados en la estimación de los parámetros del secado. En este trabajo se estableció, a partir del análisis físico-matemático del secado natural, el modelo matemático para calcular y simular la distribución de temperatura en la mena laterítica durante el secado. Las simulaciones evidencian que la laterita es mala conductora del calor, y que el intercambio térmico por conducción en las pilas es un fenómeno superficial que no incide significativamente más allá de los 9,7 cm de la superficie de secado.

**Palabras clave:** distribución de temperatura; mena laterítica; secado natural; modelación matemática

## **Temperature distribution in lateritic ore piles exposed to natural drying**

### **Abstract**

In the Nickel & Cobalt Process Plant "Comandante Ernesto Che Guevara" located in Moa the lateritic ore is deposited in triangular stockpiles to dry using the natural drying technique. However, the methods currently used to calculate drying parameters are inaccurate. During this investigation, a mathematical model was developed to calculate and simulate temperature distribution in the lateritic ore during natural drying based on a mathematical and physical analysis of natural drying. The simulation results indicated that laterites are poor conductors of heat and therefore heat transfer via thermal conduction does not have a significant effect, occurring in no more than 9.7 cm of the stockpile surface area

**Keywords:** temperature distribution; lateritic ore; natural drying; mathematical modeling

## 1. INTRODUCCIÓN

Los primeros intentos realizados para tratar de explicar el proceso de secado y los mecanismos que intervienen en el mismo datan de la primera década del siglo XX. Desde entonces, se han publicado en la literatura científica diversas teorías que buscan describir la forma en que se desarrolla el secado (Hernández & Quinto 2005).

A partir de estas teorías, fueron establecidos múltiples modelos matemáticos generales. La mayoría de estos se desarrollaron con base en el conocimiento empírico, por lo que solo son útiles para describir el secado de una manera muy general. Sin embargo, también se ha recurrido a los conocimientos de la termodinámica, la mecánica de fluidos y la transferencia de calor, para plantear ecuaciones matemáticas que describan el secado desde un punto de vista más específico.

Las teorías actualmente usadas para explicar el proceso de secado en materiales porosos se pueden dividir en dos grandes grupos: en el primero se encuentran aquellas que consideran que el movimiento de la humedad en el material se debe a un solo mecanismo físico, aquí se pueden citar las teorías capilar y la de difusión líquida. El segundo grupo reúne a las teorías que consideran que el movimiento de la humedad se debe a más de un mecanismo; forman parte de este grupo las teorías de condensación- evaporación; de Philip y De Vries; de Krischer y Berger-Pei; de Likov; de Whitaker y la de Kowalski-Strumillo (Hernández & Quinto 2005).

Las teorías pertenecientes al segundo grupo tienen, como elemento común, el hecho de que consideran que la migración de la humedad está determinada por los gradientes de concentración de humedad y de temperatura.

En relación con lo anterior, resulta importante determinar la distribución de temperatura durante el proceso de secado de materiales porosos, en general, y el secado natural de la mena laterítica, en particular, porque los gradientes térmicos que se generan en el secado influyen en la distribución de humedad y la velocidad de secado en las pilas de minerales (Retirado *et al.* 2012b).

El secado natural es el proceso en el cual los materiales se exponen directamente a la radiación solar colocándolos sobre el suelo o en dispositivos específicos. Es uno de los usos más antiguos de la energía solar, siendo aún el proceso más utilizado en países en vías de desarrollo para el secado de diversos productos (Montero 2005).

La implementación del secado natural constituye un procedimiento de bajo costo económico y ambiental que, por sus múltiples ventajas y perspectivas, es ampliamente utilizado mundialmente (Rafiee *et al.* 2008; Ferreira y Costa 2009; Sandoval-Torres 2009).

En Cuba, su empleo se reduce a las industrias alimenticia, maderera y azucarera, fundamentalmente. En menor medida se emplea en la industria del níquel como alternativa para racionalizar el proceso tecnológico de obtención de níquel y cobalto. Para ello, la mena laterítica se dispone en pilas a la intemperie (Retirado *et al.* 2009; Retirado & Legrá 2011).

En el presente trabajo se establece, a través de la modelación matemática y simulación, basadas en ecuaciones diferenciales, el comportamiento de la distribución de temperatura de la mena laterítica expuesta a secado natural en las condiciones de explotación de la empresa productora de níquel y cobalto "Comandante Ernesto Che Guevara" de Moa.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Método de solución de ecuaciones diferenciales**

La estrategia global para resolver ecuaciones diferenciales en derivadas parciales radica en reducirlas a una o más ecuaciones diferenciales ordinarias, las que se pueden resolver por las técnicas convencionales. Básicamente, los métodos de solución se pueden dividir en analíticos y numéricos (Jiménez 1999). En este trabajo se empleó, para la obtención del modelo matemático, el método de separación de variables. Se escogió el mismo por las ventajas que ofrece para el estudio del proceso investigado (Retirado *et al.* 2012b).

### **2.2. Condiciones empleadas en la simulación**

#### **2.2.1. Orientación y características geométricas de la pila**

Para la simulación la pila de material se orientó longitudinalmente en la dirección del eje norte-sur (Figura 1). De esta manera, se logra una distribución uniforme de la radiación solar que incide sobre la superficie de secado de la pila y se eliminan los inconvenientes asociados al cálculo de la radiación solar global sobre una superficie inclinada que está orientada arbitrariamente respecto al mencionado eje de referencia (McQuiston *et al.* 2008; Retirado *et al.* 2012a).

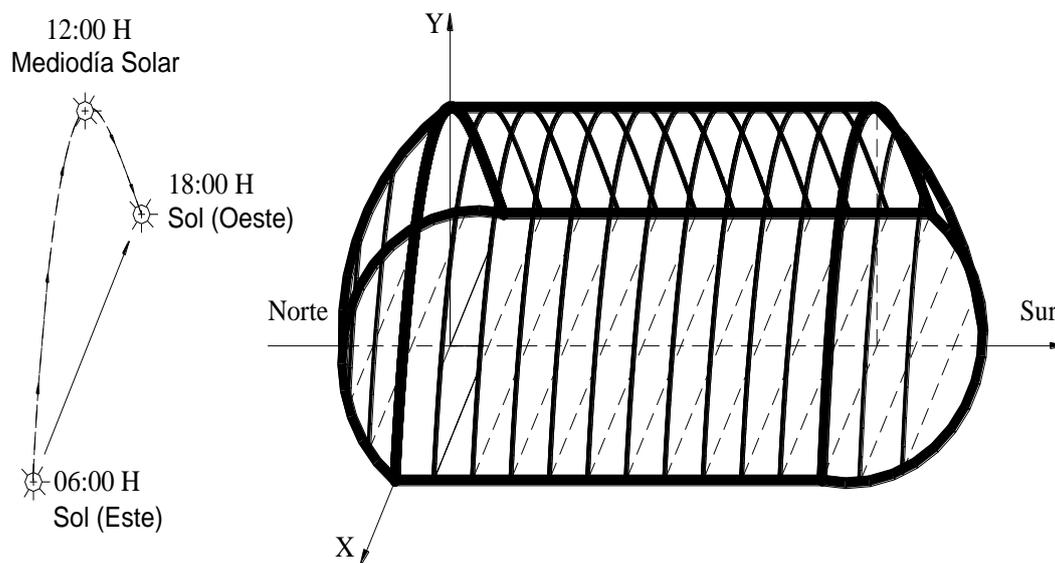


Figura 1. Orientación de la pila de mena laterítica expuesta a secado natural (Fuente: Retirado *et al.* 2012a).

Las características geométricas de la pila coinciden con las utilizadas en la implementación del proceso de secado natural en la mencionada empresa productora de níquel y cobalto (Estenoz *et al.* 2007a y b), estas características son:

- ✓ Masa de material expuesta a secado natural: 700 t
- ✓ Longitud de la superficie lateral: 140 m
- ✓ Ancho de la base: 5,49 m
- ✓ Inclinación de la superficie de secado respecto al plano horizontal (ángulo maximal):  $61^\circ$
- ✓ Forma geométrica de la sección transversal: triangular.

### 2.2.2. Aplicación informática empleada

La implementación de los modelos se desarrolló mediante el software Borland Delphi Enterprise, Versión 7.0, dentro de la aplicación informática "SecSolar", la cual es compatible con cualquier versión igual o superior del sistema operativo Windows 2000, precisando al menos 512 Mb de memoria RAM y 8 Gb de memoria en disco. La literatura recoge aplicaciones informáticas similares a la aquí mencionada, las cuales fueron creadas para la automatización, planificación y control integral de la minería en la referida empresa niquelífera (Legrá 2010).

### 3. MODELOS MATEMÁTICOS

#### 3.1. Temperatura de la mena laterítica en la superficie de la pila

La temperatura del material en la superficie de la pila en cualquier instante  $\tau$  [ $T_s(\tau)$ ] se calcula como una función de dos parámetros fundamentales: la radiación solar global y el calor transmitido por convección, dependiendo el primero de la inclinación de la superficie, el ángulo de incidencia y la altura solar; y el segundo del coeficiente de transferencia de calor por convección y la diferencia de temperatura entre la superficie y la corriente libre, factores todos que se encuentran en la expresión 1 (Incropera & De Witt 2003).

Para resolver la referida ecuación se recomienda utilizar algún software apropiado (Derive, MATLAB, Mathcad o cualquier otro). En el presente trabajo se determinó con la aplicación informática creada para este propósito.

$$\varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_s(\tau)]^4 + h_a \cdot T_s(\tau) - \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_a^4 - h_a \cdot T_a - \left[ \alpha_c \cdot \sigma \cdot (0,0552 \cdot T_a^{1,5})^4 + (\alpha_s - \rho) \cdot I_{SG} \right] = 0 \quad (1)$$

Donde:

$\varepsilon$ : emisividad del material; adimensional.

$\sigma$ : constante de Stefan-Boltzman ( $5,67 \cdot 10^{-8}$ );  $W/m^2 \cdot K^4$ .

$T_s(\tau)$ : temperatura del material en la superficie de la pila en cualquier instante de tiempo  $\tau$ ; °C.

$h_a$ : coeficiente de transferencia de calor por convección;  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ .

$T_a$ : temperatura del aire; °C.

$\alpha_c$ : absortividad del cielo; adimensional.

$\alpha_s$ : absortividad solar del material; adimensional.

$\rho$ : reflectividad del material; adimensional.

$I_{SG}$ : radiación solar global que incide sobre la superficie de secado de la pila;  $W/m^2$ .

#### 3.2. Coeficiente de transferencia de calor por convección

En la literatura se reportan diversas investigaciones encaminadas a determinar el referido coeficiente durante el secado solar de diferentes materiales (Jain & Tiwari 2004; Tiwari *et al.* 2004). En el presente trabajo, el coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h_a$ ) se determina por la expresión 2 (Incropera & De Witt 2003), para ello se calcula el número de Nusselt ( $Nu$ ) en función del tipo de convección

que predomina durante la implementación del proceso de secado natural de la mena laterítica.

$$h_a = \frac{Nu \cdot k_a}{L} \quad (2)$$

Donde:

$Nu$ : número de Nusselt; adimensional.

$k_a$ : conductividad térmica del aire; W/m·°C.

$L$ : longitud característica de la superficie de secado; m.

Debido a que el secado solar de la mena laterítica se desarrolla a la intemperie, el material intercambia calor con el aire en condiciones naturales, en estas circunstancias la transmisión de calor se produce por convección libre, forzada y mixta (Retirado *et al.* 2011). Para calcular el número de Nusselt, según el tipo de convección predominante, se emplean las expresiones 3; 4 y 5 propuestas por Tiwari & Sarkar (2006); Kasatkin (1987) e Incropera & De Witt (2003), respectivamente.

$$Nu_L = 0,56 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}} = 0,56 \cdot Ra^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

$$Nu_F = 2 + 0,025 \cdot Re^{\frac{9}{10}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot Gu^{\frac{2}{15}} \quad (4)$$

$$Nu_M = \left\{ \left[ 2 + 0,025 \cdot Re^{\frac{9}{10}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot Gu^{\frac{2}{15}} \right]^3 \pm \left[ 0,56 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}} \right]^3 \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

Donde:

$Nu_L$ ,  $Nu_F$ ,  $Nu_M$ : números de Nusselt, respectivos, para la convección libre, forzada y mixta; adimensionales.

$Gr$ ,  $Pr$ ,  $Ra$ ,  $Re$  y  $Gu$ : números de Grashof, Prandtl, Rayleigh Reynolds y Guzman; adimensionales.

### 3.3. Radiación solar global que incide sobre la superficie

Para calcular la radiación solar global que incide sobre la superficie de secado de la pila de mena laterítica, la cual está inclinada y orientada en  $\varphi$  y  $\psi$  grados, se emplea la expresión 6 (Montero 2005), nótese que la misma depende del ángulo  $\varphi$ . En el caso de las pilas de sección transversal parabólica los ángulos de referencia para el cálculo son el

maximal ( $\varphi_m$ ) y el tangencial ( $\varphi_t$ ). Para las pilas de sección transversal triangular ambos ángulos coinciden ( $\varphi_m = \varphi_t = \varphi$ ).

En esta investigación a la expresión 6 se incorpora, como elemento novedoso, la modelación matemática del efecto de sombra que se produce debido al movimiento diario del sol y a la inclinación de la superficie de secado de la pila.

$$I_{SG} = I_H \cdot \left[ (1 - C_e) \cdot R(\varphi, \psi) + C_e \cdot \frac{1 + \cos(\varphi)}{2} + \frac{1 - \cos(\varphi)}{2} \cdot \eta \right] \quad (6)$$

Siendo:

$$R(\varphi, \psi) = \frac{\text{sen}(\delta_s) \cdot \text{sen}(l_a - \varphi) + \cos(\delta_s) \cdot \cos(l_a - \varphi) \cdot \cos(w_h)}{\text{sen}(\delta_s) \cdot \text{sen}(l_a) + \cos(\delta_s) \cdot \cos(l_a) \cdot \cos(w_h)} \quad (7)$$

Donde:

$I_H$ : radiación incidente sobre la superficie horizontal; W/m<sup>2</sup>.

$C_e$ : coeficiente empírico; adimensional.

$R(\varphi, \psi)$ : factor de conversión; adimensional.

$\varphi$ : inclinación de la superficie de la pila respecto al plano horizontal; grados sexagesimales.

$\psi$ : orientación de la superficie de la pila respecto al eje norte-sur; grados sexagesimales.

$\eta$ : albedo o reflectividad del suelo frente al plano receptor, oscila entre 0,17 y 0,2 (Montero 2005); adimensional.

$\delta_s$ : declinación solar; grados sexagesimales.

$l_a$ : latitud; grados sexagesimales.

$w_h$ : ángulo horario; grados sexagesimales.

Los valores de los ángulos  $\varphi_m$  y  $\varphi_t$  pueden determinarse aplicando trigonometría si se conoce el ancho de la base y la altura de la pila. Sin embargo, cuando se trata de los ángulos de reposo, estos se determinan como una función de la granulometría y la humedad del material, mediante las ecuaciones empíricas 8 y 9 (Sierra *et al.* 2009). Estas ecuaciones permiten obtener buenas predicciones de  $\varphi_m$  y  $\varphi_t$  porque para un nivel de confianza del 95 % sus coeficientes de correlación son iguales a 0,97 y 0,96; respectivamente.

$$\varphi_m = 30,58 - 0,4592 \cdot G_p - 0,00496 \cdot G_p \cdot H_p + 0,00651 \cdot G_p^2 + 0,01109 \cdot H_p^2 \quad (8)$$

$$\varphi_t = 33,25 - 0,505 \cdot G_p - 0,0025 \cdot G_p \cdot H_p + 0,0062 \cdot G_p^2 + 0,008 \cdot H_p^2 \quad (9)$$

Para utilizar las ecuaciones 8 y 9 debe verificarse que:

$$5\text{mm} \leq G_p \leq 78\text{mm} \quad \text{y} \quad 26\% \leq H_p \leq 42\% \quad (10)$$

Donde:

$\varphi_m$  y  $\varphi_t$ : ángulo maximal y ángulo tangencial de la pila de mena laterítica; grados sexagesimales.

$G_p$ : granulometría promedio de la mena laterítica; mm.

$H_p$ : humedad promedio de la mena laterítica; %.

### 3.4. Distribución de temperatura en la pila

La expresión que caracteriza a la distribución de temperatura  $[T(y,\tau)]$  de cada sección del corte se obtiene al considerar que la conducción del calor transitoria cumple las condiciones del primer problema general de contorno definido por Tijonov & Samarky (1980), para ello se emplea la ecuación 11 con las condiciones iniciales y de frontera representadas en 12.

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} - \alpha \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = f(y,\tau) \quad (11)$$

$$T(y,0) = \varphi(y)$$

$$T(0,\tau) = \mu_1(\tau) \quad (12)$$

$$T(l,\tau) = \mu_2(\tau)$$

Para emplear este enfoque es necesario aplicar técnicas de discretización. Para ello se divide la pila en cortes de espesor fino y estos, a su vez, en secciones de ancho suficientemente pequeño, según se muestra en la Figura 2.

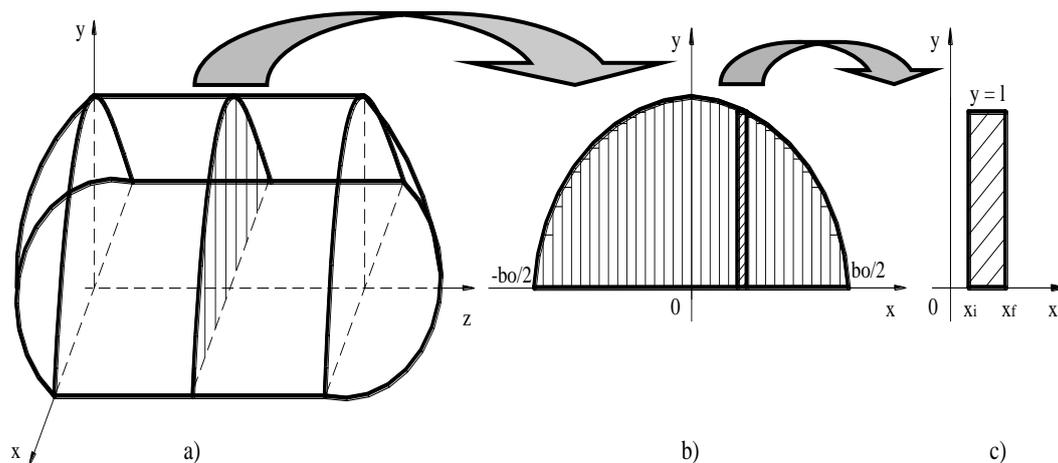


Figura 2. Esquema para el análisis de la distribución de temperatura en la pila considerada (**Fuente:** Retirado *et al.* 2012b). a): Pila de mena laterítica; b): Corte de la sección transversal; c): Sección analizada en el corte.

En el modelo de la distribución de temperatura de una sección se cumplen las condiciones:

$$f(y, \tau) = 0 \quad (13)$$

$$\varphi(y) = T_0 \quad (14)$$

$$\mu_1(\tau) = T_0 \quad (15)$$

$$\mu_2(\tau) = T_s(\tau) \quad (16)$$

Donde:

$T$ : temperatura del material; °C.

$T_0$ : temperatura inicial del material; °C.

$\alpha$ : difusividad térmica del material; m<sup>2</sup>/s.

$y$ : altura de la sección analizada; m.

$l$ : altura de referencia considerada para el análisis de la distribución de temperatura; m.

Al resolver la ecuación 11, con las condiciones representadas en las ecuaciones 13-16, se aplica el método de separación de variables, para ello se introduce una nueva función incógnita  $v(y, \tau)$ , según la expresión 17.

$$v(y, \tau) = T(y, \tau) - U(y, \tau) \quad (17)$$

Siendo:

$$U(y, \tau) = \mu_1(\tau) + \frac{y}{l} [\mu_2(\tau) - \mu_1(\tau)] = T_0 + \frac{y}{l} [T_s(\tau) - T_0] \quad (18)$$

La función  $v(y, \tau)$  se determina como la solución de la ecuación 19.

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} - \alpha \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = f(y, \tau) - \left[ \frac{\partial U}{\partial \tau} - \alpha \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right] = 0 - \left[ \frac{y}{l} \cdot \frac{dT_s}{d\tau} - \alpha \cdot (0) \right] = -\frac{y}{l} \cdot \frac{dT_s}{d\tau} \quad (19)$$

Con las condiciones complementarias siguientes:

$$v(y, 0) = T(y, 0) - U(y, 0) = \varphi(y) - \left\{ T_0 + \frac{y}{l} [T_s(0) - T_0] \right\} = \frac{y}{l} [T_0 - T_s(0)]$$

$$v(0, \tau) = T(0, \tau) - U(0, \tau) = \mu_1(\tau) - \mu_1(\tau) = 0 \quad (20)$$

$$v(l, \tau) = T(l, \tau) - U(l, \tau) = T_s(\tau) - T_s(\tau) = 0$$

Se resuelve el problema de contorno anterior (ecuación 19 con las condiciones representadas en 20) suponiendo que la solución tiene la forma de una Serie de Fourier y se obtiene que:

$$v(y, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} 2 \frac{\cos(n\pi)}{n\pi} e^{\alpha \left(\frac{-n\pi}{l}\right)^2 \cdot \tau} \cdot \left[ \int_0^{\tau} e^{\alpha \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \cdot \theta} \cdot \frac{dT_s(\theta)}{d\tau} d\theta + T_s(0) - T_0 \right] \cdot \text{sen}\left(\frac{n\pi}{l} y\right) \quad (21)$$

Al sustituir las ecuaciones 21 y 18 en la 17 se obtiene la expresión 22, la cual constituye el modelo matemático para el cálculo de la distribución de temperatura del material en una pila de mena laterítica expuesta a secado natural. El referido modelo tiene como elemento novedoso que es el resultado de la solución de un problema de contorno específico que incluye las condiciones iniciales y de frontera (esta última variable en función de la posición y el tiempo) características del proceso de secado natural de la mena laterítica.

$$T(y, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} 2 \frac{\cos(n\pi)}{n\pi} e^{\alpha \left(\frac{-n\pi}{l}\right)^2 \cdot \tau} \cdot \left[ \int_0^{\tau} e^{\alpha \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \cdot \theta} \cdot \frac{dT_s(\theta)}{d\tau} d\theta + T_s(0) - T_0 \right] \cdot \text{sen}\left(\frac{n\pi}{l} y\right) + \left\{ T_0 + \frac{y}{l} [T_s(\tau) - T_0] \right\} \quad (22)$$

#### 4. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

##### 4.1. Radiación solar global que incide sobre la superficie

Los valores obtenidos para la radiación solar global que incide sobre la superficie de secado de la pila fueron calculados empleando la expresión 6, la cual fue establecida para las condiciones específicas del proceso investigado.

En la Figura 3 se observa que la radiación solar medida sobre la superficie horizontal, en general, difiere apreciablemente de la radiación global que incide sobre los taludes Este y Oeste de la pila. Lo anterior se debe a que la superficie de secado de la pila está inclinada sesenta y un grados sexagesimales. De lo aquí expuesto se deduce la importancia que tiene, en el diseño de una tecnología eficiente de secado natural, la evaluación rigurosa de la radiación solar disponible e incidente.

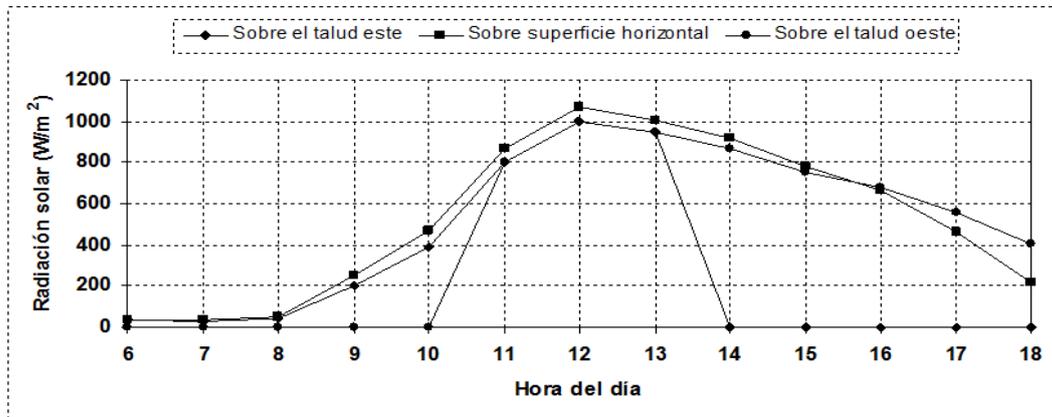


Figura 3. Radiación solar global que llega a la superficie de secado de la pila de mena laterítica.

También se aprecia en la Figura 3 que, a partir de las doce horas, la radiación es más intensa y, en consecuencia, el secado en el talud Oeste de la pila será más rápido que en el Este, por tanto, el proceso de remoción del material debe realizarse en el sentido Este-Oeste. Lo anterior es congruente con el procedimiento propuesto por Estenoz (2009), el cual tiene como objetivo desarrollar un método que posibilite aprovechar al máximo las energías solar y eólica en el proceso de secado natural.

#### 4.2. Distribución de temperatura del material en la pila

Durante el proceso de secado natural de la mena laterítica la superficie de secado de la pila recibe la radiación solar, una parte del calor recibido se emplea en evaporar la humedad no estructural del producto y la otra parte se aprovecha en variar la energía interna del material, lo cual provoca un incremento de su temperatura.

De las Figuras 4 y 5 se observa que la superficie de secado de la pila (altura  $h = 4,758$  m) incrementa su temperatura después de las ocho y diez horas, respectivamente (posterior a las dos y cuatro horas de secado), y los mayores valores en el talud Este de la pila se obtienen entre las 10:00 y las 13:30 horas, donde oscilan sus valores extremos entre los 51,4 °C y 82,9 °C (Figura 4).

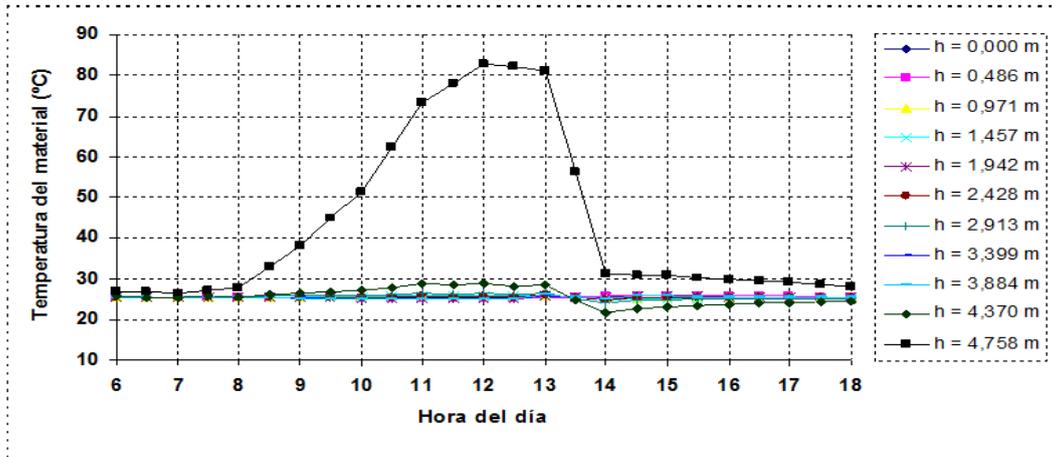


Figura 4. Distribución de temperatura en la mena laterítica, desde la base hasta la superficie del talud Este de la pila.

En el talud Oeste los mayores valores de temperatura de la mena laterítica se alcanzan entre las 11:00 y las 16:00 horas, donde oscilan entre los 70,8 °C y 85,7 °C (Figura 5). Sin embargo, en ambos taludes, para las restantes alturas consideradas, este parámetro tiene un comportamiento aproximadamente constante e igual al valor inicial (25,4 °C), excepto en h = 4,370 m donde se alcanzan valores cercanos a los 29 °C y 31 °C, entre las 11:00 y las 13:00 horas.

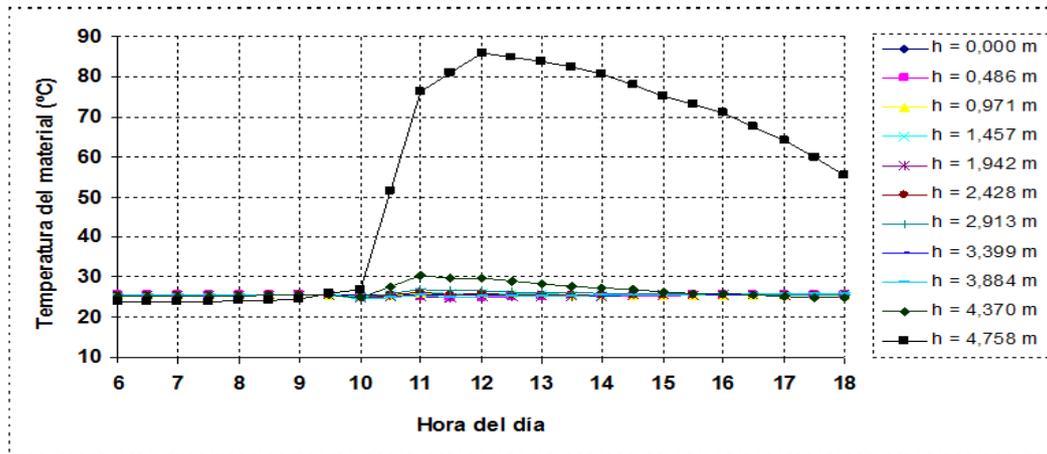


Figura 5. Distribución de temperatura en la mena laterítica, desde la base hasta la superficie del talud Oeste de la pila.

De las Figuras 4 y 5 se infiere que la mena laterítica se caracteriza por ser un material mal conductor del calor, por cuanto los cambios que se producen en la temperatura superficial de la pila de minerales no inciden significativamente en la capa de material que se encuentra a una distancia de 38,8 cm.

Con el objetivo de determinar en cuál espesor de material se produce un cambio significativo en la temperatura de la mena laterítica en el interior de la pila, se graficaron sus valores para alturas más cercanas a la superficie de secado (Figuras 6 y 7).

Como se aprecia en estas figuras, para  $h = 4,661$  m, a partir de las 10:00 a.m. y 11:00 a.m. se produce un incremento considerable en la temperatura del material respecto a su valor inicial, sin embargo, para la altura siguiente ( $h = 4,564$  m), los valores no cambian significativamente, lo que indica que, para las condiciones de secado natural analizadas en las simulaciones, la conducción del calor en ambos taludes de la pila se produce en una capa de material de aproximadamente 9,7 cm de espesor. Este comportamiento sugiere que la conducción es un fenómeno superficial.

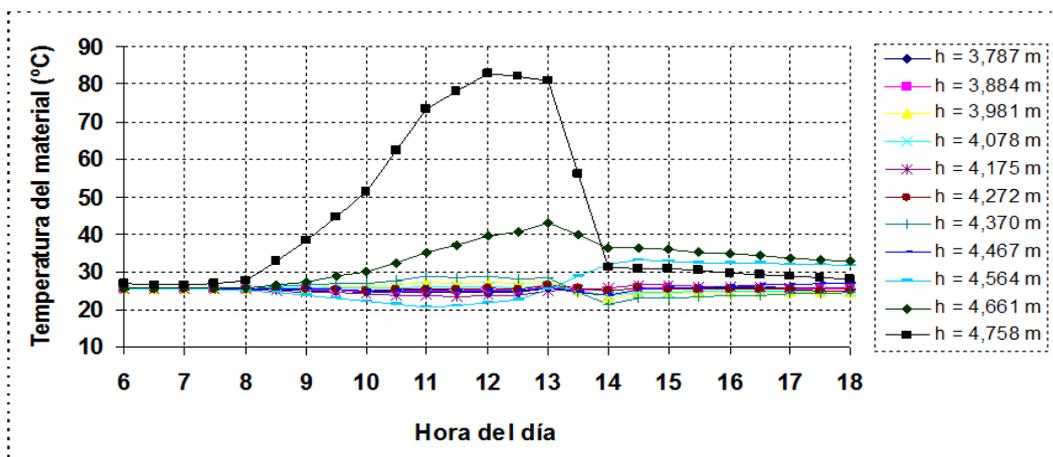


Figura 6. Distribución de temperatura en función del espesor de secado (talud Este de la pila).

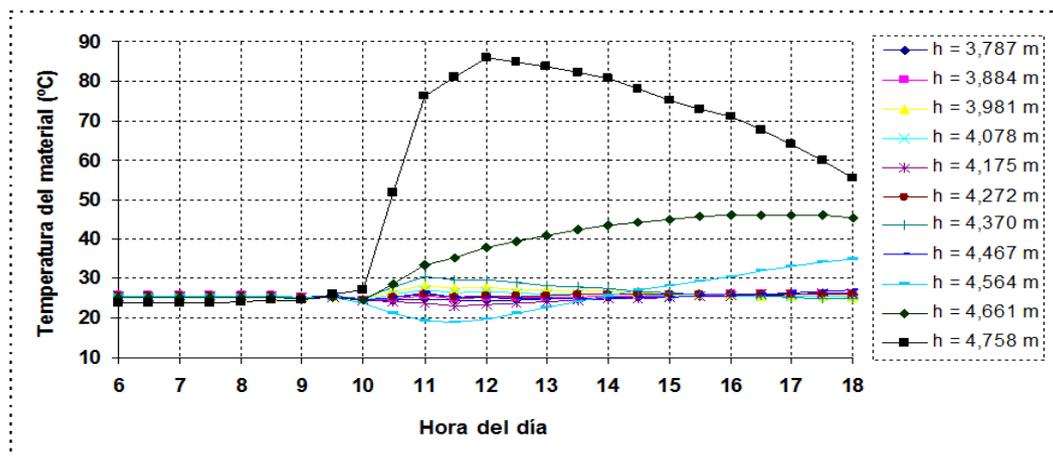


Figura 7. Distribución de temperatura en función del espesor de secado (talud Oeste de la pila).

Finalmente, se debe destacar que los resultados obtenidos para la distribución de temperatura (Figuras 4; 5; 6 y 7), analizados de forma integrada, son congruentes con lo expuesto en investigaciones previas (Retirado *et al.* 2012b; Retirado 2012) en las que se demuestra que durante el proceso de secado natural de la mena laterítica el transporte de la humedad se produce por efectos combinados de los gradientes de temperatura y de humedad, actuando el primero en las capas cercanas a la superficie de secado de la pila como resultado del calentamiento del material en esa zona; y el segundo, en las capas interiores, como consecuencia de la diferencia de concentración de humedad que existe dentro de la pila.

## **5. CONCLUSIONES**

La ecuación 22 constituye el modelo que permite calcular la distribución de temperatura de la mena laterítica en las pilas expuestas a secado natural. Se deduce del análisis físico-matemático y la solución de un problema de contorno que incluye las condiciones iniciales y de frontera características del proceso investigado. Dicho modelo incorpora la modelación matemática del efecto de sombra que se produce por el movimiento diario del sol y la inclinación de la superficie de secado de la pila, y la utilización del número de Nusselt como una función dinámica que depende del tipo de convección que predomina durante la implementación del secado natural.

Las simulaciones desarrolladas evidenciaron que durante el proceso de secado natural de la mena laterítica se producen cambios significativos en la temperatura del material hasta las capas que se encuentran a 9,7 cm de la superficie de secado, en ambos taludes de la pila. Sin embargo, a los 38,8 cm de la superficie los efectos de la conducción de calor son prácticamente nulos. Lo anterior sugiere que el material es mal conductor del calor y que el intercambio térmico por conducción en las pilas de minerales se produce de manera superficial.

## **6. REFERENCIAS**

- ESTENOZ, S.; ALDERÍ, A.; REYES, A.; LOVAINA, Y. & PINTO, H. 2007a: Uso racional de los recursos con la explotación de los depósitos de estabilización de la calidad en la empresa Ernesto Che Guevara. En: II Congreso Cubano de Minería. La Habana.
- ESTENOZ, S.; ALDERÍ, A.; BATISTA, N.; DONATIÉN, A. & PÉREZ, N. 2007b: Aplicación del secado solar y la homogeneización en la industria niquelífera Comandante Ernesto Che Guevara. En: II Congreso Cubano de Minería. La Habana.

- ESTENOZ, S. 2009: Sistema integral de explotación minera para desarrollo sostenible de recursos naturales y su procesamiento tecnológico. Casos de estudio. En: III Congreso Cubano de Minería. Memorias. La Habana.
- FERREIRA, S. & COSTA, A. 2009: Parámetros de transferencia de materia en el secado de frutas. *Información Tecnológica* 20(2): 89-104.
- HERNÁNDEZ, J. & QUINTO, P. 2005: Secado de medios porosos: una revisión a las teorías actualmente en uso. *Científica* 9(2): 63-71.
- INCROPERA, F. & DE WITT, D. 2003: *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Editorial Pueblo y Educación, La Habana. 3 t.
- JAIN, D. & TIWARI, G. 2004: Effect of greenhouse on crop drying under natural and forced convection I: Evaluation of convective mass transfer coefficient. *Energy Conversion and Management* 45(1): 765-783.
- JIMÉNEZ, H. 1999: *Modelamiento matemático de los procesos de transferencia de momentum, calor y masa en medios porosos*. Tesis doctoral. Universidad Autónoma Metropolitana: División de Ciencias Básicas e Ingeniería. 289 p.
- KASATKIN, A. 1987: *Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química*. Editorial Pueblo y Educación, La Habana. 2 t.
- LEGRÁ, A. 2010: Automatización del control del cálculo de extracciones en la mina de la empresa niquelera Ernesto Che Guevara. *Minería y Geología* 26(2): 55-73. Consultado: 26 de septiembre de 2012. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg>.
- MCQUISTON, F.; PARKER, J. & SPITLER, J. 2008: *Calefacción, ventilación y aire acondicionado. Análisis y Diseño*. Editorial Limusa Wiley, México D.F., 622 p.
- MONTERO, I. 2005: *Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos*. Tesis doctoral. Universidad de Extremadura. Badajoz. 262 p. Consultado: 10 de enero de 2010. Disponible en: <http://www.unex.es/publicaciones>.
- RAFIEE, S.; KEYHANI, A. & MOHAMMADI, A. 2008: Soybean seeds mass transfer simulation during drying using Finite Element Method. *World Applied Sciences* 4(2): 284-288.
- RETIRADO, Y.; LEGRÁ, A.; LAMORÚ, M.; TORRES, E. & LAURENCIO, H. 2012a: Optimización del secado solar de la mena laterítica en la industria cubana del níquel. *Minería y Geología* 28(2): 30-46. Consultado: 5 de noviembre de 2012. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg>.
- RETIRADO, Y.; LEGRÁ, A.; LAMORÚ, M.; TORRES, E.; LAURENCIO, H. & GÓNGORA, E. 2012b: Modelación y simulación del proceso de

- secado natural de la mena laterítica. *Minería y Geología* 28(4): 1-19. Consultado: 21 de enero de 2013. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg>
- RETIRADO, Y. & LEGRÁ, A. 2011: Modelación matemática del área de exposición y del volumen de las pilas de menas lateríticas expuestas a secado solar natural. *Minería y Geología* 27(2): 84-108. Consultado: 20 de septiembre de 2012. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg>.
- RETIRADO, Y.; GÓNGORA, E.; TORRES, E.; LAMORÚ, M. & LEYVA, B. 2011: Transferencia de calor en el secado solar a la intemperie de menas lateríticas ferroniquelíferas. *Minería y Geología* 27(1): 1-21. Consultado: 15 de octubre de 2011. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg>.
- RETIRADO, Y.; GÓNGORA, E.; TORRES, E. & HERNÁNDEZ, N. 2009: Comportamiento de la adherencia en menas lateríticas sometidas a secado solar natural. *Minería y Geología* 25(1): 1-11. Consultado: 16 de diciembre de 2011. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg>.
- RETIRADO, Y. 2012: *Modelación matemática del proceso de secado natural de las menas lateríticas*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 183 p.
- SANDOVAL-TORRES, S. 2009: Modelación matemática del secado convencional de madera. *Madera y Bosques* 15(1): 75-89.
- SIERRA, R.; LEGRÁ, A.; DONATIEN, A. & MATOS, L. 2009: Caracterización de la mena laterítica para el ajuste de parámetros tecnológicos del transportador de banda. *Minería y Geología* 25(3): 1-18. Consultado: 16 de noviembre de 2012. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg>.
- TIJONOV, A. & SAMARSKY, A. 1980: *Ecuaciones de la física matemática*. MIR, Moscú, 824 p.
- TIWARI, G. & SARKAR, B. 2006: Experimental study of greenhouse Prawn drying under natural convection. *Agricultural Engineering International* 8(16): 1-9.
- TIWARI, G.; KUMAR, S. & PRAKASH, O. 2004: Evaluation of convective mass transfer coefficient during drying of Jaggery. *Journal of Food Engineering* 63(1): 219-227.

Yoalbys Retirado-Mediaceja [yretirado@ismm.edu.cu](mailto:yretirado@ismm.edu.cu)

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar. Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.

Arístides Alejandro Legrá-Lobaina [alegra@ismm.edu.cu](mailto:alegra@ismm.edu.cu)

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar. Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.

Marbelis Lamorú-Urgellés [mlamoru@ismm.edu.cu](mailto:mlamoru@ismm.edu.cu)

Máster en Electromecánica. Profesora Asistente. Departamento de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.

Enrique Torres-Tamayo [etorrest@ismm.edu.cu](mailto:etorrest@ismm.edu.cu)

Doctor en Ciencias Técnicas Profesor Titular.. Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.

Héctor Luis Laurencio-Alfonso [hlaurencio@ismm.edu.cu](mailto:hlaurencio@ismm.edu.cu)

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar. Departamento de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.

Ever Góngora-Leyva [egongora@ismm.edu.cu](mailto:egongora@ismm.edu.cu)

Máster en Electromecánica. Profesor Auxiliar. Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.