

Modelación y simulación del proceso de secado natural de la mena laterítica

Yoalbys Retirado-Mediaceja
Arístides A. Legrá-Lobaina
Marbelis Lamorú-Urgelles
Enrique Torres-Tamayo
Héctor L. Laurencio-Alfonso
Ever Góngora-Leyva

Resumen

Se modeló y simuló el secado natural de la mena laterítica con el propósito de obtener la distribución de humedad y su mecanismo de movimiento en las pilas de mena. Los modelos matemáticos se obtuvieron resolviendo, mediante el método de separación de variables, la ecuación diferencial de intercambio de humedad en un sólido poroso para las condiciones iniciales y de frontera específicas del secado natural; las simulaciones se realizaron con una aplicación informática creada para estos fines. Los resultados evidenciaron que durante el proceso se producen cambios significativos en la humedad del material hasta las capas que se encuentran separadas alrededor de 29 y 87 cm de la superficie de los taludes este y oeste de la pila, respectivamente. Además, se corroboró que el desplazamiento de la humedad en las pilas de minerales se produce por la acción de un mecanismo mixto de transporte que incluye los efectos combinados de la difusión de vapor, la difusión líquida y el movimiento de líquido.

Palabras clave

Modelación matemática; simulación; secado solar natural; mena laterítica.

Modeling and simulation of the natural drying process in lateritic ore deposits

Abstract

The natural drying process of lateritic ore deposits was modeled and simulated in order to obtain the moisture distribution and the moisture movement mechanisms in the ore piles. Mathematical models were obtained by solving the differential equation of the humidity exchange of porous solid materials for initial and specific boundary conditions of natural drying through the variable separation method. The simulations were carried out using a computer application created for this purpose. The results indicated that during the process significant changes occur in the moisture of the materials with layers 29 and 87 cm apart from the east and west embankments of the ore pile, respectively. In addition, it was confirmed that the moisture movement in the ore piles occurs through a mixed transport mechanism; including combined effects of vapor diffusion, liquid diffusion and liquid movement.

Keywords

Mathematical modeling; simulation; natural solar drying; lateritic ore deposit.

1. INTRODUCCIÓN

La modelación matemática permite el estudio teórico del secado solar natural de la mena laterítica y posibilita simulaciones computacionales de ese proceso mediante el empleo de sistemas informáticos adecuados. Ello constituye una alternativa, tecnológicamente viable, para predecir el comportamiento de la distribución de humedad del material cuando las variables independientes y los parámetros de los modelos matemáticos toman ciertos valores.

Al nivel internacional la modelación matemática del secado solar natural ha sido utilizada con diversos propósitos científico-técnicos. Se reportan estudios sobre el secado de granos (café, arroz), madera, pulpa de bagazo y lodos (Hossain *et al.* 2005; Hernández *et al.* 2008; Montes *et al.* 2008; Morsetto *et al.* 2008; Salinas *et al.* 2008; Ferreira & Costa 2009).

En Cuba los trabajos publicados referentes a la modelación del proceso de secado no contienen modelos matemáticos del secado solar natural para los minerales lateríticos; se circunscriben mayormente al análisis termoenergético y termodinámico del secado solar.

En las últimas décadas entre los materiales que han sido objeto de estudio en investigaciones sobre secado se encuentran el café, las semillas, las plantas medicinales, la madera y los productos varios (Ferro *et al.* 1999, 2000; Fonseca *et al.* 2000, 2002, 2003; Abdala *et al.* 2003; Griñán & Fonseca 2003; Bergues *et al.* 2002, 2003a y b, 2006; Pacheco *et al.* 2006).

La búsqueda bibliográfica realizada reveló que el secado solar natural de los minerales lateríticos es escasamente tratado en las publicaciones científicas. En Cuba los aspectos teórico-experimentales, tecnológicos y minero-metalúrgicos del proceso han sido estudiados por Estenoz *et al.* (2007a y b); Retirado *et al.* (2007, 2009, 2011); Estenoz (2009) y Vinardell (2011); en ninguno de estos estudios mencionados se aborda el análisis matemático y computacional del secado de minerales. Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo del presente artículo es desarrollar la modelación matemática, basada en ecuaciones diferenciales, y la simulación del proceso de secado natural de la mena laterítica procesada por la industria cubana del níquel.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Método de solución para la obtención de los modelos

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 (Edwards & Penney 1994; Jiménez 1999; Young *et al.* 2008). En este trabajo se empleó, para la obtención de los modelos matemáticos, el método de separación de variables, porque a través del mismo se muestra explícitamente la dependencia entre las variables más influyentes en el proceso investigado.

Las simulaciones se realizaron con una aplicación informática creada para este propósito y se estudió el comportamiento de la distribución de humedad en una pila de mena laterítica expuesta a secado natural. Las características de la pila son las siguientes:

- Masa de material expuesta a secado natural: 700 t;
- Longitud de la superficie lateral: 140 m;
- Ancho de la base: 5,49 m;
- Inclinação de la superficie de secado de los taludes este y oeste respecto al plano horizontal: 61 grados sexagesimales;
- Forma geométrica de la sección transversal: triangular.

Las características antes expuestas se corresponden con las que tienen las pilas utilizadas en la implementación práctica del proceso de secado natural en las empresas cubanas productoras de níquel (Estenoz *et al.* 2007a y b; Estenoz 2009; Vinardell 2011).

3. MODELOS DEL PROCESO

3.1. Modelo general

Durante el proceso de secado natural de la mena laterítica, como resultado de la incidencia de la radiación solar, en la superficie de secado de la pila se forma una película de vapor de agua, la humedad del material disminuye y en el interior de la pila surgen dos gradientes: el de humedad (∇H) y el de temperatura (∇T). En presencia de ambos gradientes se inicia el desplazamiento de la humedad desde las capas interiores hasta la superficie de secado de la pila.

Para el estudio del proceso se considera que los coeficientes k_u y δ son constantes y no dependientes de la humedad del material. Se empleó la ecuación 1 obtenida por Likov (1968). Esta expresión constituye el

modelo general que caracteriza la velocidad de cambio de la humedad en el interior de un sólido poroso en un punto de coordenadas (x; y; z) en el tiempo τ , es por ello que ha sido sugerida y empleada por varios investigadores para el estudio del proceso de secado de materiales porosos (Hernández & Quinto 2005; Hernández *et al.* 2008).

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} = k_u \cdot \left[\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} + \delta \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \right] \quad (1)$$

Donde:

H : humedad del material; kg/kg.

τ : tiempo de secado; s.

k_u : coeficiente de conducción de humedad; m²/s.

δ : coeficiente térmico de conducción de humedad; 1/°C.

T : temperatura del material; °C.

Mediante la ecuación 1 simplificada se determina la distribución de humedad en las pilas de mena laterítica expuestas a secado natural (ecuación 2). Para ello se resuelve la misma usando las condiciones iniciales y de frontera específicas (problemas de contorno característicos) del proceso investigado, según se muestra en el epígrafe que a continuación se expone.

3.2. Modelos particulares

La expresión que caracteriza la distribución de humedad [$H(y,\tau)$] en la pila de mena laterítica se determina considerando que la ecuación 2, con las condiciones iniciales y de frontera (sistema de ecuaciones 5), se corresponde con el primer problema general de contorno definido por Tijonov y Samarsky (1980).

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} - k_u \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = f(y,\tau) \quad (2)$$

Siendo:

$$f(y, \tau) = k_u \cdot \delta \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = - \sum_{n=1}^{\infty} 2 \frac{\cos(n\pi) \cdot (n\pi)}{l^2} \cdot e^{-\alpha \cdot \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \cdot \tau} \left[\int_0^{\tau} e^{\alpha \cdot \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \cdot \theta} \cdot \frac{dT_s(\theta)}{d\tau} d\theta \right] \cdot \text{sen}\left(\frac{n\pi}{l} y\right) \quad (4)$$

Condiciones iniciales y de frontera

$$\begin{aligned} H(y, 0) &= \Omega(y) \\ H(0, \tau) &= H_0 \\ H(l, \tau) &= H_s(\tau) \end{aligned} \quad (5)$$

Donde:

$\Omega(y)$: función que caracteriza el cambio de H_0 en cada instante de tiempo τ y posición "y"; kg/kg.

H_0 : humedad inicial del material; kg/kg.

$H_s(\tau)$: humedad del material en la superficie de secado de la pila (para cuando se cumple la condición que $y = l$); kg/kg.

Para emplear este enfoque es necesario discretizar la distribución de la humedad y para ello se divide la pila en cortes de espesor fino y cada uno de estos en secciones de ancho suficientemente pequeño, según se muestra en la Figura 1.

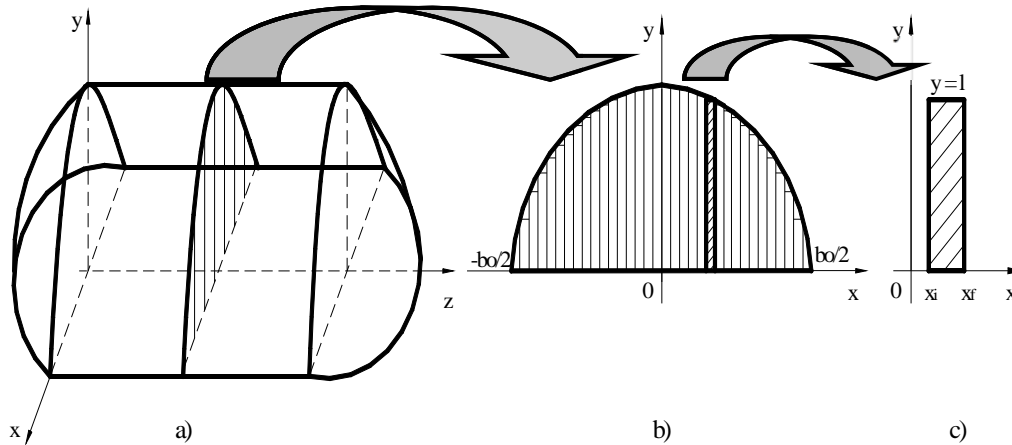


Figura 1. Esquema para el análisis de la distribución de humedad. a): Pila de mena laterítica; b): Corte de la sección transversal; c): Sección analizada en el corte.

Para resolver la ecuación 2 se aplica el método de separación de variables y se emplea la Figura 1, para ello se introduce una nueva función incógnita $v(y, \tau)$, según la expresión 6.

$$v(y, \tau) = H(y, \tau) - U(y, \tau) \quad (6)$$

Siendo:

$$U(y, \tau) = H_0 + \frac{y}{l} [H_s(\tau) - H_0] \quad (7)$$

La función $v(y, \tau)$ se determina como la solución de la ecuación 8.

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial \tau} - k_u \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} &= \left[\frac{\partial H}{\partial \tau} - k_u \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right] - \left[\frac{\partial U}{\partial \tau} - k_u \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right] = \\ &= f(y, \tau) - \left[\frac{y}{l} \frac{dH_s}{d\tau} - k_u(0) \cdot \right] = f(y, \tau) - \left[\frac{y}{l} \frac{dH_s}{d\tau} \right] = R(y, \tau) \end{aligned} \quad (8)$$

Con las condiciones complementarias:

$$\begin{aligned} v(y, 0) &= H(y, 0) - U(y, 0) = \Omega(y) - H_0 - \frac{y}{l} [H_s(0) - H_0] \\ v(0, \tau) &= H(0, \tau) - U(0, \tau) = H_0 - H_0 = 0 \\ v(l, \tau) &= H(l, \tau) - U(l, \tau) = H_s(\tau) - [H_0 + H_s(\tau) - H_0] = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Luego el problema anterior se reduce a la ecuación 10 y las condiciones representadas en 11.

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} - k_u \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = R(y, \tau) \quad (10)$$

$$v(y, 0) = H(y, 0) - U(y, 0) = \Omega(y) - H_0 - \frac{y}{l} [H_s(0) - H_0] = \beta(y)$$

$$v(0, \tau) = 0 \quad (11)$$

$$v(l, \tau) = 0$$

Este último problema (ecuación 10 con las condiciones representadas en 11) se resuelve suponiendo que la solución tiene la forma de una Serie de Fourier; para ello se plantea la expresión 12.

$$v(y, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} v_n(\tau) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{l} y\right) \quad (12)$$

Luego se designa la función $R(y, \tau)$ a través de la expresión 13.

$$R(y, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} R_n(\tau) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{l} y\right) \quad (13)$$

Siendo:

$$R_n(\tau) = \frac{2}{l} \cdot \int_0^l R(y, \tau) \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{l} y\right) dy = \frac{2}{l} \cdot \int_0^l \left[f(y, \tau) - \frac{y}{l} \frac{dH_s}{d\tau} \right] \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{l} y\right) dy \quad (14)$$

Por tanto:

$$R(y, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2}{l} \int_0^l R(y, \tau) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{l} y\right) dy \right] \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{l} y\right) \quad (15)$$

Sustituyendo las expresiones 12 y 15 en la ecuación 10 se obtiene:

$$\left[\sum_{n=1}^{\infty} v_n(\tau) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{l} y\right) \right]_{\tau} - k_u \cdot \left[\sum_{n=1}^{\infty} v_n(\tau) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{l} y\right) \right]_{yy} = \left[\sum_{n=1}^{\infty} R_n(\tau) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{l} y\right) \right] \quad (16)$$

Derivando y agrupando los términos de la ecuación anterior resulta:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left\{ v'_n(\tau) + k_u \cdot \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \cdot v_n(\tau) - R_n(\tau) \right\} \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{l} y\right) = 0 \quad (17)$$

Esta expresión es válida si para todo $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$ se cumple que:

$$v'_n(\tau) + k_u \cdot \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \cdot v_n(\tau) = R_n(\tau) \quad (18)$$

Nótese que se trata de encontrar $v_n(\tau)$ como solución de la ecuación diferencial 18.

Conociendo que:

$$v(y, 0) = \beta(y) = \Omega(y) - H_0 - \frac{y}{l} [H_0 - H_s(0)] = \sum_{n=1}^{\infty} v_n(0) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{l} y\right) \quad (19)$$

Se agrupa la expresión anterior y se aplica el concepto de la Serie de Fourier, obteniéndose la expresión 20 para el cálculo de $v_n(0)$.

$$v_n(0) = \frac{2}{l} \cdot \int_0^l [\beta(y)] \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{l} y\right) dy \quad (20)$$

Si se considera que $\Omega(y)$ es una función variable respecto a la longitud (l), entonces se obtiene que:

$$v_n(0) = \frac{2H_s(0) \cdot \cos(n\pi)}{n\pi} + \frac{2[H_0 - H_s(0)] \cdot \text{sen}(n\pi)}{n^2\pi^2} + \frac{2 \left[n\pi \int_0^l H_1(y) \text{sen}\left(\frac{n\pi}{l} y\right) dy - H_0 \cdot l \right]}{n\pi \cdot l} \quad (21)$$

Al resolver la ecuación diferencial 18 con la condición expuesta en 21 se obtiene:

$$v_n(\tau) = e^{-k_u \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \tau} \cdot \left[\cos(n\pi) \cdot \left(A + \frac{2H_s(0)}{n\pi} \right) + B \right] \quad (22)$$

Siendo:

$$A = \frac{2 \cdot \int_0^l e^{k_u \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \theta} R_n(\theta) \cdot d\theta - 2 \cdot [H_1 - H_s(0)]}{n\pi} \quad (23)$$

$$B = \frac{2[H_0 - H_s(0)] \cdot \text{sen}(n\pi)}{n^2\pi^2} + \frac{2 \left[n\pi \int_0^l H_1(y) \text{sen}\left(\frac{n\pi}{l} y\right) dy - H_0 \cdot l \right]}{n\pi \cdot l} \quad (24)$$

Luego:

$$v(y, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ e^{-k_u \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \tau} \left[\cos(n\pi) \left(A + \frac{2H_s(0)}{n\pi} \right) + B \right] \right\} \cdot \text{sen}\left(\frac{n\pi}{l} y\right) \quad (25)$$

Al sustituir las ecuaciones 25 y 7 en la ecuación 6 se obtiene la expresión 26, la cual constituye el modelo matemático satisfactorio

para el cálculo de la distribución de humedad del material $[H(y,\tau)]$ en una pila de mena laterítica expuesta a secado natural.

$$H(y,\tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ e^{-k_u \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \tau} \left[\cos(n\pi) \left(A + \frac{2H_s(0)}{n\pi} \right) + B \right] \cdot \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi}{l} y \right) + H_0 + \frac{y}{l} [H_s(\tau) - H_0] \right\} \quad (26)$$

Para el caso particular en que $\Omega(y) = H_1 = \text{constante}$ se procede de forma análoga al caso general anteriormente expuesto [donde $\Omega(y) = \text{variable}$] y se obtienen las expresiones 27-32.

$$v_n(0) = \frac{2(H_s(0) - H_1) \cdot \cos(n\pi)}{n\pi} + \frac{2(H_0 - H_s(0)) \cdot \operatorname{sen}(n\pi)}{n^2\pi^2} - \frac{2(H_0 - H_1)}{n\pi} \quad (27)$$

$$v_n(\tau) = e^{-k_u \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \tau} \cdot [\cos(n\pi) \cdot (A^*) + B^*] \quad (28)$$

Siendo:

$$A^* = \frac{2 \cdot \int_0^{\tau} e^{-k_u \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \theta} R_n(\theta) \cdot d\theta - 2 \cdot [H_1 - H_s(0)]}{n\pi} \quad (29)$$

$$B^* = \frac{2[H_0 - H_s(0)] \cdot \operatorname{sen}(n\pi)}{n^2\pi^2} - \frac{2(H_0 - H_1)}{n\pi} \quad (30)$$

Luego se obtiene que:

$$v(y, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ e^{-k_u \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 \cdot \tau} \cdot [\cos(n\pi) \cdot (A^*) + B^*] \right\} \cdot \text{sen} \left(\frac{n\pi}{l} y \right) \quad (31)$$

Y por tanto:

$$H(y, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ e^{-k_u \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 \cdot \tau} \cdot [\cos(n\pi) \cdot (A^*) + B^*] \right\} \cdot \text{sen} \left(\frac{n\pi}{l} y \right) + H_0 + \frac{y}{l} [H_s(\tau) - H_0] \quad (32)$$

El modelo matemático representado en la ecuación 32 es análogo al obtenido para el caso general (ecuación 26), sin embargo, el mismo solo debe ser utilizado para el caso en que la humedad inicial del material (H_0) en cada instante de tiempo τ y posición "y" permanezca constante.

4. SIMULACIÓN

4.1. Distribución de humedad del material en la pila

Los valores de la humedad del material se obtienen con las ecuaciones 26 y 32, y se grafican (Figuras 2 a la 5). En general se observan pequeñas reducciones en el contenido de humedad de la mena laterítica. Estas menguas no exceden el 1,618 % en el talud este ni el 4,312 % en el talud oeste de la pila de mineral (Figuras 2 y 3). Tales resultados se corresponden con la cantidad de energía solar y eólica disponible para la implementación del proceso de secado natural y con las características del movimiento de la fuente primaria de energía que se utiliza: el sol.

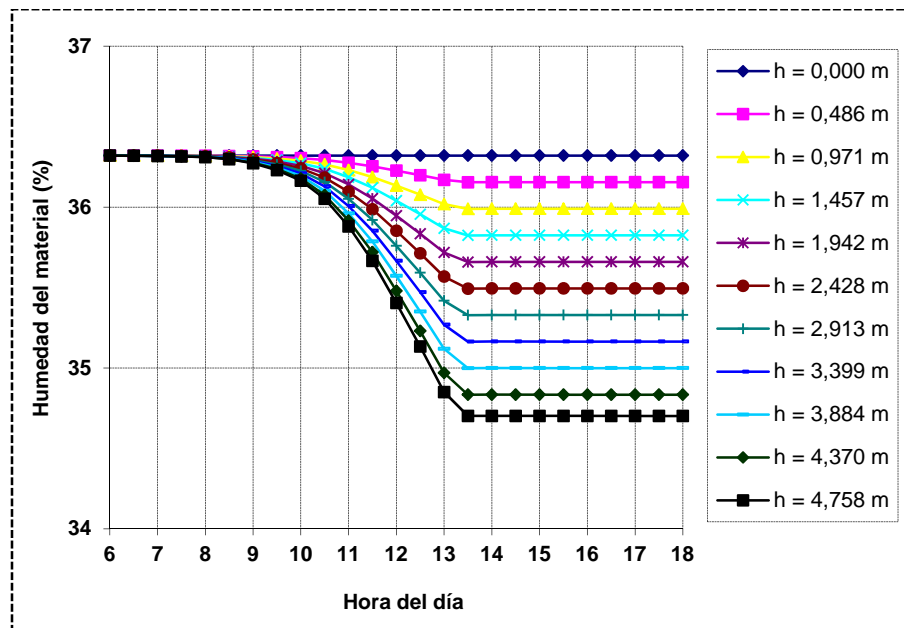


Figura 2. Comportamiento de la distribución de humedad de la mena laterítica en el talud este de la pila, desde la base hasta la superficie de secado.

En la Figura 2 se observa que en el talud este de la pila se obtienen reducciones en el contenido de humedad del material a partir de las 9 y hasta las 13:30 horas. Sin embargo, en el horario restante la humedad de la mena laterítica permanece prácticamente constante. En la mañana (desde las 6 hasta las 9 horas) se debe a los bajos niveles de radiación solar existentes en ese horario y en la tarde (de las 13:30 a las 18 horas) el comportamiento puede ser atribuido al efecto de la sombra que se genera producto de la inclinación de la superficie de secado de la pila y del movimiento diario del sol.

En el talud oeste de la pila (Figura 3) para las capas de mena laterítica ubicadas entre 0 y 2,428 m de altura se obtienen reducciones en el contenido de humedad inferiores al 2,5 %, mientras que en las capas más cercanas a la superficie de secado de la pila (desde $h = 3,884$ m hasta $h = 4,758$ m) los niveles de reducción de la humedad oscilan entre 3,2 y 4,2 %. Sin embargo, como promedio en los taludes este y oeste la humedad se redujo en 0,429 y 0,694 %, respectivamente, y en la pila completa la reducción fue de 0,562 %.

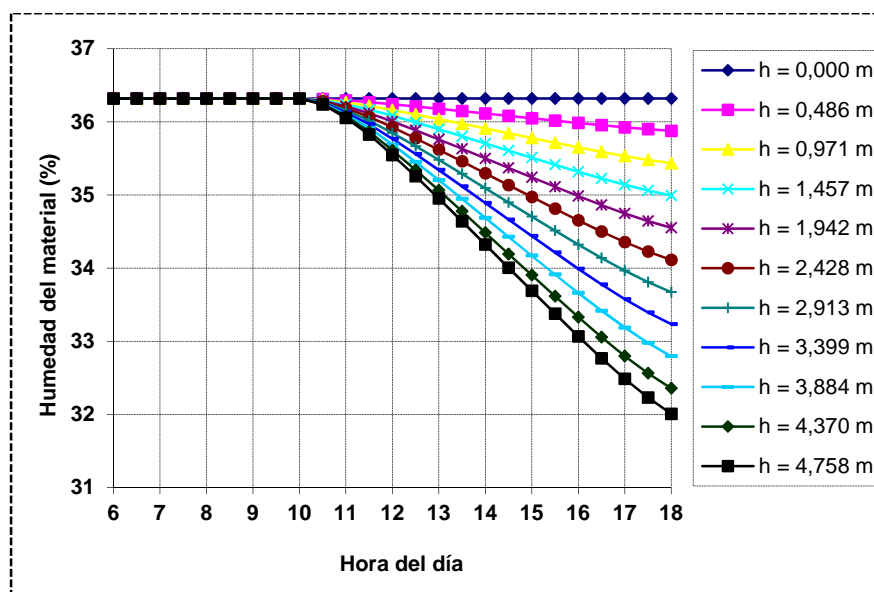


Figura 3. Comportamiento de la distribución de humedad de la mena laterítica en el talud oeste de la pila, desde la base hasta la superficie de secado.

Lo anterior sugiere que para reducir la humedad entre 5 y 6 % en la pila completa, la misma se debe someter al proceso de secado natural por un tiempo aproximado de 10 días si las condiciones meteorológicas se mantienen similares a las utilizadas en las simulaciones. De lo contrario puede que se requiera más o menos tiempo, según sea el caso, para lograr los mismos niveles de reducción de humedad en el material. Resultados similares a los expuestos en este epígrafe han sido obtenidos en la implementación práctica del proceso estudiado y en las pruebas experimentales de secado natural que constan en las investigaciones consultadas (Estenoz *et al.* 2007a y b; Retirado *et al.* 2007, 2009, 2011).

En las Figuras 4 y 5 se graficaron los valores de humedad obtenidos para las capas de material más cercanas a la superficie de la pila. En las figuras se aprecian reducciones notables de humedad (mayor de 1,5 y 3,5 %, según el talud del que se trate), hasta las capas que se encuentran a una distancia de 29,1 y 87,4 cm de la superficie de los taludes este y oeste, respectivamente.

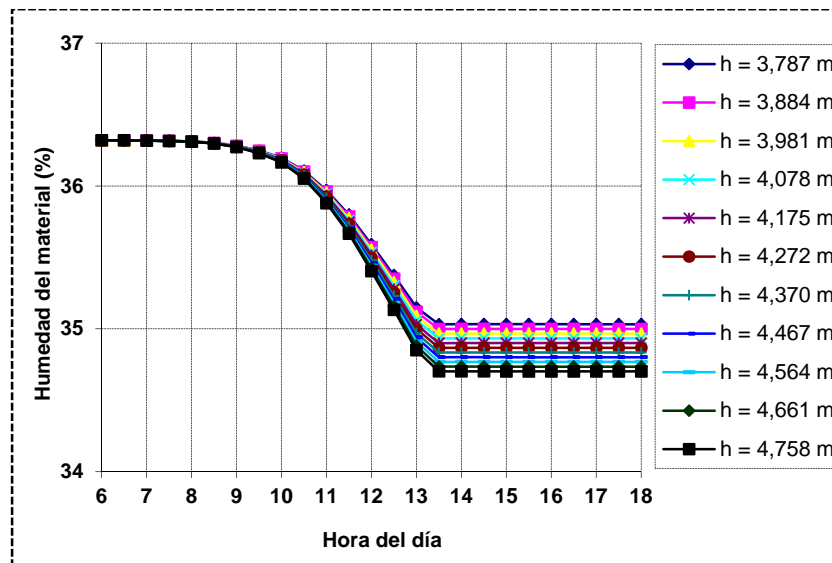


Figura 4. Comportamiento de la humedad en el talud este de la pila en función del espesor de secado.

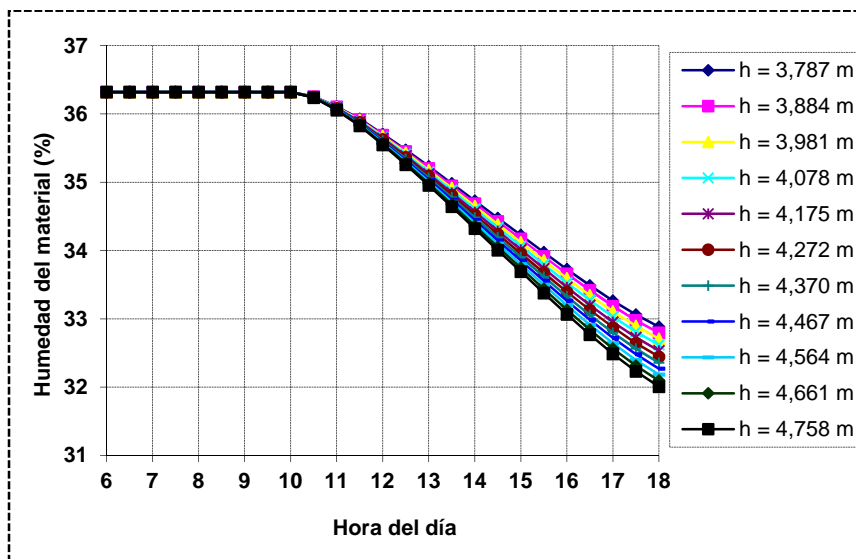


Figura 5. Comportamiento de la humedad en el talud oeste de la pila en función del espesor de secado.

Los resultados anteriores confirman que durante el proceso de secado natural de la mena laterítica el transporte de la humedad se produce por los efectos combinados de los gradientes de temperatura y de humedad. El primero actúa, fundamentalmente, en las capas cercanas a la superficie de secado de la pila como resultado del calentamiento que experimenta el material en esa zona; el segundo actúa en las

capas interiores como consecuencia de la diferencia de concentración de humedad existente entre las diferentes zonas de la pila.

Estos comportamientos sugieren que durante el proceso de secado natural el mecanismo de movimiento de la humedad es mixto e incluye los efectos combinados de la difusión de vapor debido a los gradientes de presión parcial del vapor, la difusión líquida debido a los gradientes de concentración de humedad y el movimiento de líquido debido a las fuerzas capilares y gravitatorias.

5. CONCLUSIONES

Los modelos matemáticos establecidos (expresiones 26 y 32) permiten calcular apropiadamente la distribución de humedad que experimenta la mena laterítica durante el secado natural y posibilitan pronosticar el tiempo de secado al que debe someterse el material para reducir su humedad desde un valor inicial conocido hasta otro valor final deseado. Los mismos se obtienen al resolver analíticamente la ecuación diferencial de intercambio de humedad en un sólido poroso, para los problemas de contorno específicos del proceso investigado.

El movimiento de la humedad durante el secado natural se produce, fundamentalmente, por la acción de los gradientes de temperatura y de concentración de humedad que se generan durante el proceso, y por las fuerzas capilares y gravitatorias que actúan sobre la columna de líquido presente en la pila de mena laterítica. Lo anterior determinó el surgimiento y predominio de un mecanismo mixto de transporte de la humedad que incluye los efectos combinados de la difusión de vapor, la difusión líquida y el movimiento de líquido.

En las condiciones de secado natural analizadas en las simulaciones la humedad de la mena laterítica se redujo en 1,5 y 3,5 % hasta las capas que se encuentran separadas alrededor de 29 y 87 cm de la superficie de los taludes este y oeste de la pila, respectivamente. En los referidos taludes la humedad se redujo en 0,429 y 0,694 % como promedio; y en la pila completa la reducción fue de 0,562 %, para un tiempo de secado de 12 horas contadas a partir de las 6 de la mañana.

6. REFERENCIAS

- ABDALA, J.; FONSECA, S.; PANTOJA, J. & TORRES, A. 2003: Secado de café en secadores solares multipropósito y de tambor rotatorio. *Tecnología Química* 23(3): 68-79.
- BERGUES, C.; ABDALA, J.; GRIÑÁN, P.; FONSECA, S.; PANTOJA, E.; ACOSTA, Z. & HERNÁNDEZ, G. 2003a: Concepción y evaluación de un secador solar de granos con cubierta de polietileno. *Tecnología Química* 23(1): 68-73.
- BERGUES, C.; FABAR, O. & MARTÍNEZ, A. 2006: Minisecador solar para la agricultura urbana "MINISOL". Concepción, evaluación y caracterización de sus cambios tecnológicos. *Tecnología Química* 26(2): 37-48.
- BERGUES, C.; GRIÑÁN, P.; ABDALA, J. & FONSECA, S. 2003b: *Concepción y pruebas de un secador solar de plantas medicinales con cubierta de polietileno. Una experiencia cubana*. En: Primera Convención Internacional de Energía y Medio Ambiente. Santiago de Cuba.
- BERGUES, C.; GRIÑÁN, P.; FONSECA, S.; ABDALA, J. & HERNÁNDEZ, G. 2002: Construcción y evaluación del secador solar de granos a escala industrial de 3m² en condiciones de explotación. *Tecnología Química* 22(3): 87-91.
- EDWARDS, C. & PENNEY, D. 1994: *Ecuaciones diferenciales elementales y problemas con condiciones en la frontera*. 3 ed. Editorial PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA. S.A., México, 773 p.
- 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: Memorias del III Congreso Cubano de Minería. La Habana.
- FERREIRA, S. & COSTA, A. 2009: Parámetros de transferencia de materia en el secado de frutas. *Información Tecnológica* 20(2): 89-104.
- FERRO, V.; FONSECA, S.; ABDALA, J.; TORRES, A.; PANTOJA, J.; BERGUES, C.; GRIÑÁN, P. & IBÁÑEZ, G. 1999: Análisis de opciones para el secado solar de café. Aspectos cinéticos (Parte I). *Tecnología Química* 19(3): 18-25.
- FERRO, V.; ABDALA, J.; FONSECA, S.; PANTOJA, J.; TORRES, A.; BERGUES, C.; GRIÑÁN, P. & IBÁÑEZ, G. 2000: Análisis de opciones para el secado solar de café. Aspectos energéticos, de rendimiento y económicos (Parte II). *Tecnología Química* 20(1): 52-57.
- FONSECA, S.; BERGUES, C.; ABDALA, J.; GRIÑÁN, P. & HERNÁNDEZ, G. 2002: Estudio de la cinética del secado de granos en el prototipo de secador solar. Análisis de los resultados. *Tecnología Química* 22(2): 59-64.
- FONSECA, S.; ABDALA, J.; TORRES, A. & PANTOJA, J. 2000: Análisis térmico del secador solar de tambor rotatorio para granos. *Tecnología Química* 20(3): 70-75.
- FONSECA, S.; ABDALA, J.; FERRO, V.; PANTOJA, J. & TORRES, A. 2003: Estudio comparativo del secado solar de café en plazoletas tradicionales y ennegrecidas. *Tecnología Química* 23(3): 48-54.

- GRIÑÁN, P. & FONSECA, S. 2003: *La madera y el secado solar*. Ediciones ISJAM, Santiago de Cuba, 125 p.
- HERNÁNDEZ, J.; QUINTO, P.; CUEVAS, J. & ACOSTA, R. 2008: Estudio del secado de *Capsicum Annuum* L (Chile Jalapeño) a través del modelo de Likov. *Caos Conciencia* 1(2): 21-30.
- Hernández, J. & Quinto, P. 2005: Secado de medios porosos: una revisión a las teorías actualmente en uso. *Científica* 9(2): 63-71.
- HOSSAIN, M.; WOODS, J. & BALA, B. 2005: Optimization of solar tunnel drier for drying of chilli without color loss. *Renewable Energy* 30(5): 729-742.
- 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. México, 289 h.
- LIKOV, A. 1968. *Teoría del secado*. Editorial Energía, Moscú, 297 p.
- MONTES, E.; TORRES, R.; ANDRADE, R.; PÉREZ, O.; MARIMON, J. & MEZA, I. 2008: Modelado de la cinética de secado de Ñame en capa delgada. *Ingeniería e investigación* 28(2): 45-52.
- MORSETTO, J.; LEMA, A.; PONTIN, M. & PAISIO, G. 2008: Estudio preliminar sobre la cinética de secado para Perejil en condiciones de secado solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 12(8): 141-146.
- PACHECO, P; SUÁREZ, J. & JULIÁ, E. 2006: Secado solar de maderas. Perspectiva teórica. *Tecnología Química* 26(3): 71-75.
- RETIRADO, Y.; GÓNGORA, E.; TORRES, E. & ROJAS, A. 2007: Comportamiento de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico. *Minería & Geología* [en línea] 23 (3). Consultado: 20 dic 2010. Disponible en: www.ismm.edu.cu/revistamg
- RETIRADO, Y.; GÓNGORA, E.; TORRES, E. & HERNÁNDEZ, N. 2009: Comportamiento de la adherencia en menas lateríticas sometidas a secado solar natural. *Minería & Geología* [en línea] 25 (1). Consultado: 20 dic 2010. Disponible en: www.ismm.edu.cu/revistamg
- RETIRADO, Y.; GÓNGORA, E.; TORRES, E.; LAMORÚ, M.; LEYVA, B. & GARCÍA, D. 2011: Transferencia de calor en el secado solar a la intemperie de menas lateríticas ferroniquelíferas. *Minería & Geología* [en línea] 27 (1). Consultado: 25 may 2011. Disponible en: www.ismm.edu.cu/revistamg
- SALINAS, C.; ANANÍAS, R. & RUMINOT, P. 2008: Modelación de las curvas de secado por alta temperatura de Pino Radiata. *Maderas: Ciencia y tecnología* 10(3): 207-217.
- TIJONOV, A. & SAMARSKY, A. 1980: *Ecuaciones de la física matemática*. Editorial MIR, Moscú, 824 p.
- VINARDELL, J. 2011: *Implementación del secado solar natural de las menas lateríticas en las empresas niquelíferas cubanas*. Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 63 p.
- YOUNG, W.; CAO, W.; CHUNG, T. & MORRIS, J. 2008: *Applied numerical methods using MATLAB*. Editorial Félix Varela, La Habana, 2 t.

Yoalbys Retirado Mediacejayretirado@ismm.edu.cu

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

Aristides A. Legrá Lobainaalegra@ismm.edu.cu

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

Marbelis Lamorú Urgellesmlamoru@ismm.edu.cu

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

Enrique Torres Tamayoetorrest@ismm.edu.cu

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

Héctor L. Laurencio Alfonsohlaurencio@ismm.edu.cu

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

Ever Góngora Leyvaegongora@ismm.edu.cu

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