

SecSolar: aplicación informática basada en modelos matemáticos del proceso de secado natural de la mena laterítica

Yoalbys Retirado-Mediaceja^{1a*}, Arístides Alejandro Legrá-Lobaina^{1b}, Héctor Luis Laurencio-Alfonso², Amauris Gilbert-Hernández^{1c}, Carlos Zalazar-Oliva^{1a}, Liomnis Osorio-Laurencio^{1a}, Marbelis Lamorú Urgelles^{1c}

¹ Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM). Avenida Calixto García Iñiguez No. 15, entre Avenida 7 de Diciembre y Calle Reynaldo Laffita Rueda. Reparto Caribe, Moa, Holguín, Cuba. CP: 83 329.

² Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas. Universidad Técnica de Cotopaxi, (hector.laurencio@utc.edu.ec). Avenida Simón Rodríguez s/n. Barrio El Ejido. Sector San Felipe. Latacunga, Ecuador.

^a Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa (CEETAM).

^b Departamento de Matemática.

^c Departamento de Ingeniería Mecánica.

* Autor para la correspondencia: yretirado@ismm.edu.cu

Resumen

En la empresa niquelífera “Comandante Ernesto Che Guevara” de Moa se realiza el proceso de secado natural de la mena laterítica. Sin embargo, la tecnología empleada presenta limitaciones porque, entre otros aspectos, no considera la modelación matemática del mismo. Para solucionar la problemática anterior en este trabajo se desarrolló, usando el *software Borland Delphi Enterprise*, la aplicación informática “SecSolar”, la cual se basa en la implementación de modelos matemáticos del proceso. Finalmente, con la aplicación creada se calculó la distribución de humedad que experimenta el material, para una pila de minerales con características geométricas semejantes a las utilizadas en la industria del níquel. Los resultados obtenidos son congruentes con los reportados en investigaciones precedentes. Por tanto, se evidenció que la aplicación “SecSolar” es satisfactoria para los propósitos para los cuales fue concebida.

Palabras clave: *Borland Delphi Enterprise*, mena laterítica, modelos matemáticos, secado natural, SecSolar.

Abstract

The natural drying process of lateritic ore is performed in the nickel company "Commander Ernesto Che Guevara" of Moa. However, the technology used has limitations because, among other things, it does not consider its mathematical modeling. To solve the above problem, it was developed in this paper -using the Borland Delphi Enterprise software- the computer application "Sec Solar" which is based on the implementation of mathematical models of the process. Finally, the moisture distribution experienced by the material was calculated with the created application, for stockpiles of ore with similar geometric characteristics to those used in the nickel industry. The results are consistent with those reported in previous research. It is therefore evident that "Sec Solar" application is satisfactory for the purposes it was conceived.

Keywords: *Borland Delphi Enterprise, lateritic ore, mathematical models, natural drying, Sec Solar.*

Introducción

En Cuba la producción de níquel y cobalto, basada en la lixiviación carbonato-amoniaca, se desarrolla en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", ubicada en el municipio Moa. El proceso productivo comienza con la extracción a cielo abierto de la mena laterítica, la cual se somete a diversos procesos tecnológicos comenzando por el secado natural. Los estudios más interesantes dedicados a la implementación del secado natural de la mena laterítica fueron desarrollados en el Centro de Desarrollo de Investigaciones del Níquel (Estenoz, 2009; Espinosa y Pérez, 2010). En estas investigaciones se diseñó y aplicó una tecnología para la realización del secado solar, la cual prevé la formación, el control de las operaciones y la evacuación de las pilas de minerales almacenadas a la intemperie en los depósitos mineros de la entidad.

La referida tecnología tiene varias ventajas. Sin embargo, presenta como limitaciones que no considera la evaluación rigurosa de los mecanismos de transferencia de calor y masa que inciden en el secado natural, así como la aplicación de modelos matemáticos ajustados a las condiciones en que se desarrolla el proceso en la industria (Retirado, 2012). Además, no concibe el desarrollo de una aplicación informática útil para la evaluación energética del secado solar. Estos aspectos imposibilitan calcular con rapidez y precisión los parámetros fundamentales del proceso de secado natural.

Por su parte, en las investigaciones desarrolladas en el ISMMM se defiende la idea de que, a través de la modelación matemática del proceso, se puede contribuir al perfeccionamiento de la tecnología empleada para la implementación del secado natural de la mena laterítica (Retirado y Legrá, 2011; Retirado *et al.*, 2012a y b, 2014, 2015). Este criterio también lo sostienen los autores del presente trabajo, por cuanto se infiere de la práctica mundial que la descripción físico-matemática de los procesos de secado permite estudiarlos teóricamente y, luego de las correspondientes comprobaciones experimentales, posibilita realizar la simulación y optimización computacionales de sus parámetros fundamentales (Rafiee *et al.*, 2008; Ferreira y Costa, 2009; Bombino *et al.*, 2010; Legrá y Silva, 2011). Lo anterior se logra mediante el empleo de aplicaciones informáticas existentes o las diseñadas para tales propósitos.

La creación de una aplicación informática, para el secado natural de la mena laterítica, constituye un aspecto novedoso y una alternativa tecnológicamente viable para predecir el comportamiento de la humedad del material y otros parámetros fundamentales del proceso, cuando las variables independientes y los parámetros de los modelos matemáticos toman ciertos valores. Además, permite investigar el proceso para condiciones de operación no consideradas en la práctica productiva de la empresa, lo cual genera beneficios económicos y ambientales.

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una aplicación informática basada en la implementación de modelos matemáticos del proceso de secado natural de la mena laterítica.

Materiales y métodos

De acuerdo con Retirado (2012), se consideran parámetros fundamentales del proceso de secado natural de la mena laterítica los siguientes: área de exposición y volumen de las pilas de minerales, radiación solar incidente, flujos de calor transferidos, distribución de temperatura y de humedad que experimenta el material. Los mismos se calculan, simulan y optimizan con la aplicación informática “SecSolar”, la cual fue creada para estos propósitos y se basa en la programación de la solución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, a través del método de separación de variables. Los algoritmos empleados en cada pestaña de “SecSolar” son los que se exponen a continuación.

Algoritmos para el área, el volumen y la radiación solar

La geometría de la sección transversal que adquiere una pila de mena laterítica, al ser depositada a granel, depende de los ángulos de reposo maximal y tangencial. Esta, según Ricaurte y Legrá (2010), puede ser semi-elíptica, hiperbólica, parabólica y triangular, dependiendo de los valores de granulometría y humedad que tenga la mena laterítica al ser depositada a granel en el patio de secado natural.

Para obtener el área de exposición (A) y el volumen (V) de una pila, formada simétricamente, se tienen en cuenta sus áreas laterales y frontales (Retirado y Legrá, 2011). En la Figura 1 se muestra el algoritmo que posibilita la sistematización del procedimiento de cálculo utilizado y la implementación en la primera pestaña de la aplicación informática.

Los modelos matemáticos establecidos en el algoritmo que se propone en esta sección (Figura 1) tienen la finalidad de pronosticar, para el secado natural, la forma geométrica de las pilas de minerales y los valores de área y volumen de las mismas. En la práctica, los modelos propuestos permiten determinar los mencionados parámetros sin necesidad de formar previamente las pilas, para ello solo es necesario conocer las dimensiones (largo y ancho) de la superficie horizontal disponible para el secado solar, así como la granulometría y humedad del material. Lo anterior, posibilita el ahorro que corresponde al proceso de experimentación con pilas reales.

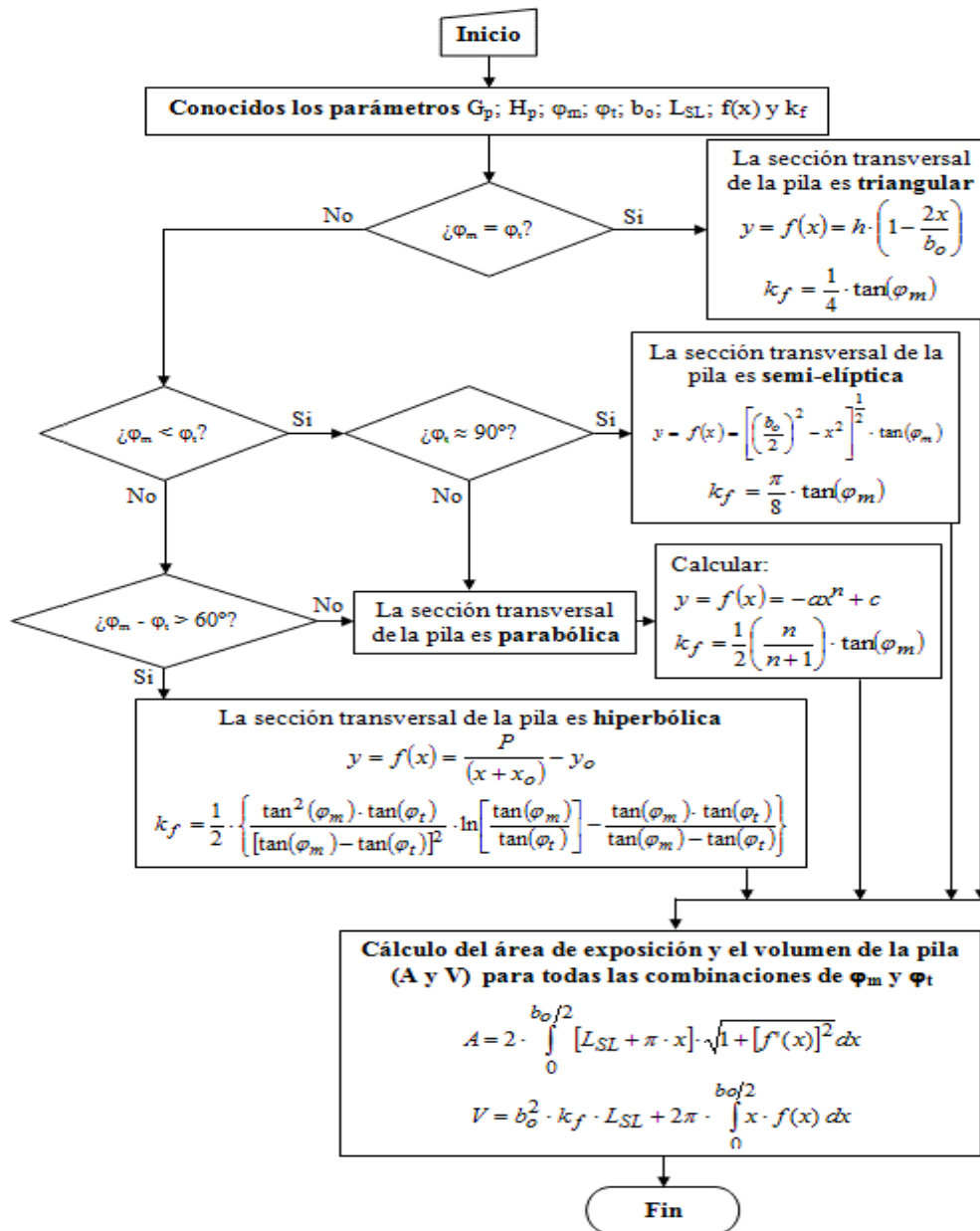


Figura 1. Algoritmo empleado por la aplicación informática para el cálculo del área y el volumen de la pila.

Siendo:

G_p : granulometría promedio del material; mm.

H_p : humedad promedio del material; %.

φ_m : ángulo de reposo maximal de la pila; grados sexagesimales.

φ_t : ángulo de reposo tangencial de la pila; grados

sexagesimales.

b_0 : ancho de la base de la pila; m.

L_{SL} : longitud de la superficie lateral de la pila; m.

$f(x)$: función que caracteriza la generatriz de la superficie lateral de la pila; m.

h : altura de la pila; m.

k_f : factor de forma; adimensional.

x_0 , y_0 y P : relaciones de razones trigonométricas entre φ_m

y φ_i ; adimensionales.

A : área de exposición de la pila; m².

V : volumen de la pila; m³.

El cálculo de la radiación solar global que incide sobre la superficie de secado de la pila $[I(\varphi, \psi)_{hr}]$ se desarrolla por el procedimiento propuesto por Montero (2005). El mismo fue programado en la segunda pestaña de la aplicación “SecSolar”, según el algoritmo que se muestra en la Figura 2.

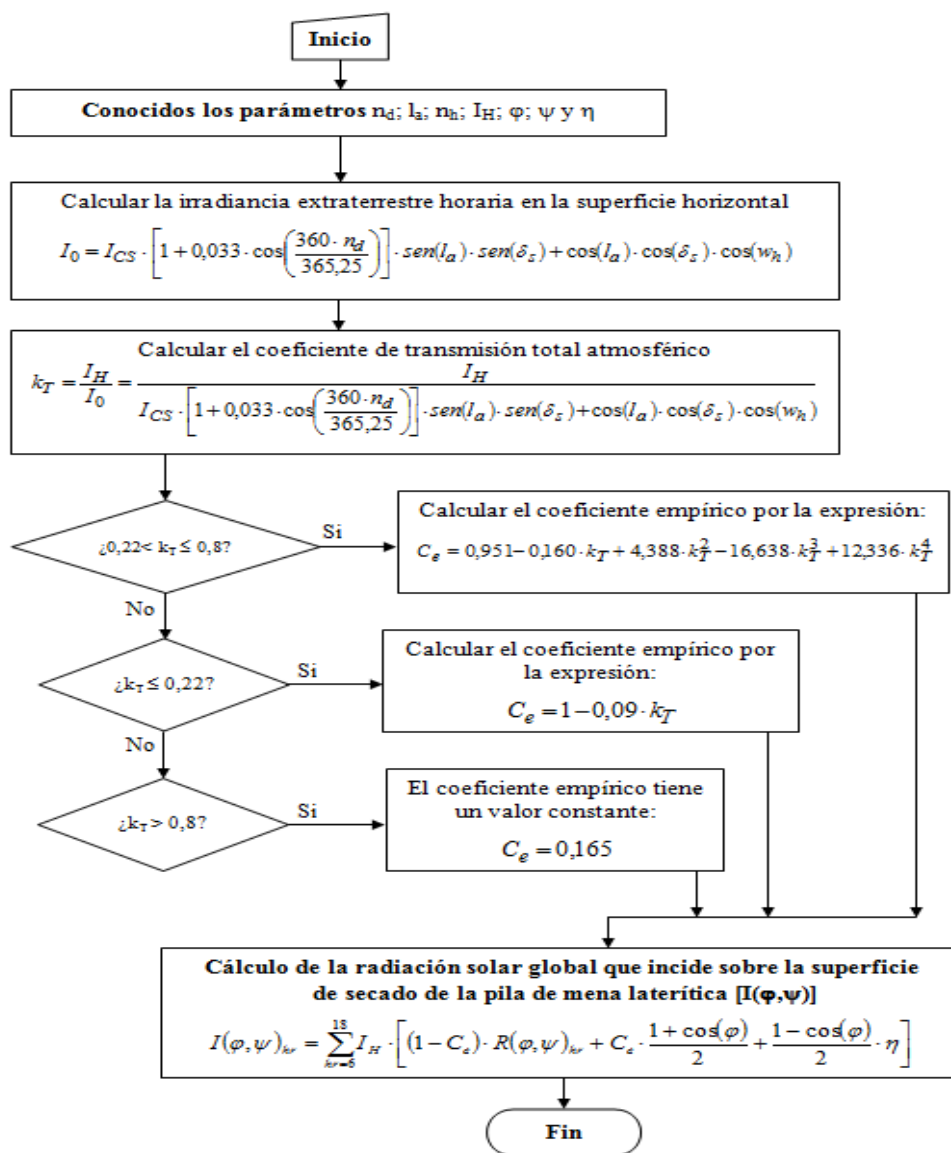


Figura 2. Algoritmo empleado por la aplicación informática para el cálculo de la radiación solar incidente.

Siendo:

n_d : número del día del año; adimensional.

l_a : latitud; grados sexagesimales.

n_h : número de horas antes o después del mediodía solar; adimensional.

I_H : radiación incidente sobre la superficie horizontal; W/m^2 .

φ : inclinación de la superficie de la pila respecto al plano horizontal; grados sexagesimales.

ψ : orientación de la superficie de la pila respecto al eje Norte-Sur; grados sexagesimales.

η : albedo, oscila entre 0,17 y 0,2; adimensional.

I_0 : irradiancia extraterrestre horaria en la superficie

horizontal; W/m^2 .

I_{CS} : constante solar; W/m^2

δ_s : declinación solar; grados sexagesimales.

w_h : ángulo horario; grados sexagesimales.

k_T : coeficiente de transmisión total atmosférico; adimensional.

C_e : coeficiente empírico; adimensional.

$I(\varphi, \psi)_{hr}$: radiación solar global que incide sobre la superficie de secado de la pila; W/m^2 .

h_r : horas en que la pila recibe radiación solar ($6 \leq h_r \leq 18$); adimensional.

$R(\varphi, \psi)_{hr}$: factor de conversión; adimensional.

Otros algoritmos programados

La transmisión de calor en el secado natural ocurre por convección, radiación y conducción. Sin embargo, el intercambio convectivo se produce aleatoriamente por convección libre, forzada y mixta (Retirado *et al.*, 2011). El calor total disponible para la implementación del proceso de secado natural se calcula dinámicamente como una función de los flujos de calor transferidos por radiación y convección.

El flujo de calor transferido por conducción, desde la superficie de secado hacia el interior de la pila, depende de múltiples variables entre la que se destaca el gradiente de temperatura (Bergman *et al.*, 2011). Los algoritmos empleados por la aplicación informática “SecSolar” (en la tercera, cuarta y quinta pestañas) para el cálculo de los flujos de calor transferidos, y la distribución de temperatura y de humedad se encuentran disponibles en el trabajo que precede a este artículo (Retirado *et al.*, 2016). No obstante, en esta sección se expone el algoritmo que corresponde a la distribución de humedad del material (Figura 3) por la importancia que reviste en el cálculo energético del proceso de secado natural y porque integra a los dos restantes.

Para la obtención del modelo físico-matemático de la distribución de humedad [$H(y, \tau)$], expuesto en el algoritmo de la Figura 3, se resolvieron las ecuaciones diferenciales de la conducción del calor y la humedad, mediante el método de separación de variables. A través del mismo se muestra explícitamente la dependencia entre las variables más influyentes en el proceso investigado.

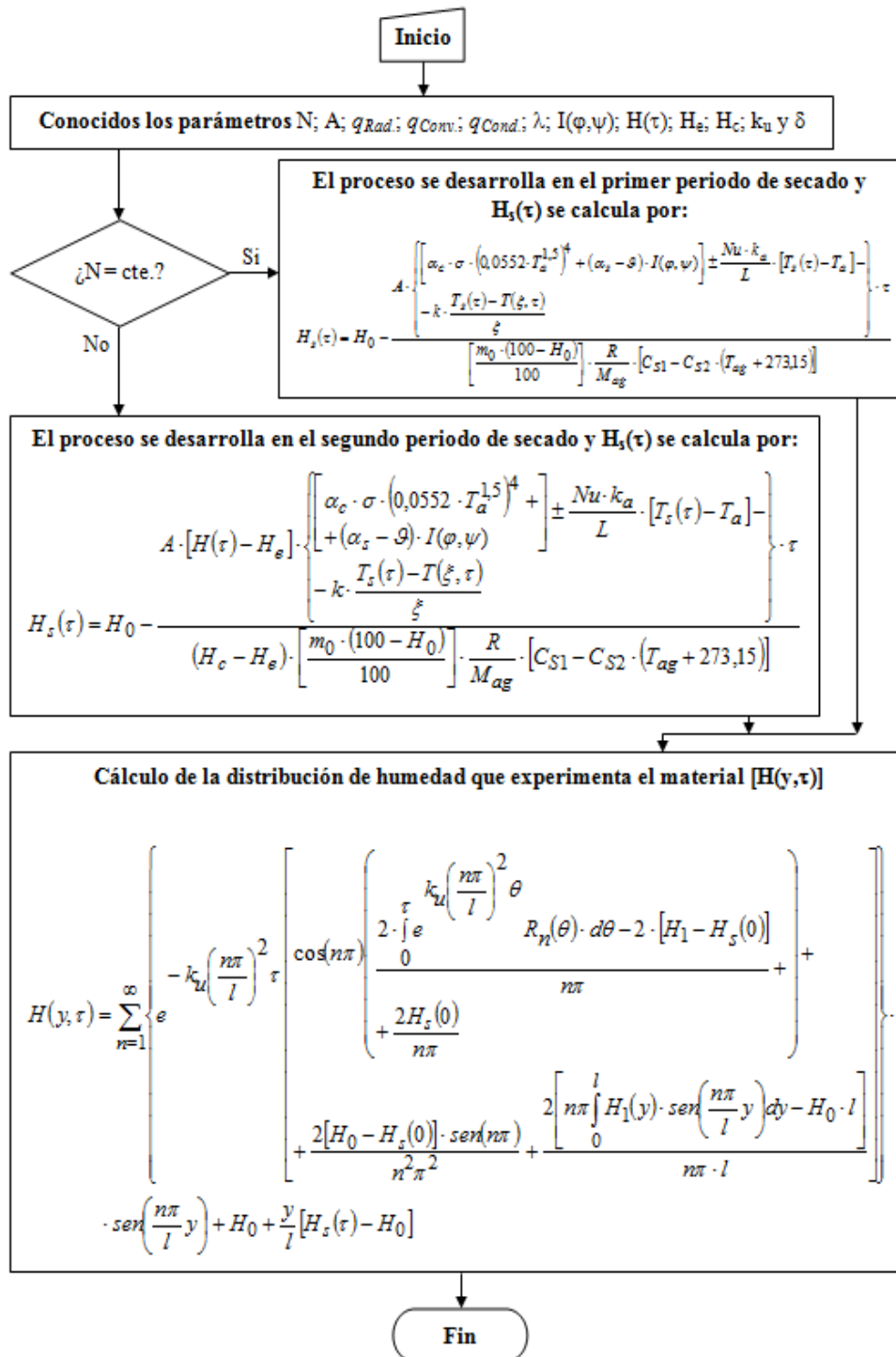


Figura 3. Algoritmo usado por la aplicación informática para el cálculo de la distribución de humedad (Retirado *et al.*, 2016).

Siendo:

N : régimen de secado; $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$.

q_{Rad} : flujo de calor por radiación que se aprovecha en el secado natural de la mena laterítica; W/m^2 .

q_{Conv} : flujo de calor por convección que intercambian el aire y la superficie de secado de la pila; W/m^2 .

q_{Cond} : calor transferido por conducción hacia el interior de la pila; W/m^2 .

λ : calor latente de vaporización del agua; J/kg .

$H(\tau)$: humedad del material en cada instante de tiempo τ ; kg/kg .

H_e y H_c : humedad de equilibrio del material y al finalizar el régimen de velocidad de secado constante; kg/kg .

k_u : coeficiente de conducción de humedad; m^2/s .

δ : coeficiente térmico de conducción de humedad; $1/^\circ\text{C}$.

$H_s(\tau)$: humedad del material en la superficie de secado de la pila (para $y=l$) en el instante τ ; kg/kg .

α_c : absorptividad del cielo; adimensional.

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

T_a : temperatura del aire; K .

α_s y ρ : absorptividad solar y reflectividad de la mena laterítica; adimensionales.

Nu : número de Nusselt; adimensional.

k_a y k : conductividad térmica del aire y de la mena laterítica; $\text{W/m} \cdot \text{K}$.

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

$T_s(\tau)$ y $T(\xi, \tau)$: temperatura en la superficie de la pila en el instante τ y en el interior de la pila en el espesor ξ ; K .

ξ : espesor de la capa de material donde se produce la conducción del calor; m .

m_0 : masa inicial de material sin secar; kg .

H_0 : humedad inicial del material; kg/kg .

R : constante de los gases; $\text{J/kmol} \cdot \text{K}$.

M_{ag} : peso molecular del agua; kg/kmol .

C_{S1} y C_{S2} : constantes experimentales; adimensionales.

T_{ag} : temperatura del agua; $^\circ\text{C}$.

$H(y, \tau)$: distribución de humedad del material en cada instante de tiempo τ ; kg/kg .

Estructura de los datos

Para la implementación de la aplicación informática creada, la cual está basada en los modelos matemáticos del secado natural de la mena laterítica, se requiere de un grupo de datos, cuya estructura se exponen en las Tablas 1 y 2. En la primera, se relacionan los valores promedios de la granulometría y la humedad del material (G_p y H_p), los ángulos tangencial y maximal de la pila (φ_t y φ_m), el ancho de la base y la longitud total de la pila (b_0 y L_t), y la velocidad promedio del agente secador, el aire (V_a). Estos datos se introducen directamente en las diferentes pestañas de la aplicación.

Tabla 1. Estructura de los datos empleados en la aplicación informática desarrollada

G_p (mm)	H_p (%)	ϕ (grados sexagesimales)	ϕ_m (grados sexagesimales)	b_0 (m)	L_t (m)	V_a (m/s)
15,72	36	60	60	5,49	140	5,28

Para la radiación solar incidente sobre la superficie horizontal (I_H) y la temperatura del aire (T_a) se crean dos ficheros con extensión “.txt” que son leídos por la aplicación informática una vez que se ejecuta. El monitoreo de estas y las restantes variables climatológicas que inciden en el proceso de secado solar natural se realizó con el equipo *Davis EZ-Mount Groweather*, que pertenece a la estación meteorológica de la empresa niquelífera “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Tabla 2. Estructura de los datos de la radiación incidente sobre la superficie horizontal y la temperatura del aire.

Hora → Día ↓	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
	I_H (W/m ²)												
277	37,1	37,4	82,2	208,8	342,9	458,9	545,7	602,7	583,6	515,0	412,6	208,4	112,20
	T_a (°C)												
277	24,7	24,8	24,9	25,8	26,7	27,4	28,0	28,5	28,9	29,1	29,1	28,6	27,9

Resultados y discusión

Los procedimientos establecidos en el epígrafe “materiales y métodos” fueron implementados en la aplicación informática “SecSolar”, la cual fue diseñada y desarrollada por un grupo multidisciplinario de investigadores del CEETAM, y los Departamentos de Matemática e Ingeniería Mecánica del ISMMM. La misma fue programada en el *software Borland Delphi Enterprise 7.0* y 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.

En Cuba, la literatura científica recoge aplicaciones informáticas similares, creadas con éxito, para la automatización del cálculo de varios procesos que tienen lugar en la industria del níquel, entre ellos se encuentran: la planificación y control integral de la minería (Legrá, 2010); el diseño energéticamente óptimo de transportadores de banda (Sierra, 2010); el secado convencional (Delgado, 2013) y el enfriamiento del mineral laterítico (Góngora, 2014). Sin embargo, a nivel internacional no se encontraron evidencias de aplicaciones semejantes a la desarrollada en la presente investigación.

La aplicación “SecSolar” permite calcular, simular y optimizar los parámetros fundamentales del secado natural de la mena laterítica, para las condiciones de explotación de la empresa niquelífera. La misma consta de cinco pestañas, ellas son: áreas y volúmenes de pilas; diseño de pilas según radiación solar recibida; cálculo del calor total; dinámica del calor y dinámica del secado. Las operaciones que se pueden realizar en las pestañas fundamentales y sus respectivas imágenes se exponen a continuación (ver Figuras 4; 5 y 6).

Descripción de las pestañas fundamentales de la aplicación informática

Áreas y volúmenes de pilas: en esta se programaron las ecuaciones empíricas reportadas por Retirado *et al.* (2014) que permiten calcular los ángulos maximal y tangencial del material, los modelos que posibilitan calcular las áreas y los volúmenes de las pilas de mena laterítica que tienen diferentes geometrías de su sección transversal (Figura 1). Para ello, solo es necesario conocer los valores promedios de la granulometría y humedad del material, así como las dimensiones (largo y ancho) de la superficie horizontal disponible para el secado natural (Figura 4). Estos datos son conocidos por el personal que implementa el proceso en la empresa niquelífera.

Como se aprecia en la Figura 4, la pestaña permite calcular el valor puntual de la altura de la pila (4,75 m), el área de la sección transversal (13,05 m²), la longitud de la superficie lateral (134,51 m), el área de la superficie (1 524,26 m²) y el volumen de la pila (1 793,01 m³). Nótese que se caracteriza la forma geométrica de la sección transversal de la pila (es triangular para el caso de estudio) y se realiza el gráfico lateral. Además, con la opción “Llenar Tablas”, se calculan todos los valores del área de exposición y el volumen de la pila cuando los ángulos maximal y tangencial varían entre 5 y 85 grados sexagesimales. Luego, ejecutando la opción GT (Guardar Tablas) estos se almacenan en disco.

Áreas y Volúmenes de Pilas

Ángulos de Reposo

Granulometría: 15.72 Humedad: 36

Ángulo Tangencial: 60 Ángulo Maximal: 60

Tipo de Área de Sección y su Valor

Valor de bo: 5.49 Valor de Lt: 140

Valor de h: 4.75447946677657 Valor de Área de Sección: 13.0510461363017

Valor de Lsl: 134.51 Tipo de Área: Triangular

Área de Superficie y Volumen de la Pila Ver el gráfico lateral de la pila

Área de la Superficie: 1524.2638 Volumen de la pila: 1793.0122

Llenar Tablas Ángulo T entre 5 y 85 Ángulo M entre 5 y 85 **GT**

Áreas T\M	5	10	15	20	25	30
5	765.0431	777.2795	797.62745	817.12043	833.57917	847.2
10	766.08375	773.88899	791.80386	820.92121	854.38861	887.7
15	767.52848	775.53298	789.01698	813.35967	849.83406	893.6
20	769.0701	778.21668	791.11847	811.04381	842.86847	887.7
25	770.69035	781.25706	794.90168	813.56168	840.91949	881.6
30	772.39957	784.55035	799.42509	818.39565	843.8651	880.0
35	774.21761	788.09576	804.47923	824.45805	849.78361	883.4

Vol. T\M	5	10	15	20	25	30
5	90.567921	120.81052	136.13703	145.51552	151.92772	156.6
10	121.38641	182.533	219.88014	245.39226	264.17418	278.7
15	137.13249	220.51649	277.37995	319.20595	351.70487	378.0
20	146.81709	246.59972	319.88492	376.78056	422.8719	461.5
25	153.46259	265.87995	353.04326	423.60074	482.71986	533.6
30	158.371	280.91835	380.00977	462.98022	534.49094	597.6
35	162.19659	293.14602	402.69116	497.04929	580.37928	655.6

Casos Máximos

100%

Finalizar

Figura 4. Primera pestaña de la aplicación informática SecSolar (Áreas y volúmenes de pilas).

Diseño de pilas según radiación solar recibida: en la misma se programó el modelo de la radiación solar global que incide sobre la superficie de la pila y se realiza el cálculo cuando el ángulo de inclinación de la superficie de secado oscila entre -90 y 90 grados sexagesimales, y el tiempo de secado varía entre las 6 y 18 h (Figura 2). Luego, mediante el uso de técnicas de discretización, se calcula la radiación total y la densidad de radiación solar que llega a la superficie, para ello se modelan los efectos de sombra que se producen debido a la combinación del movimiento del Sol con la inclinación de la superficie de la pila. Los valores obtenidos constituyen la base para la optimización de la forma geométrica de la sección transversal de la pila, atendiendo a estos dos criterios energéticos (Figura 5).

The screenshot shows the 'Diseño de Pilas según Radiación Solar Recibida' window. It contains several sections for data entry and calculation:

- Cálculos Básicos de la Radiación Solar (I):** Año 2011, Mes 10, Día 4, Día del Año 277, $I_s = 1369.37545760593$, $d_s = 5.40066796690786$, Hora 6, $Wh = -90$.
- Cálculos Básicos de la Radiación Solar (II):** Latitud 21, $h_s = -1.9329282139$, $h_c = 63.5993320330$, $W_s = 5.52$, $T_d = 11.43$, $AngInc = 91.9329282139$, $l_o = -46.188435313$.
- Radiación Solar sobre una Superficie Inclinada:** $I_{medido} = 37$, $K_t = -0.8010663220$, $K_b = 0.05775365271$, $K_d = -0.8588199748$, $I_b = -2.6675500525$, $I_d = 39.6675500525$, $F_i = 5$, $G = 0$, $R = 0.17$, $R_m = 0.76914622573$, **IG = 37.5523**.
- Tabla de Cálculo variando Wh (Columnas) y Fi (Filas):**

Hora \ Fi	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60	75	90
6	0	0	0	0	0	0	37	38.3208	38.5961	37.8071	36.0076	33.3202	29.928
7	0	0	0	0	0	36.9638	37.4	36.9638	35.4844	33.0628	29.8638	26.1055	22.044
8	0	0	0	0	77.879	81.1848	82.2	81.1848	77.879	72.5077	65.4372	57.1491	48.2084
9	0	0	0	184.666	198.262	206.494	208.8	206.494	198.262	184.666	166.632	145.389	122.385
10	0	0	276.497	306.497	328.454	340.87	342.9	340.87	328.454	306.497	276.497	240.497	200.951
- Cálculo de radiación sobre la superficie de una pila de mineral laterítico:** Ancho de un Corte en cm 10, Número de pasos desde -bo/2 hasta bo/2 50. Results: Radiación Total en un corte 150792.77, Radiación Total en la Superficie 203419439.985, Radiación por unidad de área 133454.222284.
- Optimización de la superficie de una pila:** Ángulo T entre 20 y 50, Ángulo M entre 20 y 50, Paso Ángulos T y M 5. Options: Solo si Volumen es mayor o igual que el Volumen Mínimo (Volumen Mínimo 0), Solo tipos Parabólicos Positivos y Triangulares, Optimizar según Densidad de Radiación. Button: **Optimizar la Superficie según Radiación Solar**.

Figura 5. Segunda pestaña de la aplicación informática SecSolar (Diseño de pilas según radiación solar recibida).

Dinámica del secado: en esta pestaña se programó el modelo de la distribución de humedad y las ecuaciones de enlace reportadas por Retirado *et al.* (2015) para la determinación de la velocidad de secado y la humedad del material en la superficie de la pila en cualquier instante de tiempo en los periodos de velocidad de secado constante y decreciente (Figura 3). Lo anterior, permitió determinar la distribución de humedad que experimenta el material durante el secado natural (Figura 6). Además, la aplicación “SecSolar” permite calcular el volumen de material que reduce su contenido de humedad en un valor predeterminado para la simulación (2 % para el caso de estudio) y optimizar el proceso de secado solar.

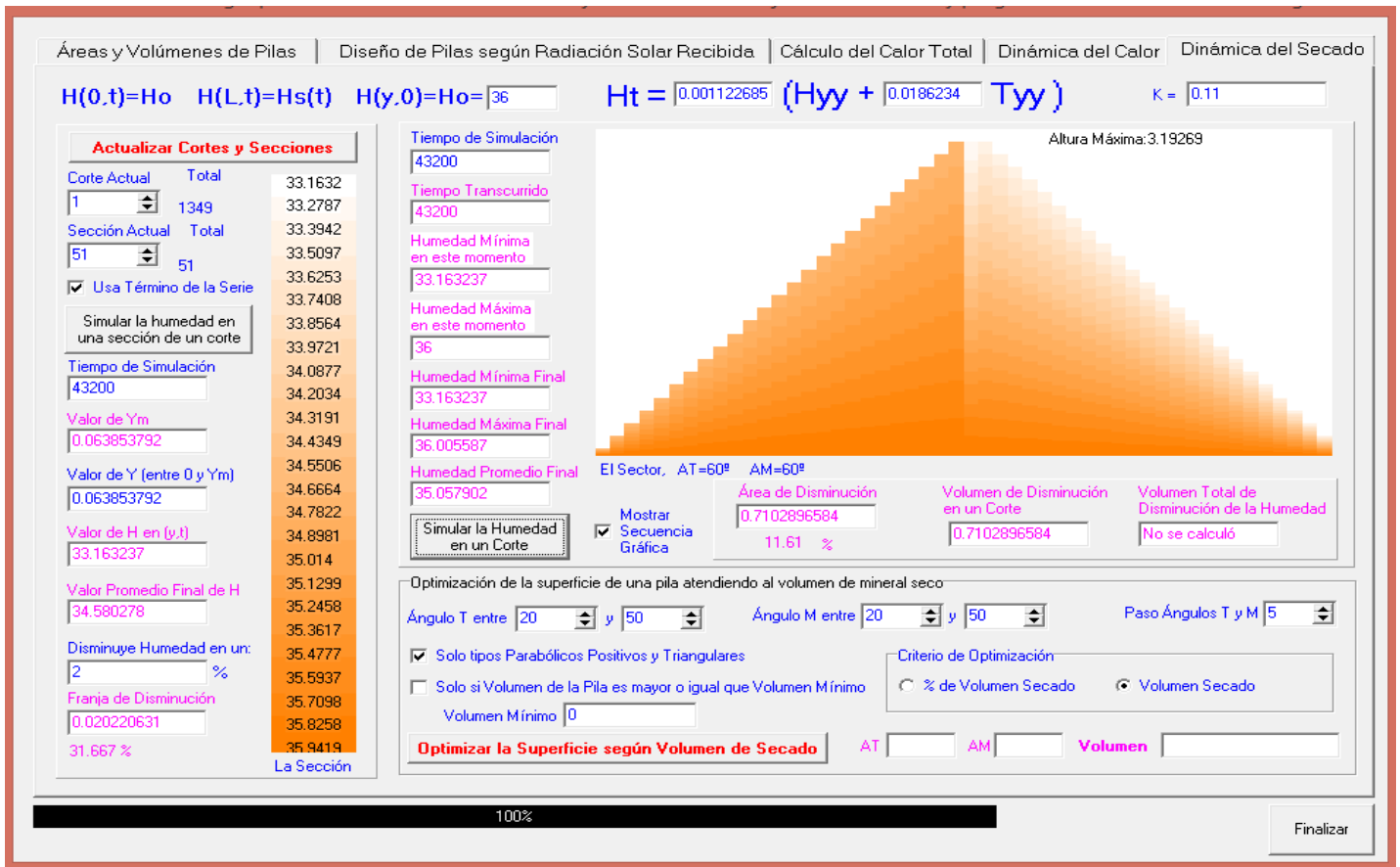


Figura 6. Quinta pestaña de la aplicación informática SecSolar (Dinámica del secado).

Implementación de la aplicación informática

Desde el año 2012 la aplicación “SecSolar” se encuentra disponible, pero mayormente ha sido usada con fines docentes e investigativos (en el ISMMM) y en menor medida en las empresas niquelíferas, por motivos inherentes a estas. Al implementarla para calcular los parámetros del secado en una pila (con los datos de las Tablas 1 y 2) se observan pequeños decrecimientos en la humedad del material. Estos no exceden el 2 y 3 % en los taludes Este y Oeste de la pila (Figuras 9 y 10), lo que se corresponde con los bajos niveles de energía solar y eólica utilizables para el secado natural.

En el talud Este de la pila (Figura 7), se obtienen reducciones en la humedad del material a partir de las 7:30 y hasta las 14:30 horas. En el horario restante la humedad permanece prácticamente invariable. El comportamiento entre las 6 y 7:30 horas se debe a los bajos niveles de radiación solar existentes y en la tarde (14:30-18:00 horas) puede ser atribuido al efecto de sombra que se genera, debido a la inclinación de la superficie de secado de la pila y el movimiento del Sol.

En el talud Oeste de la pila (Figura 8), para las capas de mineral ubicadas entre 0 y 3,262 m de altura se obtienen reducciones de la humedad de aproximadamente el 2 %, mientras que en las capas más cercanas a la superficie de la pila

(desde $h = 3,729$ m hasta $h = 4,568$ m) los niveles de reducción de la humedad oscilan entre 2,25 y 2,75 %. En los taludes Este y Oeste se redujo la humedad en 0,410 y 0,490 %; y en la pila completa la reducción fue de 0,450 %, en 12 horas de secado. Este comportamiento sugiere que para reducir en 10 % la humedad promedio, la pila debe someterse al secado natural alrededor de 22 días, si las condiciones ambientales se mantienen similares a las utilizadas en la simulación. Estos resultados son congruentes con los obtenidos experimentalmente por Espinosa y Pérez (2010) y Vinardell (2011).

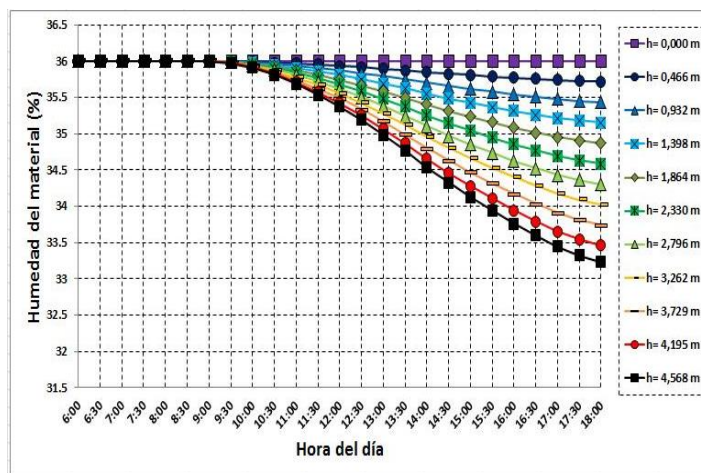
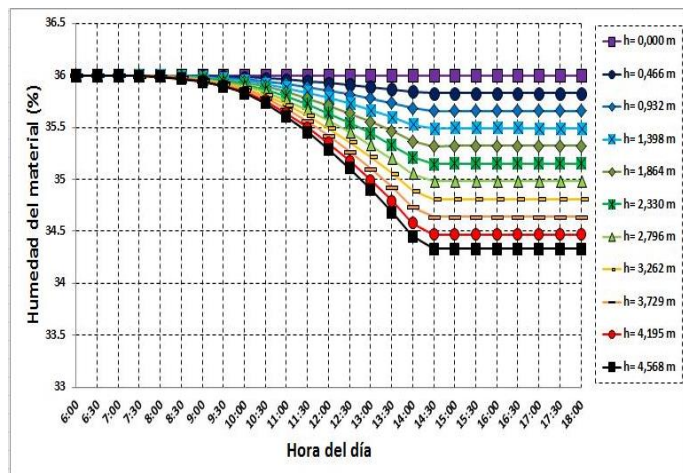


Figura 7. Distribución de humedad en el talud Este de la pila.

Figura 8. Distribución de humedad en el talud Oeste de la pila.

Conclusiones

Se desarrolló la aplicación informática “SecSolar”, mediante la implementación de algoritmos basados en modelos matemáticos del secado natural de la mena laterítica. La misma considera la geometría de la sección transversal de las pilas y la evaluación rigurosa de la transferencia de calor y masa que se produce durante el secado solar del material. Además, garantiza rapidez y precisión en el cálculo de los parámetros fundamentales del proceso, lo cual contribuye al perfeccionamiento de la tecnología de secado natural empleada en la industria del níquel.

La aplicación “SecSolar” es útil para los propósitos definidos en su concepción, diseño y desarrollo, porque posibilita la simulación y optimización energética del secado natural de la mena laterítica. No obstante, puede ser perfeccionada mediante la introducción de algoritmos que consideren la asimetría geométrica y la orientación arbitraria de las pilas; así como la programación cíclica del proceso y el cálculo de otras tecnologías empleadas en el secado solar.

Referencias

- BERGMAN, T.; A. LAVINE; F. INCROPERA & D. DEWIT. Fundamentals of heat and mass transfer. New Jersey, John Wiley & Sons, 2011. 1077 p.
- BOMBINO, E.; G. ROCA & R. LESME. Principales elementos teórico-prácticos para el estudio del secado neumático vorticial de bagazo de caña. *Tecnología Química*, 2010, 30(2): p. 74-81.
- DELGADO, Y. Método de balance térmico y de masa para la evaluación del proceso de secado en cilindros rotatorios horizontales. Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa, 2013.
- ESPINOSA, M. & N. PÉREZ. Resultados obtenidos en pruebas de secado solar realizadas por el Centro de Desarrollo de Investigaciones del Níquel a la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Reporte de investigación, Moa, 2010. 20 p.
- ESTENOZ, S. 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: 2009, 16 p.
- FERREIRA, S. & A. COSTA. Parámetros de transferencia de materia en el secado de frutas. *Información Tecnológica*, 2009, 20(2): p. 89-104.
- GÓNGORA, E. Modelación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico en cilindros horizontales rotatorios. Tesis Doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa, 2014.
- LEGRÁ, A. Automatización del control del cálculo de extracciones en la mina de la empresa niquelera Ernesto Che Guevara [en línea]. *Minería y Geología*, 2010, 26(2), [Consultado el: 20 de enero de 2016] 55-73 p. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/index>
- LEGRÁ, A. & O. SILVA. La investigación científica: Conceptos y Reflexiones. La Habana, Editorial Félix Varela, 2011. 445 p.
- MONTERO, I. Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos. Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura, Badajoz, 2005.
- RAFIEE, S.; A. KEYHANI & A. MOHAMMADI. Soybean seeds mass transfer simulation during drying using Finite Element Method. *World Applied Sciences*, 2008, 4(2): p. 284-288.
- RETIRADO, Y.; A. LEGRÁ; A. GILBERT; E. SALAZAR; J. SALAZAR & M. MENDOZA. Influencia de la inclinación de las pilas en el secado natural de la mena laterítica. [en línea]. *Minería y Geología*, 2016, 32(3), [Consultado el: 23 de enero de 2017] 113-127 p. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/index>
- RETIRADO, Y.; A. LEGRÁ; M. LAMORÚ; E. TORRES; H. LAURENCIO & E. GÓNGORA. Distribución de

temperatura en pilas de mena laterítica expuestas a secado natural [en línea]. *Minería y Geología*, 2014, 30(1), [Consultado el: 14 de enero de 2016] 33-50 p. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/index>

RETIRADO, Y.; A. LEGRÁ; M. LAMORÚ; E. TORRES; H. LAURENCIO & E. GÓNGORA. Modelación y simulación del proceso de secado natural de la mena laterítica [en línea]. *Minería y Geología* 2012b, 28(4), [Consultado el: 21 de enero de 2016] 1-19 p. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/304/pdf>.

RETIRADO, Y.; A. LEGRÁ; M. LAMORÚ; E. TORRES; H. LAURENCIO & E. GÓNGORA. Velocidad de secado en pilas de mena laterítica almacenadas a la intemperie [en línea]. *Minería y Geología* 2015, 31(3), [Consultado el: 22 de enero de 2016] 45-61 p. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/1095/590>.

RETIRADO, Y.; A. LEGRÁ; M. LAMORÚ & E. TORRES. Optimización del secado solar de la mena laterítica en la industria cubana del níquel [en línea]. *Minería y Geología*, 2012a, 28(2), [Consultado el: 7 de enero de 2016] 30-46 p. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/307/344>.

RETIRADO, Y. & A. LEGRÁ. Modelación matemática del área de exposición y del volumen de las pilas de menas lateríticas expuestas a secado solar natural [en línea]. *Minería y Geología*, 2011, 27(2), [Consultado el: 21 de enero de 2016] 84-108 p. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/266/pdf>.

RETIRADO, Y.; E. GÓNGORA; E. TORRES & M. LAMORÚ. Transferencia de calor en el secado solar a la intemperie de menas lateríticas ferroniquelíferas [en línea]. *Minería y Geología*, 2011, 27(1), [Consultado el: 14 de enero de 2016] 1-21 p. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/136/139>.

RETIRADO, Y. Modelación matemática del proceso de secado natural de las menas lateríticas. Tesis Doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa, 2012.

RICAURTE, C. & A. LEGRÁ. Contribución al cálculo del área de la sección de la carga en la banda transportadora de mineral laterítico [en línea]. *Minería y Geología*, 2010, 26(3), [Consultado el: 13 de marzo de 2011] 1-22 p. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/51/57>.

SIERRA, R. Optimización energética en el diseño de los transportadores de bandas utilizados en la industria del níquel. Tesis Doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa, 2010.

VINARDELL, J. Implementación del secado solar natural de las menas lateríticas en las empresas niquelíferas cubanas. Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa, 2011.