

# Transferencia de calor en el secado solar a la intemperie de menas lateríticas ferroniquelíferas

Yoalbys Retirado Mediaceja  
Marbelis Lamorú Urgelles  
Ever Góngora Leyva  
Enrique Torres Tamayo  
Benigno Leyva de la Cruz  
Daynelis Garcia Batista

## Resumen

En Moa, las menas lateríticas son sometidas a secado solar a la intemperie para reducirles el contenido de humedad antes de incorporarlas al proceso de secado térmico convencional. Este artículo evalúa los procesos de transferencia de calor fundamentales que tienen lugar durante el secado natural con el propósito de determinar el modo predominante de transferencia de calor. En dos pilas de menas lateríticas expuestas a secado solar natural se midieron las variables climatológicas y termodinámicas que influyen en la transferencia de calor por convección y radiación durante el secado y se calcularon, además, los criterios adimensionales para determinar el tipo predominante de convección. Se comprobó que durante el secado solar a la intemperie predomina la convección y que en las condiciones de experimentación analizadas la radiación tuvo una incidencia secundaria. Los resultados evidenciaron que el calor se transfiere por convección libre, forzada y mixta, predominando la forzada, para la cual los coeficientes de transferencia de calor mínimos y máximos mostraron pequeñas variaciones entre ambas pilas. Los flujos de calor por convección promedios fueron 978,74 y 1 156,58  $W/m^2$ , mientras que los flujos por radiación ascendieron a 324,71 y 355,36  $W/m^2$  para las pilas #1 y #2, respectivamente.

## Palabras clave

Transferencia de calor; secado solar a la intemperie; menas lateríticas.

## Heat transfer in the solar drying of lateritic ores exposed to the environment

### Abstract

In Moa, laterite ore is sun-dried to reduce humidity before being subjected to conventional thermal drying. This article presents an evaluation of main heat transfer processes which take place during natural drying treatment in order to determine the predominant mode of heat transfer. To measure climatic and thermodynamic variables which influence on convection and radiation heat transfer during drying, two stockpiles of laterite ore exposed to natural solar drying were taken. Non dimensional calculations were carried out in order to determine the predominant form of convection. It was proven that convection was the predominant type during the solar drying process and that the effect of radiation under experimental conditions was characterized as secondary. The results showed that heat transfer occur by free, forced and mixed convection. Forced convection was predominant. There was little variation in minimum and maximum heat transfer coefficients for the two stockpiles. Average values of convective heat transfer were 978,74 and 1 156,58  $W/m^2$  while average radiation heat transfer coefficients were 324,71 and 355,36  $W/m^2$  for stock piles #1 and #2; respectively.

### Key words

Heat transfer; solar drying; laterites ores.

### **INTRODUCCIÓN**

El proceso de secado permite eliminar el agua que contienen los materiales, a través de un proceso simultáneo de transferencia de calor y masa o por métodos mecánicos (sedimentación, centrifugación y filtración); sin embargo, la deshidratación más completa se alcanza mediante el secado térmico (Knoule 1982; Kasatkin 1987; Rudenko & Shemajanov 1989; Boizán 1991; Montero 2005).

El uso de la energía solar térmica para la eliminación de la humedad es un método tradicional empleado a nivel mundial (Chen *et al.* 2005; Hernández & Quinto 2005; Bennamoun & Belhamri 2006; Beltagy *et al.* 2007; Ferreira & Costa 2009). Varias fuentes bibliográficas reportan estudios relacionados con la transferencia de calor de diversos materiales durante el secado solar (Plumb *et al.* 1985; Thorpe & Whitaker 1992; Singh & Thorpe 1993; Tiris *et al.* 1995; Anwar & Tiwari 2001; Türk 2003; Gigler *et al.* 2004; Jain & Tiwari 2004; Tiwari *et al.* 2004; Touré & Kibangu-Hkembo 2004; Tiwari & Sarkar 2006; Abdel-Rehim & Nagib 2007; Montes *et al.* 2008); sin embargo, no abundan trabajos que aborden la transferencia de calor en menas lateríticas.

En Cuba el secado solar de minerales lateríticos se ha implementado como alternativa para racionalizar el proceso tecnológico de obtención de níquel (Estenoz 2001; Estenoz *et al.* 2005; 2007a; Retirado 2007; Estenoz 2009), basado en la experiencia práctica y en algunos estudios empíricos, sin considerar la evaluación de los procesos de transferencia de calor que inciden en el proceso de secado.

Estudios empírico-teóricos realizados con menas lateríticas en los yacimientos de Moa evidencian que con el secado solar natural solo es posible evaporar la humedad ligada mecánicamente al material, debido a los bajos regímenes de temperatura que se generan en el proceso de secado a la intemperie. Esos estudios evidencian que la humedad del material varía en función de parámetros climatológicos (radiación solar, precipitaciones y temperatura, velocidad y humedad relativa del aire), la granulometría y la masa de material sometida a secado (Retirado *et al.* 2007). Otros resultados teórico-

experimentales han permitido establecer los modelos estadísticos que relacionan la humedad con las variables anteriormente expuestas, así como la relación existente entre la adherencia de las menas, el contenido de humedad, la granulometría y el ángulo de inclinación de la superficie de contacto (Retirado *et al.* 2008, 2009).

Las investigaciones relacionadas con el secado solar de menas lateríticas han tomado dos direcciones, una hacia los criterios tecnológicos y mineralógicos que influyen en la eficiencia y homogenización durante el secado (Estenez *et al.* 2007b, 2008) y otra enfocada al estudio experimental de la desorción de la humedad en correspondencia con las diferentes variables climatológicas que intervienen en el secado solar (Retirado 2007; Retirado *et al.* 2007, 2008; Retirado 2010). Se precisa entonces evaluar los procesos de transferencia de calor que provocan la evaporación de la humedad y, consecuentemente, el secado de las menas para así identificar el modo predominante de transmisión de calor, lo cual constituye el objetivo del presente estudio.

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

Para evaluar la transferencia de calor se tomaron los valores de humedad ( $H$ ), temperatura del aire ( $T_a$ ), velocidad del aire ( $V_a$ ) y radiación solar ( $G_{solar}$ ) obtenidos en investigaciones previas realizadas en dos pilas, una de 100 y otra de 50 kg, expuestas a secado solar a la intemperie, donde la medición de la humedad de las menas se realizó por el método tradicional de diferencias de pesadas. Las menas fueron sometidas a secado solar hasta reducir el contenido de humedad en un 13 %. Los parámetros climatológicos se midieron con un equipo Davis EZ-Mount Groweather con sensores para la medición de las variables meteorológicas de interés para el estudio (Retirado *et al.* 2007).

Se calcularon solamente los flujos de calor por convección y radiación, ya que para las condiciones del estudio la conducción del calor desde la superficie de secado hacia el interior de la pila mineral se consideró despreciable, atendiendo a los bajos regímenes de radiación solar y a las características termofísicas del material, mal conductor del calor.

### Procedimiento de cálculo

#### Convección

El flujo de calor por convección se determinó empleando la Ley de Newton-Richman mediante la ecuación (1), reportada por Kaviani (1994):

$$q_{conv} = h \cdot (T_a - T_s) \quad (1)$$

Donde:

$q_{conv}$ : flujo de calor por convección que recibe la pila de menas lateríticas;  $W/m^2$ .

$h$ : coeficiente de transferencia de calor por convección del aire;  $W/m^2 \cdot K$ .

$T_a$ : temperatura del aire;  $K$ .

$T_s$ : temperatura de la superficie de secado;  $K$ .

Debido a que el secado solar de las menas lateríticas tiene lugar a la intemperie, el material recibe calor, del aire atmosférico, por convección libre, forzada y mixta. Para definir el modo de transmisión de calor predominante se verificó el cumplimiento de las condiciones representadas en las ecuaciones 2, 3 y 4, estableciendo la convección libre para la primera condición, forzada para la segunda y mixta para la tercera (Incropera & De Witt 1999, 2003).

$$\frac{Gr}{Re^2} \gg 1 \quad (2)$$

$$\frac{Gr_L}{Re^2} \ll 1 \quad (3)$$

$$\frac{Gr}{Re^2} \approx 1 \quad (4)$$

Siendo:

$$Gr = \frac{g \cdot \text{sen}(\theta) \cdot \beta_a \cdot (T_a - T_s) \cdot L^3}{\nu_a^2} \quad (5)$$

$$\text{Re} = \frac{V_a \cdot L}{\nu_a} \quad (1)$$

Donde:

$Gr$ : número de Grashof; *adimensional*.

$Re$ : número de Reynolds; *adimensional*.

$g$ : aceleración de la gravedad;  $m/s^2$ .

$\theta$ : ángulo de talud natural de las menas lateríticas; *grados*.

$\beta_a$ : dilatación térmica del aire;  $K^{-1}$ .

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

$\nu_a$ : viscosidad cinemática del aire;  $m^2/s$ .

$V_a$ : velocidad del aire;  $m/s$ .

Las características climatológicas de la región de Moa provocaron el predominio de la convección forzada durante el proceso de secado solar debido al incremento de la velocidad del aire; en estas condiciones el número de Nusselt ( $Nu_F$ ) se calculó en función de los números de Reynolds y Prandtl, mediante la ecuación 9, recomendada por Incropera & De Witt (2003).

$$h = \frac{Nu_F \cdot k_a}{L} = \frac{(M \cdot \text{Re}^B \cdot \text{Pr}^{1/3}) \cdot k_a}{L} \quad (9)$$

Donde:

$Nu_F$ : número de Nusselt para la convección forzada; *adimensional*.

$M$  y  $B$ : constantes experimentales; *adimensionales*.

Para la convección mixta el coeficiente de transferencia de calor se determinó por la ecuación 10 (Incropera & De Witt 1999).

$$h = \frac{Nu_M \cdot k_a}{L} = \frac{\sqrt[3.5]{(M \cdot \text{Re}_L^B \cdot \text{Pr}^{1/3})^{3.5} + [C \cdot (Gr \cdot \text{Pr})^n]^{3.5}} \cdot k_a}{L} \quad (10)$$

Donde:

$Nu_M$ : número de Nusselt para la convección mixta; *adimensional*.

Las propiedades termofísicas del aire húmedo que influyen en el secado solar ( $\beta_a$ ,  $k_a$ ,  $\rho_a$ ,  $C_{p_a}$ ,  $\mu_a$ ,  $\nu_a$ ,  $\alpha_a$  y  $Pr$ ) se determinaron en función de la temperatura promedio ( $T_p$ ). Para ello se emplearon las ecuaciones empíricas (11-18) reportadas por Montero (2005).

$$\beta_a = \frac{1}{T_p + 273,15} \quad (11)$$

$$k_a = 0,0244 + 0,6763 \cdot 10^{-4} \cdot T_p \quad (12)$$

$$\rho_a = \frac{353,44}{T_p + 273,15} \quad (13)$$

$$C_{p_a} = \left( 999,2 + 0,1434 \cdot T_p + 1,101 \cdot 10^{-4} \cdot T_p^2 - 6,7581 \cdot 10^{-8} \cdot T_p^3 \right) \cdot 10^{-3} \quad (14)$$

$$\mu_a = 1,718 \cdot 10^{-5} + 4,620 \cdot 10^{-8} \cdot T_p \quad (15)$$

$$\nu_a = \frac{\mu_a}{\rho_a} = \frac{\left( 1,718 \cdot 10^{-5} + 4,620 \cdot 10^{-8} \cdot T_p \right) \cdot (T_p + 273,15)}{353,44} \quad (16)$$

$$\alpha_a = \frac{\left( 0,0244 + 0,6763 \cdot 10^{-4} \cdot T_p \right) \cdot 10^3 \cdot (T_p + 273,15)}{999,2 + 0,1434 \cdot T_p + 1,101 \cdot 10^{-4} \cdot T_p^2 - 6,7581 \cdot 10^{-8} \cdot T_p^3} \cdot \frac{1}{353,44} \quad (17)$$

$$Pr = \frac{\left[ \left( 1,718 \cdot 10^{-5} + 4,620 \cdot 10^{-8} \cdot T_p \right) \cdot \left( \begin{array}{l} 999,2 + 0,1434 \cdot T_p + \\ + 1,101 \cdot 10^{-4} \cdot T_p^2 - \\ - 6,7581 \cdot 10^{-8} \cdot T_p^3 \end{array} \right) \right] \cdot 10^{-3}}{0,0244 + 0,6763 \cdot 10^{-4} \cdot T_p} \quad (18)$$

Siendo:

$$T_p = \frac{T_s + T_a}{2} \quad (19)$$

Donde:

$\rho_a$ : densidad del aire;  $kg/m^3$ .

$Cp_a$ : calor específico a presión constante del aire;  $kJ/kg \cdot K$ .

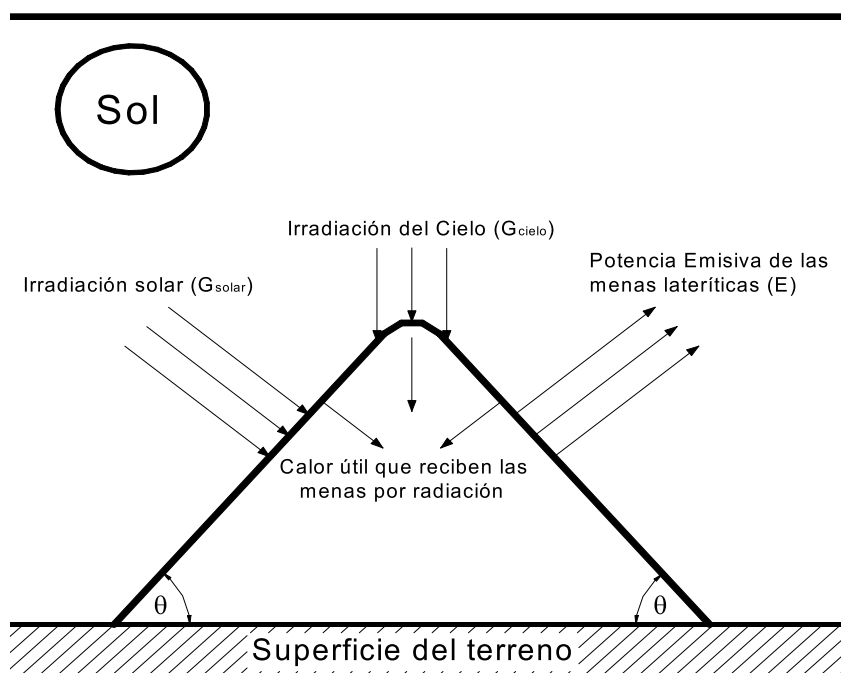
$\mu_a$ : viscosidad dinámica del aire;  $N \cdot s/m^2$ .

$T_p$ : temperatura promedio;  $^{\circ}C$ .

Con los resultados del coeficiente de transferencia de calor ( $h$ ) y los valores de la temperatura del aire y de la superficie de secado, determinados experimentalmente, se calculó el flujo de calor por convección mediante la ecuación (1).

### Radiación

Para determinar el flujo de calor por radiación que reciben las menas lateríticas se realizó un balance de energía en la superficie de secado en correspondencia con el esquema mostrado en la Figura 1. Se obtuvo la expresión (20).



**Figura 1.** Esquema estructural para el análisis del intercambio de calor por radiación entre la pila de mena laterítica y los alrededores.



$$q_{rad} = \alpha_s \cdot G_{solar} + \alpha_{cielo} \cdot G_{cielo} - E \quad (20)$$

Donde:

$q_{rad}$ : flujo de calor por radiación que recibe la pila de menas lateríticas;  $W/m^2$ .

$\alpha_s$ : absortividad solar de las menas lateríticas; *adimensional*.

$G_{solar}$ : Radiación solar;  $W/m^2$ .

$\alpha_{cielo}$ : absortividad del cielo; *adimensional*.

$G_{cielo}$ : irradiación del cielo;  $W/m^2$ .

$E$ : potencia emisiva de las menas lateríticas;  $W/m^2$ .

La radiación solar se determinó experimentalmente, mientras que la irradiación del cielo se calculó por la ecuación (21), expuesta por Anderson (1982).

$$G_{cielo} = \sigma \cdot T_{cielo}^4 \quad (21)$$

Donde:

$\sigma$ : constante de Stefan-Boltzman;  $W/m^2 \cdot K^4$ .

$T_{cielo}$ : temperatura efectiva del cielo;  $K$ .

Conociendo que la temperatura efectiva del cielo depende de las condiciones atmosféricas (Howell *et al.* 1982), su valor se calculó en función de la temperatura del aire, según la ecuación (22) recomendada por Duffie & Beckman (1991). La potencia emisiva asociada a la superficie de la pila de menas lateríticas se obtuvo mediante la ecuación (23), establecida por Duffie & Beckman (1980). Finalmente, el flujo de calor por radiación que recibe la superficie de secado se determinó sustituyendo las expresiones (21), (22) y (23) en la ecuación (20).

$$T_{cielo} = 0,0552 \cdot T_a^{1,5} \quad (22)$$

$$E = \varepsilon_m \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (23)$$

Donde:

$E_m$ : potencia emisiva de las menas lateríticas;  $W/m^2$ .

$\varepsilon_m$ : emisividad de las menas lateríticas; *adimensional*.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Transferencia de calor por convección

Los resultados mostraron bajos valores del coeficiente de transferencia de calor por convección, con niveles máximos de 223,209 y 1 224,206  $W/m^2 \cdot K$  para las pilas #1 y #2, respectivamente (Tablas 1 y 2).

Para la convección libre y la mixta se obtuvieron valores del número de Reynolds menores que para la convección forzada, debido a que estos últimos estuvieron determinados por el movimiento turbulento del agente de secado (el aire) cuando sus velocidades oscilaron entre 1,3 y 3,1  $m/s$  (Tabla 1). Estos comportamientos pueden ser atribuibles a los bajos regímenes de velocidad y temperatura del aire, lo que limita la formación de vórtices o remolinos que favorecen el proceso de secado, por cuanto intensifican la transferencia de calor y de masa de las menas lateríticas expuestas a la intemperie.

**Tabla 1.** Resultados de la transferencia de calor por convección para la pila #1

No.	H (%)	Ta (°C)	Va (m/s)	Re (-)	Gr · 10 <sup>9</sup> (-)	Gr/Re <sup>2</sup> (-)	Nu (-)	h (W/m <sup>2</sup> ·K)	q <sub>conv</sub> (W/m <sup>2</sup> )
1	39	25,7	1,3	136864	1,33828	0,0739	339,42	107,15	310,75
2	38	28,8	2,2	232987	2,68109	0,0493	519,49	164,00	951,23
3	36	31,7	2,2	235778	3,04913	0,0548	524,46	165,57	1076,24
4	35	32,4	1,3	140163	3,50600	0,1784	345,95	109,21	808,22
5	37	28,1	1,8	191761	2,53242	0,0688	444,54	140,34	757,87
6	34	30	2,7	292873	3,23914	0,0377	623,81	196,94	1319,50
7	31	31,4	3,1	342490	2,69767	0,0229	707,01	223,20	1205,33
8	29	30,9	2,7	302028	3,28464	0,0360	639,36	201,85	1291,84
9	40	24,8	0,4	41865	3,11014	1,7744	131,58	41,541	282,48
10	38	28,1	1,3	137674	2,73365	0,1442	341,03	107,66	635,22
11	33	31,6	2,2	240093	3,99265	0,0692	532,12	167,99	1377,56
12	30	32,4	2,2	244568	4,74002	0,0792	540,04	170,49	1602,65
13	32	27,6	0,1	10980	3,19729	26,518	131,42	41,49	265,54
14	30	30,4	2,7	300151	4,00990	0,0445	636,18	200,84	1586,69
15	28	28,1	0,1	11249	3,98495	31,488	141,43	44,65	339,35
16	26	33,8	3,1	336669	4,02063	0,0354	697,38	220,16	1849,42

En la pila #2 (Tabla 2) incidió la convección forzada. La relación  $Gr/Re^2$  en todos los casos fue mucho menor que uno, lo que estuvo determinado por la velocidad y temperatura del aire, siempre iguales o superiores a 1,3 m/s y 27,9 °C, respectivamente.

Los flujos de calor transferidos por convección variaron entre 610,782 y 1 615,704  $W/m^2$ , en correspondencia con los resultados obtenidos para el coeficiente  $h$  y la diferencia de temperatura entre el aire y la superficie de secado. Los flujos se incrementaron con el aumento de la velocidad y la temperatura del aire como resultado de la intensificación de la radiación solar.

**Tabla 2.** Resultados de la transferencia de calor por convección para la pila #2

No.	H (%)	Ta (°C)	Va (m/s)	Re (-)	Gr · 10 <sup>9</sup> (-)	Gr/Re <sup>2</sup> (-)	Nu (-)	h (W/m <sup>2</sup> ·K)	q <sub>conv</sub> (W/m <sup>2</sup> )
1	38	27,9	1,3	146428	2,83870	0,1323	358,27	113,10	610,78
2	36	30,2	2,2	244264	3,34378	0,0560	539,51	170,32	1124,15
3	34	32,9	2,2	240239	4,22335	0,0731	532,38	168,07	1462,27
4	34	28,7	1,3	140617	3,20972	0,1623	346,85	109,50	700,81
5	30	31,3	1,8	198498	3,88324	0,0985	456,99	144,27	1125,36
6	28	33,9	2,7	293051	3,91878	0,0456	624,11	197,03	1615,70
7	30	30,1	3,1	344404	2,99390	0,0252	710,17	224,20	1322,82
8	25	32,3	2,7	295923	3,18530	0,0363	629,00	198,58	1290,77

### Transferencia de calor por radiación

Los máximos flujos de calor transferidos por radiación en ambas pilas se correspondieron con los mayores valores de radiación solar (Tablas 3 y 4) y estuvieron determinados, fundamentalmente, por la absorptividad solar y la emisividad las menas lateríticas, la irradiación del cielo y la temperatura de la superficie de secado.

**Tabla 3.** Resultados de la transferencia de calor por radiación para la pila #1

No.	H (%)	G <sub>solar</sub> (W/m <sup>2</sup> )	$\alpha_s \cdot G_{solar}$ (W/m <sup>2</sup> )	G <sub>cielo</sub> (W/m <sup>2</sup> )	$\alpha_{cielo} \cdot G_{cielo}$ (W/m <sup>2</sup> )	E (W/m <sup>2</sup> )	q <sub>rad</sub> (W/m <sup>2</sup> )
1	39	143	111,54	373,896	358,940	416,723	53,758
2	38	591	460,98	397,791	381,879	417,851	425,009
3	36	967	754,26	421,283	404,432	430,412	728,279
4	35	536	418,08	427,124	410,039	429,259	398,860
5	37	70	54,6	392,287	376,596	416,159	15,036
6	34	529	412,62	407,376	391,081	419,547	384,153
7	31	244	190,32	418,801	402,049	435,050	157,319
8	29	145	113,1	414,690	398,102	426,385	84,817
9	40	174	135,72	367,187	352,500	390,325	97,895
10	38	605	471,9	392,287	376,596	413,352	435,144
11	33	980	764,4	420,454	403,636	420,114	747,922
12	30	648	505,44	427,124	410,039	417,851	497,628
13	32	158	123,24	388,395	372,859	407,779	88,320
14	30	602	469,56	410,613	394,189	415,035	448,714
15	28	164	127,92	392,287	376,596	403,912	100,604
16	26	695	542,1	439,007	421,447	431,568	531,978

**Tabla 4.** Resultados de la transferencia de calor por radiación para la pila #2

No.	H (%)	G <sub>solar</sub> (W/m <sup>2</sup> )	$\alpha_s \cdot G_{solar}$ (W/m <sup>2</sup> )	G <sub>cielo</sub> (W/m <sup>2</sup> )	$\alpha_{cielo} \cdot G_{cielo}$ (W/m <sup>2</sup> )	E (W/m <sup>2</sup> )	q <sub>rad</sub> (W/m <sup>2</sup> )
1	38	152	118,56	390,726	375,097	415,034	78,623
2	36	596	464,88	408,992	392,632	421,248	436,263
3	34	556	433,68	431,337	414,083	424,667	423,095
4	34	168	131,04	397,001	381,121	413,912	98,249
5	30	586	457,08	417,976	401,257	420,681	437,656
6	28	919	716,82	439,866	422,272	433,306	705,785
7	30	149	116,22	408,183	391,856	424,667	83,408
8	25	775	604,5	426,285	409,234	433,887	579,847

El valor promedio del calor transferido por radiación en la pila #2, con una masa de 50 kg fue superior en 30,651 W/m<sup>2</sup> al de la pila #1, de 100 kg, determinando que el tiempo de secado para la primera pila fuera 102 horas, mientras que para la segunda descendiera a 52 horas.

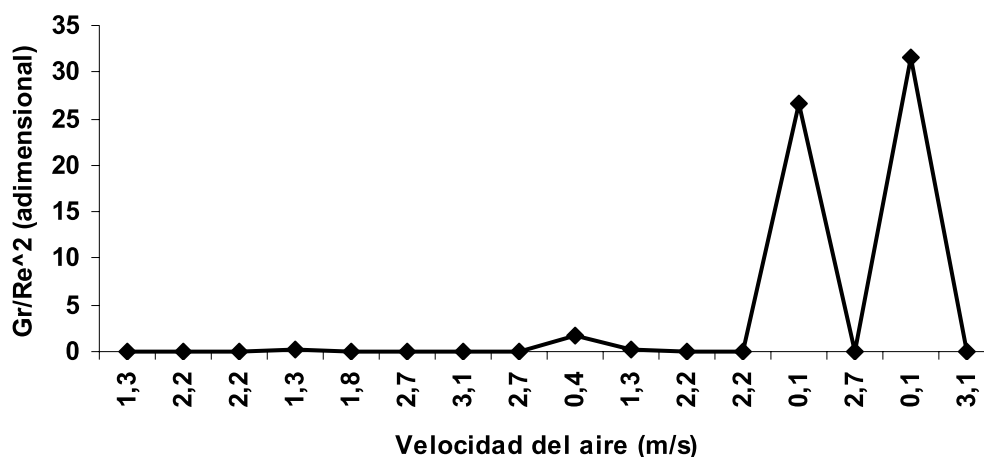
En ambas pilas los flujos de calor por convección promedios fueron superiores a los de radiación, lo cual puede atribuirse, fundamentalmente, a la influencia del movimiento del aire, que en la región de Moa es prácticamente permanente durante todo el año, y a la nubosidad existente durante algunos días en los que se realizaron

los experimentos, lo que influyó en el desarrollo del proceso de secado a la intemperie.

### Comportamiento de los parámetros que caracterizan la transferencia de calor

Se evidenció un predominio de la convección forzada, manifestado en el valor obtenido de la relación entre los números de Grashof y Reynolds ( $Gr/Re^2$ ), el cual, por lo general, fue mucho menor que uno (Figuras 2 y 3). Sin embargo, en la pila #1 (Figura 2), para humedades de 32 y 28 %, la relación  $Gr/Re^2$  fue mucho mayor que uno (26,5 y 31,4), lo que permite concluir que existe predominio de la convección libre. Para humedad de 40 %, predominó la convección mixta, atendiendo a que el cociente entre los dos números adimensionales antes referidos fue de 1,7.

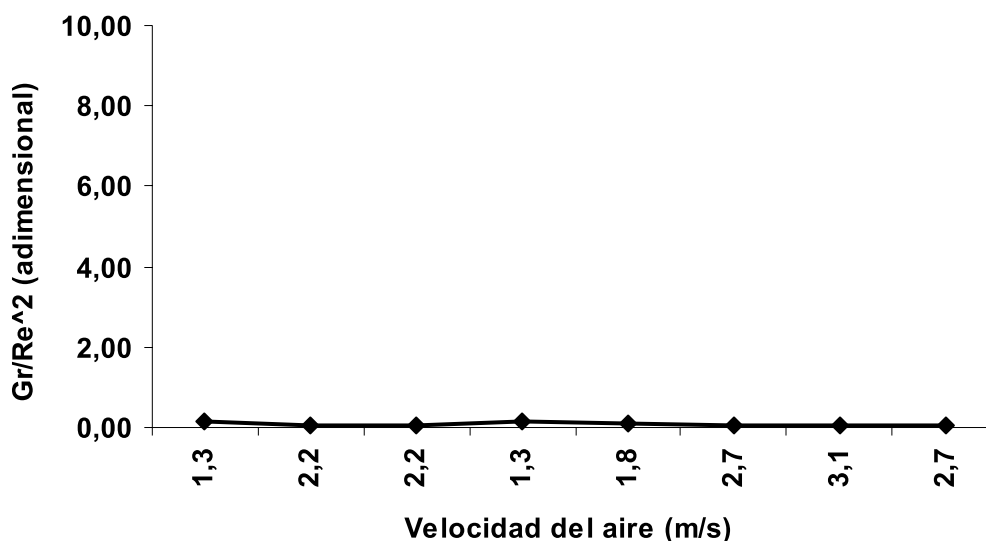
De los aspectos anteriores se infiere que el secado solar de menas lateríticas a la intemperie es un proceso complejo, en el que están presentes las tres formas de transmisión del calor por convección: libre, forzada y mixta, siendo predominante la segunda. En la pila #1 se produjo transmisión de calor por convección mixta y libre para velocidades del aire iguales o inferiores a 0,4 m/s (Figura 2).



**Figura 2.** Comportamiento de la relación  $Gr/Re^2$  para la pila #1.

Sobre la pila #2 (Figura 3) solo se produjo la convección forzada, lo cual estuvo determinado por la velocidad del aire, que en todos los casos fue superior a 1,3 m/s. Este comportamiento contradice los cri-

terios expuestos por algunos investigadores de que en condiciones naturales la convección predominante es la libre o natural y confirma que la convección forzada depende de la velocidad del fluido que intercambia calor independientemente de la fuente que la genere.



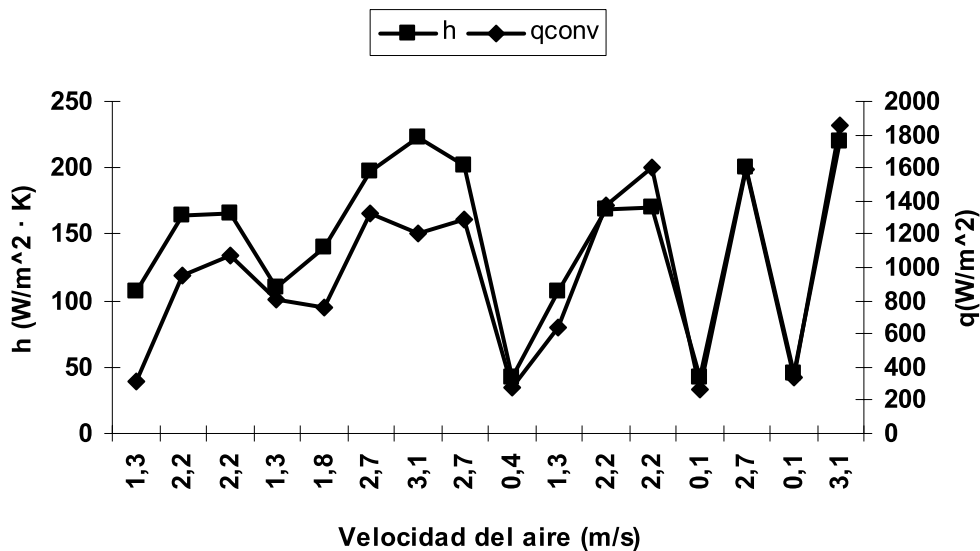
**Figura 3.** Comportamiento de la relación  $Gr/Re^2$  para la pila #2.

Las Figuras 4 y 5 reflejan el comportamiento del coeficiente de transferencia de calor y del flujo de calor por convección para ambas pilas. Se aprecia un predominio de la convección forzada, aunque para la pila #1 existen tres puntos en los que el coeficiente de transferencia de calor por convección es inferior a  $50 W/m^2 \cdot K$ , indicativo de la existencia de transferencia de calor por convección libre y mixta. Sin embargo, en la pila #2 predominó la convección forzada y, en consecuencia, el coeficiente de transferencia de calor siempre fue superior a  $100 W/m^2 \cdot K$ . Estos resultados se corresponden con los reportados por Incropera & De Witt (1999) para la convección libre y forzada en gases.

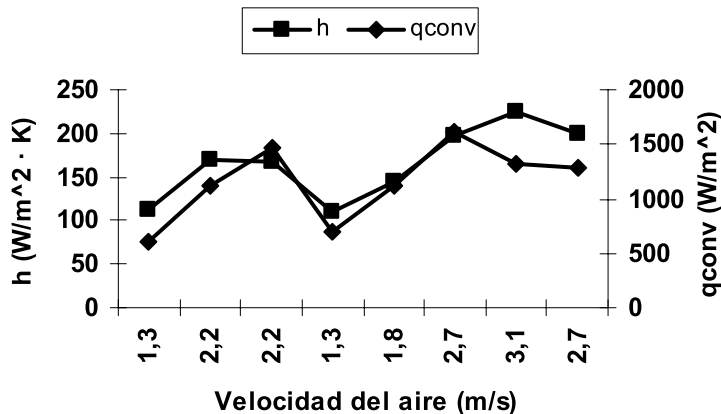
Los coeficientes de transferencia de calor tienen, como tendencia, un comportamiento creciente, pero a pesar de ello se observan diferentes puntos de inflexión que se corresponden con los valores de velocidad del aire (1,3; 0,4 y 0,1) para los cuales se produce la transición a la convección mixta y a la libre. En la pila #1 el comportamiento es irregular debido a las constantes variaciones que experimentó la velocidad del aire (Figura 4); en la pila #2 se comportó estable, con una

disminución en 1,3 m/s, pero al igual que en la primera pila la tendencia general fue creciente (Figura 5).

Al valorar el comportamiento del flujo de calor se observó una dependencia proporcional respecto al coeficiente de transferencia de calor por convección, lo cual se corresponde con la Ley de Newton-Richman (ecuación 1). En ambos gráficos (Figuras 4 y 5) existen diferencias entre los comportamientos mostrados por las curvas del coeficiente  $h$  y el flujo de calor  $q_{conv}$  que demuestran la influencia que tiene, en el flujo de calor transferido, la diferencia de temperatura entre el aire y la superficie de secado.



**Figura 4.** Comportamiento del coeficiente de transferencia de calor por convección y el flujo de calor (pila #1).



**Figura 5.** Comportamiento del coeficiente de transferencia de calor por convección y el flujo de calor (pila #2).

En las Figuras 6 y 7 se aprecia la influencia que tiene la radiación solar y la irradiación del cielo en el flujo de calor por radiación que es aprovechado en el secado solar a la intemperie. En las referidas figuras se observa proporcionalidad entre los valores de radiación solar y los flujos de calor por radiación, los cuales son mayores en la pila #1. Debe destacarse las continuas oscilaciones en la radiación solar, en función de la variación de las condiciones climatológicas de la región, la estación del año y el horario del día. En ambas pilas los valores determinados fueron inferiores a  $800 \text{ W/m}^2$

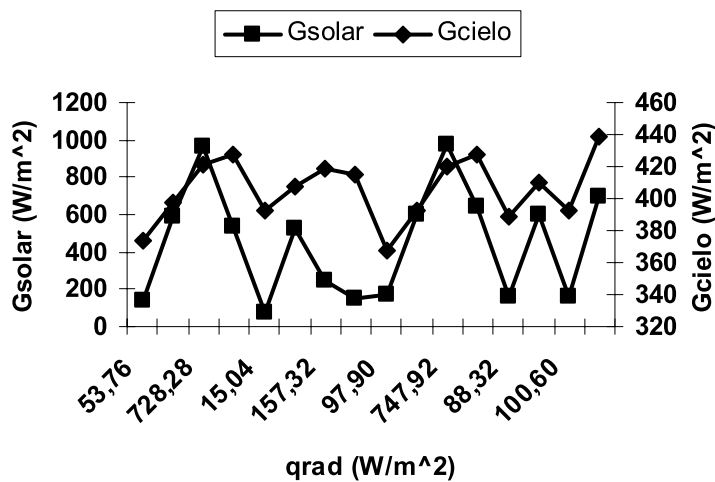


Figura 6. Comportamiento de la radiación solar y la irradiación del cielo (pila #1).

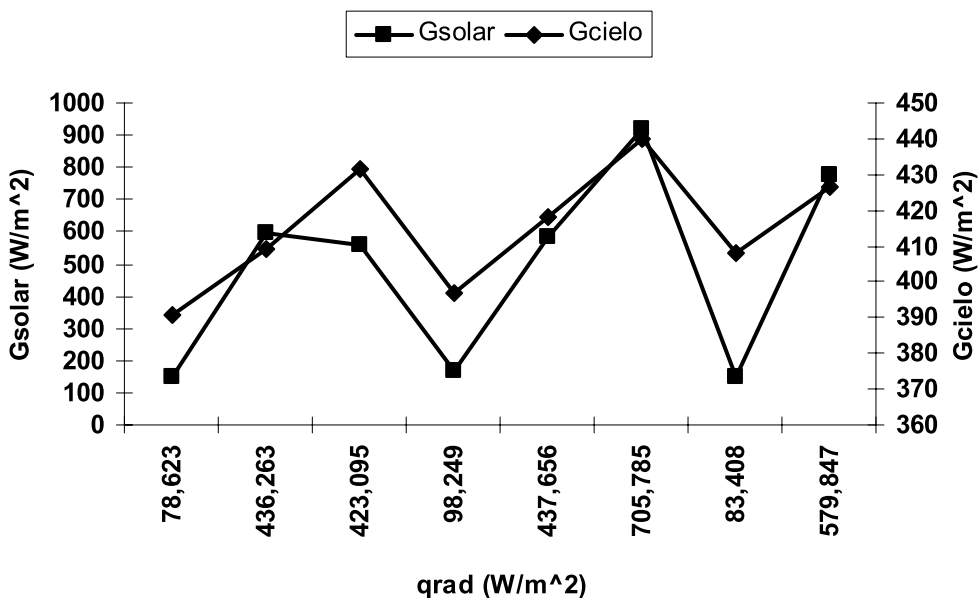


Figura 7. Comportamiento de la radiación solar y la irradiación del cielo (pila #2).



Al comparar los valores de los flujos de calor por convección y por radiación entre ambas pilas, se aprecia que la primera tuvo mayor influencia en el secado, de lo anterior se infiere la importancia que tiene el régimen eólico en el secado a la intemperie y se ratifica que el secado en condiciones naturales depende esencialmente de las energías eólica y solar térmica.

### CONCLUSIONES

En el secado solar a la intemperie de menas lateríticas ferroniquelíferas, en la región de Moa, influyen los tres modos de transmisión de calor; sin embargo, en las condiciones analizadas predominó la convección, secundada por la radiación, mientras la conducción se consideró despreciable.

Durante el secado solar se transfiere calor por convección libre, forzada y mixta, predominando la segunda, para la cual los coeficientes de transferencia de calor mínimo y máximo mostraron pequeñas variaciones entre las dos pilas analizadas.

Los flujos de calor por convección promedios fueron 978,74 y 1 156,58  $W/m^2$ , mientras que los flujos por radiación ascendieron a 324,71 y 355,36  $W/m^2$  para las pilas #1 y #2, respectivamente. En general, los primeros estuvieron determinados por el coeficiente de transferencia de calor, la velocidad y temperatura del agente de secado, y los segundos por la intensidad de la radiación solar.

### REFERENCIAS

- ABDEL-REHIM, Z. & A. NAGIB. 2007: Solar drying of bagasse pulp. *Journal of Applied Sciences Research*, 3(4): 300-306.
- ANDERSON, E. 1982: *Solar energy fundamentals for designers and engineers*. New York: Addison-Wesley.
- ANWAR, S & G. TIWARI. 2001: Evaluation of convective heat transfer coefficient in crop drying under open sun drying. *Energy Conversion and Management*, 42(2): 627-637.
- BELTAGY, A.; G. GAMEA & A. ESSA. 2007: Solar drying characteristics of strawberry. *Journal of Food Engineering*, 78 (1): 456-464.

- BENAMOUN, L. & A. BELHAMRI. 2006: Design and simulation of a solar dryer for agriculture products. *Journal of Food Engineering*, 59(2): 259-266.
- BOIZÁN, M. 1991: *Macrocinética del secado de Bagazo*. Santiago de Cuba: Ediciones ISJAM. 145p.
- CHEN, H.; C. HERNÁNDEZ & T. HUANG. 2005: A study of the drying effect on lemon slices using a closed-type solar dryer. *Solar Energy*, 78(1): 97-103.
- DUFFIE, J. & W. BECKMAN. 1980: *Solar energy thermal processes*, New York: Wiley Intitution. 820p.
- DUFFIE, J. & W. BECKMAN. 1991: *Solar engineering of thermal processes*. New York: Wiley Institution. 919p.
- ESTENOZ, S. 2001: Desarrollo sostenible en la minería a través del aprovechamiento integral de los yacimientos lateríticos. *Tecnología Química*, 21(3): 54-60.
- ESTENOZ, S.; A. ALDERÍ; N. BATISTA & A. DONATIÉN. 2005: Resultados en la industria minera del secado solar y la homogeneización de minerales en pilas a la intemperie. En: Memorias en CD del Evento Conferencia Internacional de Energía y Medio Ambiente CIEMA'05, 2005, Santiago de Cuba, Noviembre 8-11, ISBN 959-2007-198-5.
- ESTENOZ, S.; A. ALDERÍ; A. REYES; Y. LOVAINA & H. PINTO. 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, Marzo 20-23, ISBN 978-959-7117-16-2.
- ESTENOZ, S.; A. ALDERÍ; N. BATISTA; A. DONATIÉN & N. PÉREZ. 2007b: Aplicación del secado solar y la homogeneización en la industria níquelífera Comandante Ernesto Che Guevara. En: II Congreso Cubano de Minería. La Habana, Marzo 20-23, ISBN 978-959-7117-16-2.
- ESTENOZ, S.; A. MEJÍAS; A. DONATIÉN; A. ADHERÍ; A. DÍAZ; A. CUTIÑO; F. BOVE & M. LEÓN, 2008: Uso racional de los recursos con la explotación de los depósitos de secado solar y estabilización de la calidad en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. En: Convención Internacional de Ingeniería en Cuba, Cienfuegos.
- 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. La Habana, Marzo 16-20, ISBN 978-959-7117-19-3.

- FERREIRA, S & A. COSTA. 2009: Parámetros de transferencia de materia en el secado de frutas. *Información Tecnológica*, 20(2): 89-104.
- GIGLER, J.; W. VAN LOON & C. SONNEVELD: Experiment and modelling of parameters influencing natural wind drying of willow chunks. *Biomass and Bioenergy*, 2004, 26(6): 507-514.
- HERNÁNDEZ, J & P. QUINTO. 2005: Secado de medios porosos: una revisión a las teorías actualmente en uso. *Científica*, 9(2): 63-71.
- HOWELL, J.; R. BANNEROT & G. VLIET. 1982: *Solar thermal energy systems, analysis and desing*, Nueva York: McGraw-Hill.
- INCROPERA, F & D. DE WITT. 1999: *Fundamentals of heat and mass transfer*. 3 ed. La Habana: Editorial Pueblo y Educación. Tomos I, II y III.
- INCROPERA, F & D. DE WITT. 2003: *Fundamentals of heat and mass transfer*. 4 ed. La Habana: Editorial Pueblo y Educación. Tomo I, II y III.
- JAIN, D & G. TIWARI. 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.
- KASATKIN, A. 1987. *Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 2 t.
- KAVIANI, M. 1994: *Principles of convective heat transfer*, Springer-Verlag, Nueva York.
- KNOULE, F. 1982: *El secado*. Bilbao. Ediciones Urno. 150 p.
- MONTERO, I. 2005: Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos. [Universidad de Extremadura]. Badajoz (Tesis Doctoral) 262 p.
- MONTES, E.; R. TORRES; R. ANDRADE; O. PEREZ; J. MARIMON & I. MEZA. 2008: Modelado de la cinética de secado de ñame en capa delgada. *Ingeniería e investigación*, 28(2): 45-52.
- PLUMB, O.; G. SPOLEK & B. OLMSTEAD. 1985: Heat and mass transfer in wood during drying. *International Journal Heat Mass Transfer*, 28(9): 169-178.
- RETIRADO, Y. 2007: *Comportamiento de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico*. [Instituto Superior Minero Metalúrgico]. Moa (Tesis de Maestría) 71p.

- RETIRADO, Y. 2010: Estudio experimental del proceso de secado solar de las menas lateríticas empleadas en la industria del níquel en Moa. En: Forum tecnológico especial de energía. Moa, Diciembre 8-9, ISBN: 978-959-16-1216-8.
- RETIRADO, Y.; E. GÓNGORA; E. TORRES & A. ROJAS. 2007: (on line). *Comportamiento de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico. Minería & Geología*, 23 (3). Consultado: 20 dic 2010 [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg)
- RETIRADO, Y.; E. GÓNGORA; E. TORRES & N. HERNÁNDEZ. 2009: (on line). Comportamiento de la adherencia en menas lateríticas sometidas a secado solar natural. *Minería & Geología*, 25 (1). Consultado: 20 dic 2010 [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg)
- RETIRADO, Y.; E. GÓNGORA; E. TORRES & N. HERNÁNDEZ. 2008: Cinética del secado solar del mineral laterítico empleado en la Industria del níquel en Moa, 5to Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente. CD-ROM ISBN: 978-959-257-186-0.
- RUDENKO, K.; M. SHEMAJANOV. 1989: *Eliminación de la humedad y el polvo*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 352 p.
- SINGH, A & R. THORPE. 1993: A Solution Procedure for Three-Dimensional Free Convective Flow in Peaked Bulks of Grain. *Journal Stored Products Research*, 29(3): 221-235.
- TIRIS, C.; N. OZBALTA; M. TIRIS & I. DINCER. 1995: Thermal performance of a new solar air heater. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 22(3): 411-423.
- TIWARI, G & B. SARKAR. 2006: Experimental study of greenhouse Prawn drying under natural convection. *Agricultural Engineering International*, 8(16): 1-9.
- TIWARI, G.; S. KUMAR & O. PRAKASH. 2004: Evaluation of convective mass transfer coefficient during drying of Jaggery. *Journal of Food Engineering*, 63 (1): 219-227.
- THORPE, R & S. WHITAKER. 1992: Local mass and thermal equilibria in ventilated grain bulks. Part I- The Development of Heat and Mass Conservation Equations. *Journal of Stored Products Research*, 28(1): 15-27.
- TÜRK, I. 2003: Determination of convective heat transfer coefficient of various crops under open sun drying conditions. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 30(2): 285-294.

TOURÉ, S & S. KIBANGU-HKEMBO. 2004: Comparative study of natural solar drying of cassava, banana and mango. *Renewable Energy*, 29(6): 975-990.

**Yoalbys Retirado Mediaceja**

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

[yretirado@ismm.edu.cu](mailto:yretirado@ismm.edu.cu)

**Marbelis Lamorú Urgelles**

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

[mlamoru@ismm.edu.cu](mailto:mlamoru@ismm.edu.cu)

**Ever Góngora Leyva**

Profesor Auxiliar. Máster en Electromecánica Minero Metalúrgica.  
Departamento de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Minero  
Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba.

[egongora@ismm.edu.cu](mailto:egongora@ismm.edu.cu)

**Enrique Torres Tamayo**

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

[bleyva@ismm.edu.cu](mailto:bleyva@ismm.edu.cu)

**Benigno Leyva de la Cruz**

Profesor Instructor. Ingeniero Mecánico. Departamento de Ingeniería  
Mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de  
Moa, Holguín, Cuba.

[bleyva@ismm.edu.cu](mailto:bleyva@ismm.edu.cu)

**Daynelis García Batista**

Profesora Instructora. Licenciada en Contabilidad. Departamento de  
Matemática. Instituto Superior Minero Metalúrgico de  
Moa, Holguín, Cuba.

[dgbatista@ismm.edu.cu](mailto:dgbatista@ismm.edu.cu)