

**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

Trabajo de Diploma

En opción al título de Ingeniero Mecánico

**Optimización de la geometría de la sección transversal de
las pilas de menas lateríticas expuestas a secado natural**

Autor: Amado Arisnel Cabezas Mendoza.

Tutores: Ms. C. Yoalbys Retirado Mediaceja.

Ms. C. Marbelis Lamorú Urgelles.

Dr. C. Arístides Alejandro Legrá Lobaina.

Moa, 2012

“Año 54 de la Revolución”

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: **Amado Arisnel Cabezas Mendoza**, autor de este trabajo y los tutores Yoalbys Retirado Mediaceja, Marbelis Lamorú Urgelles y Arístides Alejandro Legrá Lobaina declaramos la propiedad intelectual del mismo al servicio del Departamento de Ingeniería Mecánica y del Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa, ambos pertenecientes al Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, para que dispongan de su uso cuando estimen conveniente.

Amado Arisnel Cabezas Mendoza

Ms. C. Yoalbys Retirado Mediaceja

Ms. C. Marbelis Lamorú Urgelles

Dr. C. Arístides Alejandro Legrá Lobaina

PENSAMIENTO

... ahora tenemos que sembrar a profesionales capaces, tenemos que sembrar profesionales idealistas, no profesionales reaccionarios, ni profesionales incompetentes, ni profesionales que vengan a estudiar a la universidad para ponerse después al servicio de los intereses creados.

Fidel Castro Ruz



AGRADECIMIENTOS

A la Revolución porque si hoy tengo la posibilidad de ser un profesional, es gracias a ella.

A mis tutores Yoalbys Retirado Mediaceja, Marbelis Lamorú Urgelles y Arístides Alejandro Legrá Lobaina que siempre han estado ahí para ayudarme pese a las horas de sueño y al cansancio.

A mi novia Kenia por no desampararme en ningún momento, porque si actualmente existe esta tesis es gracias a ella.

A Elio Cabrera por las incontables e impagables ayudas ofrecidas durante todos estos años.

A mis amigos que a pesar de desconocer acerca de la materia contribuyeron en todo lo que pudieron.

A todos los profesores que de una forma u otra contribuyeron a la formación y a la realización de mi sueño, ser un profesional.

A mis padres y familiares por toda su preocupación.

***A todos
Muchas gracias***

DEDICATORIA

Dedico esta tesis:

A la Revolución por haberme dado la oportunidad de formarme como futuro ingeniero.

A mis tutores Yoalbys Retirado Mediaceja, Marbelis Lamorú Urgelles y Arístides Alejandro Legrá Lobaina por toda su entrega y dedicación durante este período.

A mis compañeros de aula por su incondicionalidad durante los cinco años de la carrera.

A mis amigos por su apoyo para salir adelante.

A mi novia Kenia por ser mi ejemplo a seguir y por estar presente cuando más la necesité.

A mi familia por ser el bastón que me ayudó a mantenerme firme hasta el final, sin dar paso al cansancio.

Y por sobre todo quiero dedicar esta tesis a las dos personas más importantes en mi vida, que sin su ayuda, confianza, amor, paciencia y entrega, hoy no estaría orgulloso de ser quien soy; **mis padres**.

RESUMEN

En este trabajo se realiza la optimización de la sección transversal de las pilas de menas lateríticas expuestas a secado natural. Para ello se empleó un método de optimización que posibilitó la discretización de los valores de las variables, la evaluación exhaustiva de las restricciones para cada uno de los valores discretos de las variables, la evaluación de la función objetivo para todas las soluciones factibles y la selección de las mejores soluciones. Lo anterior permitió la optimización del parámetro de interés atendiendo al aprovechamiento de la energía térmica disponible para el secado, evidenciándose que la implementación práctica del proceso de secado natural de las menas lateríticas debe realizarse con pilas de sección transversal parabólica que tengan la superficie de secado inclinada entre 30 y 60 grados sexagesimales, respecto al plano horizontal. Luego se establece un conjunto de acciones que contribuyen al perfeccionamiento de la tecnología de secado natural empleada en las empresas productoras de níquel cubanas. Finalmente se comprobó que la implementación del secado natural en la empresa “Comandante René Ramos Latour” de Nicaro redujo el contenido de humedad del material en 1,40 % y en consecuencia se redujeron las emisiones de gases tóxicos producto de la combustión del petróleo y se incrementaron las emanaciones de polvo que se generan en el proceso de carga, descarga y remoción de las menas lateríticas en el patio de secado.

ABSTRACT

In this work it is carried out the optimization of the traverse section of the piles of fewer exposed laterites to natural drying. For it was used an optimization method that facilitated the discretization of the values of the variables, the exhaustive evaluation of the restrictions for each one of the discreet values of the variables, the evaluation of the function objective for all the feasible solutions and the selection of the best solutions. The above-mentioned allowed the optimization of the parameter of interest assisting to the use of the available thermal energy for the drying, being evidenced that the practical implementation of the process of natural drying of the ores laterite should be carried out with piles of parabolic traverse section that have the drying surface bowed between 30 and 60 grades, regarding the horizontal plane. Then it settles down a group of actions that they contribute to the improvement of the technology of drying natural employee in the companies cuban nickel producers. Finally it was proven that the implementation of the natural drying in the company "Major René Ramos Latour" of Nicaro it reduced the content of humidity of the material in 1, 40 % and in consequence they decreased the emissions of toxic gases product of the combustion of the petroleum and the powder emanations were increased that are generated in the load process, it discharges and removal of the lateritic ores in the drying field.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.	-1-
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO RELACIONADO CON LOS PROCESOS DE SECADO.	-5-
1.1- Introducción.	-5-
1.2- Estado del arte actual relacionado con las teorías de secado.	-5-
1.3- Trabajos precedentes relacionados con el secado solar en Cuba.	-7-
1.3.1- Trabajos sobre el secado de las menas lateríticas.	-9-
1.4- Teoría básica relacionada con los procesos de secado.	-11-
1.4.1- Clasificación de los sólidos húmedos objeto de secado.	-11-
1.4.2- Formas de enlace de la humedad con el material.	-12-
1.4.3- Transferencia de calor y masa durante el secado.	-13-
1.5- Aspectos sobre el secado natural de las menas lateríticas.	-14-
1.5.1- Movimiento de la humedad en las pilas de lateritas.	-15-
1.6- Generalidades sobre los métodos de optimización.	-16-
1.6.1- Métodos de optimización discreta más empleados.	-17-
1.6.2- Particularidades del método de búsqueda exhaustiva.	-17-
1.7- Conclusiones del capítulo 1.	-20-
CAPÍTULO PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS	
2. NECESARIOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA FORMA GEOMÉTRICA	
DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LAS PILAS DE MINERALES.	-21-
2.1- Introducción.	-21-
2.2- Ángulo de reposo de las pilas y geometría de su sección transversal.	-21-
2.2.1- Procedimiento para determinar el ángulo de reposo.	-21-
2.2.2- Caracterización de la geometría de la sección transversal.	-22-
2.3- Área de exposición y volumen de las pilas de menas lateríticas.	-23-
2.3.1- Pilas de sección transversal semi-elíptica.	-25-
2.3.2- Pilas de sección transversal hiperbólica.	-25-

2.3.3-	Pilas de sección transversal parabólica.	-27-
2.3.4-	Pilas de sección transversal triangular.	-28-
2.4-	Flujos de calor transferidos durante el proceso de secado natural.	-29-
2.4.1-	Flujo de calor por radiación.	-29-
2.4.1.1-	Radiación global que incide en la superficie de la pila.	-30-
2.4.2-	Flujo de calor por convección.	-31-
2.4.3-	Flujo de calor por conducción.	-33-
2.4.3.1-	Distribución de temperatura en la pila.	-34-
2.5-	Distribución de humedad en la pila.	-35-
2.6-	Conclusiones del capítulo 2.	-36-
CAPÍTULO 3.	OPTIMIZACIÓN DE LA FORMA GEOMÉTRICA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LAS PILAS DE MENAS LATERÍTICAS EXPUESTAS A SECADO NATURAL.	-37-
3.1-	Introducción.	-37-
3.2-	Desarrollo de la optimización.	-37-
3.2.1-	Elección del método de optimización.	-37-
3.2.2-	Procedimiento de optimización utilizado.	-38-
3.2.3-	Resultados obtenidos en la optimización.	-41-
3.2.3.1-	Según la densidad de radiación recibida en la superficie.	-41-
3.2.3.2-	Según la radiación total y el calor total recibidos en la superficie.	-43-
3.2.3.3-	Según el porcentaje y el volumen de mineral secado.	-44-
3.2.3.4-	Influencia del área de exposición y el volumen de las pilas de minerales.	-46-
3.3-	Acciones para perfeccionar la tecnología de secado natural empleada.	-48-
3.4-	Valoración de los beneficios económicos derivados de la implementación del secado natural de las menas lateríticas.	-50-
3.4.1-	Beneficios obtenidos en la empresa “René Ramos Latour”.	-50-
3.5-	Impacto ambiental asociado al proceso de secado natural.	-52-

3.5.1-	Influencia del polvo en el ambiente y el organismo humano.	-52-
3.6-	Conclusiones del capítulo 3.	-54-
	CONCLUSIONES GENERALES.	-55-
	RECOMENDACIONES.	-56-
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	-57-
	ANEXOS.	-X-

Introducción General

INTRODUCCIÓN

En la República de Cuba el concentrado de Ni+Co se obtiene con tecnología carbonato amoniacal en dos industrias metalúrgicas, ellas son: las empresas “Comandante René Ramos Latour” y “Comandante Ernesto Che Guevara” en ambas entidades se obtienen el producto final a partir de la explotación a cielo abierto de las minas.

En estas industrias metalúrgicas se desarrollan complejos procesos que muestran diferentes comportamientos con dinámicas muy variadas (Guzmán, 2001), entre ellos se encuentran en la planta de preparación de mineral los procesos de secado térmico convencional en cilindros rotatorios y el secado natural.

El secado es la eliminación del agua que contienen los materiales, el mismo se realiza a través de un proceso de transferencia de calor y masa, también puede efectuarse por medios mecánicos (sedimentación, centrifugación y filtración). Sin embargo, la deshidratación más completa se alcanza mediante el secado térmico. Entre los aspectos más importantes que se han planteado los directivos de las empresas productoras de níquel en función de disminuir el consumo de combustible, está la realización eficiente del proceso de secado en los cilindros rotatorios, a partir de implementar el secado solar previo del material (secado natural), aspecto no resuelto en la actualidad, si se tiene en cuenta que, según el informe económico anual de las empresas, solo en el proceso de secado se consume aproximadamente el 20 % del total de la energía consumida en las entidades.

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

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

El secado solar por sus múltiples ventajas y perspectivas se encuentra ampliamente aplicado a nivel mundial (Gógüs y Maskan, 2006; Picado *et al.*, 2006; Abdel-Rehim y

Nagib, 2007; Beltagy *et al.*, 2007). En Cuba su empleo se reduce a las industrias de alimentos, café, madera, entre otras (Ferro *et al.*, 2000; Abdala *et al.*, 2003; Fonseca *et al.*, 2003; Bergues *et al.*, 2003; Griñán y Fonseca, 2003; Pacheco *et al.*, 2006; Bergues *et al.*, 2006; Leyva *et al.*, 2010) y en menor medida en la industria del níquel.

El estudio del secado natural de las menas lateríticas es un aspecto novedoso poco abordado en la literatura especializada en la temática de secado (Hernández *et al.*, 2008; Montes *et al.*, 2008; Ferreira y Costa, 2009), por cuanto depende de las propiedades termofísicas del material y del agente de secado, así como, de las características climatológicas de la región donde se implementa el proceso.

Los estudios más interesantes dedicados a la implementación práctica del secado natural de las menas lateríticas han sido desarrollados por un grupo de investigadores del Centro de Desarrollo de Investigaciones del Níquel de Moa (Estenoz *et al.*, 2005; Estenoz *et al.*, 2007a, b y c). En estos trabajos diseñaron una tecnología de secado natural que prevé la formación, evacuación y control de las operaciones con pilas de minerales en los depósitos mineros. Esta tecnología tiene varias ventajas, sin embargo, presenta las siguientes limitaciones:

- No concibe la caracterización de la forma geométrica de la sección transversal de las pilas lo cual no permite calcular, con la precisión requerida, el área de exposición de la pila, el volumen de material expuesto a secado y la radiación solar global que llega a la superficie de secado.
- No considera la optimización de la forma geométrica de la sección transversal de las pilas de menas lateríticas expuestas a secado natural.

En el secado natural de los materiales la superficie de secado está expuesta directamente a la radiación solar y a la convección del aire, siendo los requerimientos energéticos de la operación suministrados por la energía solar (Tiwari y Sarkar 2006; Ferreira y Costa 2009). En las empresas productoras de níquel cubanas el referido proceso se implementa almacenando las menas lateríticas a la intemperie en forma de pilas (Estenoz *et al.* 2007 a y b; Estenoz 2009; Retirado *et al.* 2011; Vinardell 2011).

El secado natural de los minerales lateríticos se ha implementado como alternativa para racionalizar el proceso tecnológico de obtención de níquel (Retirado *et al.* 2011; Retirado y Legrá 2011). El mismo se ha desarrollado basado en la experiencia práctica

y la intuición de los trabajadores de las empresas niquelíferas y en algunos estudios empírico-teóricos realizados (Estenoz *et al.* 2005, 2007a y b; Retirado 2007; Retirado *et al.* 2007, 2008, 2009, 2010; Estenoz 2009), pero en la actualidad no se ha considerado la influencia que tiene la forma geométrica de la sección transversal de la pila en la densidad de radiación solar y la radiación total que incide en la superficie de secado. En trabajos precedentes se dedujeron los modelos matemáticos que permiten obtener el área de exposición y el volumen de las pilas de minerales con sección transversal semi-elíptica, hiperbólica, parabólica y triangular (Retirado y Legrá, 2011). Sin embargo, quedó por determinar la forma geométrica de la sección transversal de la pila que garantice que el área de exposición y el volumen de la misma sean suficientemente grandes y que la densidad de radiación y la radiación total que incide en la superficie de secado sea máxima para una superficie horizontal disponible. Lo anterior se puede obtener mediante la aplicación de procedimientos de optimización.

De lo anterior se infiere **como problema** de la investigación:

La necesidad de realizar la caracterización de la forma geométrica de la sección transversal de las pilas de menas lateríticas expuestas a secado natural que permita calcular, con la precisión requerida, el área de exposición y el volumen de las pilas; y otros parámetros necesarios para la optimización de dicha forma geométrica.

Como **objeto de estudio** se plantea:

El proceso de secado natural de las menas lateríticas almacenadas en forma de pilas.

Y su **campo de acción** es:

La optimización de la forma geométrica de la sección transversal de las pilas de menas lateríticas expuestas a secado natural.

Objetivo general del trabajo:

Desarrollar la optimización de la forma geométrica de la sección transversal de las pilas de menas lateríticas expuestas a secado natural, atendiendo al aprovechamiento de la energía térmica disponible para el proceso.

A partir del objetivo general declarado se establece la siguiente **hipótesis**:

La caracterización de las formas geométricas probables que puede asumir la sección transversal de las pilas de menas lateríticas expuestas a secado natural conjugada con la aplicación de procedimientos de optimización, permitirá optimizar dicha forma geométrica basada en cálculos precisos del área de exposición de la pila, el volumen de material expuesto a secado, la radiación solar global que llega a la superficie de secado y otros criterios de interés para la investigación.

Se declaran los siguientes **objetivos específicos** del trabajo:

- A.** Establecer el marco teórico de la investigación, a partir de la sistematización de la información encontrada en las investigaciones precedentes.
- B.** Exponer los modelos de los parámetros del proceso que son necesarios para la optimización de la forma geométrica de la sección transversal de las pilas.
- C.** Determinar la forma geométrica de la sección transversal de las pilas más racional en función de la energía térmica captada en la superficie de secado.

Para garantizar el cumplimiento de los objetivos se desarrollan las siguientes **tareas**:

- A.1-** Actualizar el estado del arte en relación con la temática del secado solar y el natural.
- A.2-** Establecer las características termofísicas de las menas lateríticas objeto de secado natural.
- B.3-** Exponer los modelos matemáticos de:
 - El área de exposición y el volumen de las pilas de minerales.
 - La radiación solar global que incide sobre la superficie de secado de las pilas.
 - Los flujos de calor transferidos por radiación, convección y conducción.
- B.4-** Establecer el procedimiento para la optimización de la forma geométrica de la sección transversal de las pilas de menas lateríticas.
- C.5-** Implementar los modelos y el procedimiento de optimización en una aplicación informática.
- C.6-** Establecer los gráficos de comportamiento obtenidos en la optimización de la forma geométrica de la sección transversal de las pilas.
- D.7-** Exponer los beneficios económicos y ambientales asociados a la implementación del secado natural en la empresa “Comandante René Ramos Latour”.

Capítulo 1

Marco teórico relacionado con los procesos de secado

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO RELACIONADO CON LOS PROCESOS DE SECADO

1.1- Introducción

El secado natural ha sido utilizado desde tiempos inmemorables para secar una gran variedad de productos. Sin embargo, para la producción a escala industrial este sistema presenta ciertas limitaciones (necesidades de grandes superficies, elevado costo de mano de obra y dificultades en el control del proceso). Entre las ventajas que presenta el secado natural, la más destacada se basa en la energía que utiliza, es decir, una fuente no contaminante, renovable y que puede utilizarse a escala local.

El **objetivo** del capítulo es establecer los fundamentos básicos necesarios para la optimización de la forma geométrica de la sección transversal de las pilas de menas lateríticas expuestas a secado natural, mediante el desarrollo del marco teórico de la investigación.

1.2- Estado del arte actual relacionado con las teorías de secado

Desde el punto de vista del desarrollo de las teorías que intentan explicar el transporte de la humedad en medios porosos, se han desarrollado diversos modelos matemáticos de secado. De acuerdo con los criterios expuestos por Hernández y Quinto (2005), entre los más difundidos se encuentran los modelos de difusión simultánea de vapor y líquido, los de transferencia simultánea de calor, masa y momentum (Whitaker, 1977) y los de termodinámica de procesos irreversibles (Likov, 1966; Kowalski, 1997).

Las diferentes teorías actualmente usadas para explicar la migración de la humedad durante el proceso de secado son ampliamente analizadas en la literaturas consultadas (Hernández y Quinto, 2003, 2005), a continuación se describen brevemente los principales aspectos de las diferentes teorías de secado.

La teoría de Philip y De Vries en esencia considera que la humedad se desplaza tanto por difusión como por capilaridad. Philip y De Vries (1957) derivaron un conjunto de ecuaciones que describen la transferencia de calor y masa en materiales porosos bajo los gradientes combinados de temperatura y humedad. Estos investigadores extendieron su modelo para mostrar separadamente los efectos de los componentes isotérmicos y térmicos de la transferencia de vapor. La limitación de esta teoría radica

en que las ecuaciones de los modelos sólo se usan para la llamada región capilar de la isoterma de sorción (primer período de secado), debido a que es, en dicho período, donde se mantiene en el medio poroso una película de humedad continua, en el interior de los poros.

La teoría de Krischer y Berger-Pei establece que durante el secado la humedad puede migrar en el estado líquido por capilaridad y en el estado de vapor por un gradiente de concentración de vapor (Krischer, 1963). Por su parte, Berger y Pei (1973) señalaron que las principales dificultades encontradas en el modelo de Krischer son la aplicación de la isoterma de sorción y el uso de las condiciones de frontera de primer tipo. Estos investigadores, a diferencia de Krischer (1963), emplearon las ecuaciones acopladas de la transferencia de calor y masa.

Las dos teorías anteriores (Philip y De Vries - Krischer y Berger-Pei) fueron los primeros intentos por lograr un modelo general del proceso de secado, donde se considera que la migración de la humedad se debe a más de un mecanismo.

La teoría de Likov considera que los flujos debido a la difusión de vapor y líquido están conformados por dos partes: una debida al gradiente de concentración de humedad total y la otra debido al gradiente de temperatura (Likov, 1966). Es una de las teorías más completas de las conocidas hasta la actualidad. Sin embargo, no ha sido muy aceptada dado a que no existe consenso entre los investigadores en cuanto a la validez y el significado del potencial de secado, introducido por Likov.

La teoría de Whitaker establece una serie de ecuaciones de conservación para un volumen promedio del sólido a partir de las ecuaciones de cada fase del proceso (Whitaker, 1977). Esta modelación general no difiere sustancialmente de la planteada por Likov (1966), pero debido a que tiene un buen sustento físico y matemático, ha tenido una buena aceptación entre los investigadores de la temática de secado, al grado de ser considerada como la mejor aproximación al estudio del secado en materiales porosos. En la actualidad, el modelo de Whitaker es el que se considera más completo y preciso para describir los fenómenos que ocurren durante el proceso de secado, a pesar de la imposibilidad de lograr una descripción exacta de un medio poroso real.

La teoría de Kowalski-Strumillo contiene un modelo integral de la transferencia simultánea de calor y masa, que considera todos los factores que intervienen en dicho

proceso (Kowalski y Strumillo, 1997), implica serios problemas para resolverse analíticamente, es por ello que en uno de sus trabajos sugirieron que podría establecerse un modelo más simple, con base en la termodinámica de los procesos irreversibles, tomando en cuenta la transferencia de calor y masa, así como la presencia de esfuerzos (Kowalski y Strumillo, 2001).

La incorporación de las ecuaciones de esfuerzo-deformación, a las de transferencia de calor y masa, constituye la novedad de esta teoría ya que con anterioridad casi todos los modelos de secado consideraban que el sólido no sufría deformaciones, lo que representa una simplificación para evitar llegar a un sistema de ecuaciones diferenciales prácticamente imposibles de resolver de forma analítica. La solución del sistema de ecuaciones generado permite conocer al mismo tiempo: contenido de humedad, temperatura, deformación y esfuerzo en los materiales durante el proceso de secado. Esta teoría es relativamente reciente, es por ello que no se conoce mucho sobre la validez de los resultados que se pueden obtener con la misma en su aplicación a diferentes materiales.

En general los modelos específicos establecidos en los trabajos precedentes constituyen modificaciones de los modelos generales que describen las distintas teorías de secado expuestas en este epígrafe.

1.3- Trabajos precedentes relacionados con el secado solar en Cuba

Ferro *et al.* (1999) realizan el análisis cinético del secado de café en diferentes instalaciones solares y demuestran que a pesar de las diferencias observadas entre las instalaciones solares evaluadas, el proceso de secado del café sigue esencialmente el mismo mecanismo cinético. Posteriormente Ferro *et al.* (2000) reportan los rendimientos térmicos de los diferentes secadores solares ensayados para el secado de café y realizan además un análisis energético y económico del proceso de secado del mencionado material. Para validar las propuestas tecnológicas solares comparan los resultados económicos del secado en las mismas, con los del proceso en secadores convencionales.

Fonseca *et al.* (2000) proponen la implementación de un secador de granos tipo tambor estableciendo una alternativa del secado solar para la disminución del tiempo de secado y la protección del producto de las condiciones climatológicas. En el Centro de

Investigaciones de Energía Solar (CIES) fue construido el secador y analizado térmicamente. El resultado del análisis muestra una distribución favorable de las áreas de captación y de pérdidas que permite pronosticar un buen funcionamiento térmico en el secado de granos.

Fonseca *et al.* (2002) presentan los resultados de las pruebas cinéticas de un secador solar con cubiertas de polietileno. Se experimentó con semillas de Maíz, Soya y Calabaza, obteniéndose resultados satisfactorios. De estas pruebas se pudo determinar que el secado de 3 kg/m²día de semillas en estos secadores es una solución alternativa económicamente viable para el secado de semillas en Cuba.

Bergues *et al.* (2002) muestran los resultados de las pruebas de un prototipo de secador solar de semillas con cubierta de polietileno negro con una superficie de 3 m². También exponen los índices de funcionamiento y el comportamiento económico comparativo con un secador eléctrico convencional. Un año después estos investigadores (Bergues *et al.*, 2003) realizan la evaluación térmica para tres variantes de un secador solar de bajo costo y determinan la variante más adecuada para el secado de semillas.

Griñán y Fonseca (2003) exponen aspectos técnicos del secado elaborados a partir de las experiencias de los autores obtenidas durante reiteradas prácticas de secado en un secador solar de madera de 12 m³ construido en el CIES y confeccionan una metodología que permite la aplicación de la tecnología solar para el secado de madera y otros materiales con características similares a los ensayados por estos investigadores.

Fonseca *et al.* (2003) analizan la factibilidad técnica y económica del secado solar de café pergamino en plazoletas de hormigón ennegrecidas y presentan de forma comparativa el estudio de la cinética del secado y la valoración económica del efecto de la plazoleta ennegrecida respecto a las convencionales.

Abdala *et al.* (2003) presentan los resultados experimentales de ensayos de secado de café en dos tipos de secadores solares: multipropósito y de tambor rotatorio, estudian la cinética del secado para diferentes niveles de carga, desde una humedad inicial igual a 50 % hasta una humedad final de 12 %, además comprobaron la calidad de las muestras secadas.

Bergues *et al.* (2006) describen y evalúan térmicamente un prototipo de secador solar adecuado para la agricultura urbana, concluyendo que los parámetros térmicos resultan apropiados para el secado de productos varios.

Pacheco *et al.* (2006) modelan el secado solar de madera y valoran la importancia que tiene determinar los perfiles de temperatura en muestras de madera sometidas al secado. Finalmente proponen la conducción transitoria del calor como el modo predominante en el proceso de secado y los modelos de Fourier-Kirchhoff y de Grever-Likov como solución.

Leyva *et al.* (2010) estudian el secado solar a la intemperie del Carbón mineral y verifican que la implementación del proceso provoca la reducción del contenido de humedad del material entre 8 y 13 %, lo cual genera el aumento de la eficiencia del secado convencional en el proceso productivo y la disminución de las emisiones de gases tóxicos.

Al analizar los trabajos relacionados con las teorías de secado y el secado solar se aprecia que varios de ellos están destinados a la modelación matemática del proceso, pero en Cuba predomina la tendencia a realizar balances térmicos a los secaderos, lo anterior conjugado con el hecho de que se estudian materiales diferentes al analizado en el presente trabajo permite concluir que las investigaciones consultadas no dan solución al problema planteado, por tanto se procede al estudio de los trabajos concernientes a las menas lateríticas.

1.3.1- Trabajos sobre el secado de las menas lateríticas

Miranda (1996) destaca la aplicación del método de reflexión neutrónica, para determinar la humedad de las distintas menas de los yacimientos lateríticos arrojando divergencias significativas respecto al método tradicional de diferencias de pesadas, por este motivo realizó análisis termogravimétricos, los cuales revelaron la existencia de fenómenos de descomposición de fases de minerales que no habían tenido tratamiento térmico previo.

Estenez y Espinosa (2003) exponen una valoración socio-económica y técnica de la implementación del secado solar natural y la homogenización en la explotación de menas lateríticas en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Destacándose que con la aplicación del proceso en la referida empresa se puede disminuir hasta el 24

% la humedad inicial de las menas, la cual en la actualidad es superior al 34 %, lo que generaría ahorros entre 14 y 17 millones de dólares anuales aproximadamente por la disminución de los consumos específicos de combustible y energía eléctrica durante el secado térmico convencional de las menas.

Aldana *et al.* (2004) analizan los problemas que limitan la productividad de los secaderos de menas lateríticas en la mencionada empresa, demostrando que la limitante fundamental es el aporte de calor y que se puede elevar la productividad a través del incremento del coeficiente de utilización de los secaderos y la disminución de la humedad usando el secado solar previo de las menas, aspecto al que se han referido otros investigadores (Estenoz, 2001; Retirado, 2007).

Estenoz *et al.* (2005) refieren que en Brasil la empresa Tocantín S.A maneja 2,4 millones de toneladas de minerales lateríticos en depósitos mineros de secado solar, para reducir la humedad del material en 4 % y elevar la homogenización de los flujos de salida de las minas a 75-78 grados. También expone que en Filipina la empresa Río Tuba Co trasiega en sus depósitos de secado solar alrededor de 2,9 millones de toneladas de minerales para reducir la humedad de entrega en 14 %, elevar los niveles de homogenización del mineral hasta 88-91 grados y ahorrar 9 millones de dólares por concepto de ahorro de petróleo. Sin embargo, no se reportan estudios relacionados con la modelación matemática del proceso.

Estenoz *et al.* (2006) realizan el diseño de una instalación de secado multipropósito para mantener la sucesión y sincronización de las operaciones tecnológicas a través de un sistema compuesto de almacenado, clasificación, homogenización, secado y estabilización de los flujos mínimos necesarios de los materiales iniciales para el abasto a la industria, de una mezcla homogénea durante un determinado período de tiempo, en el cual se ajusten las operaciones industriales necesarias para aumentar las ganancias específicas de la producción y reducir el impacto ambiental de la minería y la metalurgia.

Retirado *et al.* (2007) demuestran que con el secado solar natural solo es posible evaporar la humedad ligada mecánicamente a las menas debido a los bajos regímenes de temperatura que se generan en el proceso, realizan los experimentos con menas lateríticas expuestas a secado solar natural y obtienen la velocidad de secado para las

condiciones de intemperie. Otros resultados satisfactorios relacionados con el estudio experimental del proceso con lateritas son reportados por (Retirado *et al.*, 2008).

Estenoz (2009) muestra el efecto que tiene la preparación minera basada en el secado solar, la mezcla y homogenización en depósitos mineros a la intemperie, en el aumento de la producción de Ni + Co y las utilidades económicas de las empresas niquelíferas cubanas.

Retirado *et al.* (2009) establecen el comportamiento de la adherencia en menas lateríticas expuestas a secado solar natural, estudiaron experimentalmente dos pilas expuestas a condiciones ambientales naturales, de los resultados obtenidos concluyen que la adherencia de las menas no está determinada solamente por el contenido de humedad, sino además por su granulometría y el ángulo de inclinación de la superficie de contacto.

Espinosa y Pérez (2010) evalúan la factibilidad técnica de la implementación del secado solar natural y la homogenización de las menas lateríticas pertenecientes a la empresa Ferroníquel Minera S.A. Al analizar la variación del contenido de humedad del material comprobaron que se redujo entre 4,92 y 10,13 %. De lo anterior se infiere que las potencialidades energéticas de la región permite la aplicación del proceso objeto de estudio a otros materiales con características similares a las menas lateríticas procesadas actualmente.

Como se puede apreciar existe una amplia variedad en cuanto a las publicaciones relacionadas con el secado de materiales. En los trabajos consultados se estudian diferentes aspectos del proceso. Sin embargo, ninguno aborda la optimización del secado natural de las menas lateríticas.

1.4- Teoría básica relacionada con los procesos de secado

1.4.1- Clasificación de los sólidos húmedos objeto de secado

Según Likov (1968) los sólidos se clasifican en tres grandes grupos de acuerdo con sus propiedades físicas coloidales. Se distinguen así:

Los **cuerpos coloidales** los cuales al ser secados cambian apreciablemente sus dimensiones, aunque conservan sus propiedades elásticas. Es de este tipo de coloides la Gelatina.

Los **cuerpos capilaroporosos** se tornan frágiles, poco compresibles y pueden reducirse a polvo cuando son secados. Son materiales de este tipo el carbón vegetal y la arena de cuarzo.

Los **coloidales capilaroporosos** tienen capilares y pueden absorber cualquier líquido que los moje, independientemente de su composición química. Pertenecen a esta categoría la mayoría de los materiales que se someten al secado: turba, bagazo, cartón, cereales, café y otros.

En dependencia del tamaño de sus poros los materiales del segundo y tercer grupo pueden clasificarse en dos subgrupos: macrocapilaroporosos (no tienen microporos, ni poros de tamaño intermedio, su radio es mayor que 10^{-7} m) y microcapilaroporosos (no tienen macroporos, su radio es menor que 10^{-7} m). Aunque los materiales reales tienen frecuentemente una estructura combinada, las menas lateríticas sometidas a secado natural se clasifican como un material macrocapilaroporoso (Retirado, 2007).

1.4.2- Formas de enlace de la humedad con el material

El mecanismo del proceso de secado depende considerablemente de la forma de enlace de la humedad con el material, cuanto más sólido es dicho enlace, tanto más difícil transcurre el secado. Durante el proceso el enlace de la humedad con el material se altera (Rudenko y Shemajanov, 1989).

La clasificación más completa de las diferentes formas de ligarse la humedad con el material es la ofrecida por Kasatkin (1987), la cual está basada en los estudios de la intensidad de la energía de enlace desarrollados por Rebinder (1979). De acuerdo con la misma, existen tres tipos de humedad: de enlace químico, físico-químico y físico-mecánico. Aunque a este trabajo ofrece particular interés el último tipo de enlace a continuación se describen brevemente los tres.

La humedad ligada químicamente es la que se une con mayor solidez al material en determinadas proporciones y puede eliminarse sólo calentando el material hasta altas temperaturas o como resultado de una reacción química. La misma no puede ser eliminada del material por secado con regímenes de temperatura inferior a los 120 °C.

El enlace físico-químico une dos tipos de humedad que difieren por la solidez del enlace con el material: la humedad ligada osmóticamente y por adsorción. La primera llamada también humedad de hinchamiento, se encuentra dentro de las células del material y se

retiene por las fuerzas osmóticas. La segunda se retiene sólidamente sobre la superficie y en los poros del material. La humedad de adsorción requiere para su eliminación un gas con una energía considerablemente mayor que la utilizada para eliminar la humedad de hinchamiento. La existencia de estos tipos de humedad especialmente se manifiesta en poliméricos. Fundamentalmente la humedad contenida en los sólidos no es de carácter físico-químico y por eso su extracción durante el proceso de secado exige un consumo de energía igual al calor de evaporación.

Durante el secado se elimina, como regla, sólo la humedad enlazada con el material en forma físico-química y mecánica. La más fácil de eliminar resulta la enlazada mecánicamente que a su vez se subdivide en: humedad de los macrocapilares y microcapilares. Los macrocapilares se llenan de humedad durante el contacto directo del líquido con el material, mientras que en los microcapilares la humedad penetra tanto por contacto directo, como por la adsorción de la misma en el sólido. La humedad de los macrocapilares se elimina con facilidad no sólo por secado térmico, sino también empleando métodos mecánicos.

Con el secado solar se reduce sólo la humedad enlazada con las menas lateríticas de forma físico-mecánica. Esto se debe a que en el proceso no se puede eliminar completamente esta humedad en el material debido a que se trabaja con un bajo rango de temperatura ambiente que para las condiciones climatológicas de Moa oscila entre 12 y 36 °C aproximadamente.

1.4.3- Transferencia de calor y masa durante el secado

Un elemento fundamental en el proceso de secado es el estudio de la intensidad de la transferencia de masa. Para esto es necesario conocer los elementos más importantes de la transferencia de calor y masa que funcionan en el secado por contacto directo.

El intercambio de calor y masa depende de una serie de factores que van desde las condiciones externas a las internas.

Las condiciones externas están definidas por la resistencia a la transferencia de calor y masa de la capa límite del gas y en el caso que predominen, el secado no dependerá de las características del sólido, sino de las condiciones del gas y estará controlado por la transferencia de calor y masa entre el medio ambiente y la superficie del sólido,

empleándose en la evaporación todo el calor que se recibe del sol, la superficie de secado se comporta como una superficie libre de agua.

Las condiciones internas están definidas por la transferencia de calor y masa a través del sólido. En el caso que predominen, es decir que la resistencia a la transferencia de masa a través del material sea muy superior a la de la capa límite del ambiente, la difusión interna controlará el proceso y lo más importante serán las propiedades del sólido objeto de secado.

Independientemente del mecanismo de transmisión de calor el cual puede ser por conducción, convección y radiación o una combinación de cualquiera de estos, el calor tiene que pasar primero a la superficie exterior y desde esta al interior del sólido. Excepto el secado por electricidad de alta frecuencia, que genera el calor intercambiante, esto conduce a la circulación de calor desde el interior hasta la superficie exterior (Treybal, 1985).

En el secado por convección el sólido húmedo se pone en contacto con un gas caliente y el líquido de su superficie se vaporiza y difunde en el gas. En este caso el agente de secado cumple dos funciones: suministrar calor al material húmedo y transportar el vapor de agua desprendido (Boizán, 1991). En el secado por conducción el producto a secar se encuentra en recipientes calentados o se desplaza por encima de estos. El calor también se difunde en el sólido a través de la conductividad del propio sólido. En el secado por radiación el calor se transmite por las superficies radiantes mediante ondas electromagnéticas.

1.5- Aspectos sobre el secado natural de las menas lateríticas

El secado natural aplicado a las menas lateríticas hasta la actualidad se realiza a la intemperie en las minas y en la planta de preparación de mineral de las empresas productoras de níquel. Para su total comprensión es necesario establecer los parámetros más influyentes en el secado solar.

De acuerdo con el análisis realizado al proceso, la experiencia acumulada por los obreros de la planta de preparación de mineral y el estudio de los trabajos precedentes (Ramírez, 2006, Retirado, 2007; Retirado et al., 2007, 2008, 2009), se puede afirmar que la humedad final de las menas lateríticas depende fundamentalmente de los siguientes parámetros: humedad inicial del mineral, temperatura del medio ambiente,

humedad relativa, intensidad de la radiación solar, velocidad del viento y dirección predominante, temperatura del punto de rocío, precipitaciones, masa de mineral a secar, propiedades termofísicas del mineral, superficie de contacto, superficie horizontal disponible y tiempo de secado.

Características que debe cumplir el patio para el secado solar

- **Piso nivelado:** permite el secado uniforme del mineral y evita la formación de concentraciones de agua dentro del patio, durante el drenaje y escurrimiento de abundantes lluvias.
- **Drenaje:** debe ser eficiente, capaz de evacuar el agua en caso de lluvias, de lo contrario el secado será no uniforme y el mineral entrará con un elevado contenido de humedad al secadero.
- **Lejanía del agua y de los árboles:** el agua cerca aumenta la humedad relativa del entorno e influye en la humedad del material, los árboles contribuyen a la conservación de la humedad del entorno y refrescan la masa de aire caliente que circula en el patio.
- **Elevación:** evita las inundaciones en caso de lluvia e impide el bloqueo del viento.

1.5.1- Movimiento de la humedad en las pilas de lateritas

Cuando se produce la evaporación superficial, existe una migración de la humedad desde las profundidades del sólido hacia la superficie, la naturaleza del movimiento influye en el secado durante los períodos de caída del régimen, sin embargo aunque existen varias teorías que explican el movimiento de la humedad (difusión líquida, movimiento capilar, difusión de vapor y por presión) en las menas lateríticas de acuerdo con las fuentes bibliográficas consultadas (Treybal, 1985; Kasatkin, 1987) este desplazamiento se realiza a través del movimiento capilar, que es cuando la humedad no límite en sólidos granulares y porosos, se traslada a través de capilares e intersticios de los sólidos mediante un mecanismo que implica tensión superficial. Los capilares se extienden desde pequeños receptáculos de humedad dentro del sólido hasta la superficie de secado. A medida que se desarrolla el secado, al principio la humedad se traslada por capilaridad hacia la superficie con suficiente rapidez, siendo constante el régimen de secado. Los regímenes de temperatura satisfactorios para eliminar los

diferentes tipos de humedades pueden ser determinados mediante el análisis térmico diferencial del material.

1.6- Generalidades sobre los métodos de optimización

De acuerdo con la bibliografía consultada (Legrá y Silva, 2011) el *enfoque clásico* de la optimización plantea que un Problema de Optimización está dado por:

- Una función objetivo $z = f(x)$ donde X representa un conjunto de n variables independientes $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$.
- Un conjunto de k restricciones $G_i(x) \Re 0$, donde $i = 1, 2, \dots, k$ y además se cumple que la relación $\Re \in \{0, >, <, \leq, \geq\}$.
- La necesidad de encontrar un conjunto S de valores de X tales que satisfagan las relaciones $G_i(x)$ y se obtenga como resultado el valor máximo o mínimo de la función objetivo $f(x)$.

El *enfoque flexible* de la optimización y que se ajusta mejor a la diversidad de problemas que hoy día formulan los ingenieros asume que la tercera condición [el inciso “c”] se exprese como sigue:

La necesidad de encontrar un conjunto S de valores de X tales que satisfagan las relaciones $G_i(x)$ y que al evaluarlo en la función objetivo se obtenga como resultado un valor Z que esté por encima o por debajo de cierta cota de optimización (solución satisfactoria). Gráficamente estos enfoques de optimización se ilustran en la Figura 1.1.

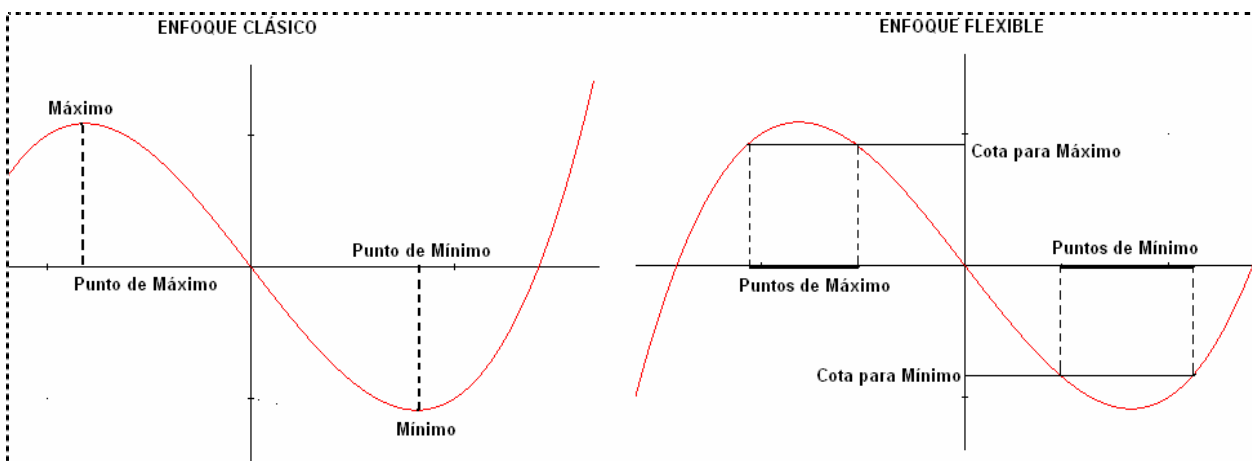


Figura 1.1. Enfoques de optimización empleados en las investigaciones tecnológicas.

En este trabajo se emplea el segundo enfoque de optimización (el enfoque flexible) debido a las características del parámetro del proceso que se desea optimizar y porque

brinda la posibilidad de encontrar un conjunto de soluciones factibles para la implementación práctica del objeto de estudio.

1.6.1- Métodos de optimización discreta más empleados

Aquí se exponen los métodos de optimización discreta que, en opinión de la fuente bibliográfica consultada (Arzola, 2000), han encontrado un mayor grado de aplicación en la solución de las tareas concretas. Se trata, en particular, de los métodos de búsqueda exhaustiva, acotaciones y ramificaciones; y la programación dinámica.

Método de búsqueda exhaustiva: dada su sencillez muchos autores no lo reconocen como un método de optimización. No obstante, precisamente esta sencillez puede facilitar su utilización en la solución de un gran número de tareas de optimización discreta, que conducen a la generación de subtareas las que, en gran parte de los casos, pueden hallar solución por este método.

Método de acotaciones y ramificaciones: es calificado por numerosos autores como el más universal de los métodos de la programación discreta, ha encontrado aplicaciones en la solución de un gran número de tareas. En particular, el método de acotaciones y ramificaciones puede utilizarse en la solución de tareas de optimización discreta a partir de esquemas conocidos de solución a tareas homologas, pero en variables continuas. Una aplicación muy extendida está dada por la solución a las tareas de la programación en enteros a partir del esquema de solución a las tareas de la programación lineal.

Método de la programación dinámica: con su ayuda se formula y soluciona una parte importante de las tareas de dirección de pasos múltiples, es decir, de las tareas dinámicas de dirección discreta.

1.6.2- Particularidades del método de búsqueda exhaustiva

El método de búsqueda exhaustiva se utiliza en la solución de tareas de optimización discreta, que se caracterizan por tener un pequeño número de posibles soluciones razonables pequeño. En la práctica pueden ser utilizados cuando la cantidad de posibles soluciones no superan algunos miles de variables posibles. Por supuesto, la distensión de las tareas que pueden ser solucionadas por este método, depende de la

velocidad de procesamiento de los medios computacionales de que se dispongan y del tiempo disponible para procesar la información. Los modelos matemáticos de la tarea de dirección tienen la forma general.

$$\min_{x \in D} f(x_1, \dots, x_n)$$

$$g_1(x_1, \dots, x_n) \geq 0$$

$$g_2(x_1, \dots, x_n) \geq 0$$

$$g_m(x_1, \dots, x_n) \geq 0$$

Donde:

x : Vector que incluye las variables de decisión (x_1, \dots, x_n) .

$f(x)$, $g_j(x)$: Indicadores de calidad de funcionamiento del sistema [$j = (1, \dots, m)$].

D : Conjunto de definición de x .

El vector x pertenecen a un conjunto discreto, es decir, sus componentes pueden adoptar valores entre los cuales no existe relación de continuidad. Un ejemplo de conjunto discreto lo constituye el conjunto de los números enteros.

El método consiste en el cálculo de $f(x)$ y $g_j(x)$ para cada $x \in D$, la eliminación de los valores de x que no satisfagan al menos una de las restricciones $g_j(x) \geq 0$, el ordenamiento de menor a mayor de los valores de $f(x)$ obtenidos para los diferentes valores admisibles (que satisfacen todas las restricciones) de x . La variable que quede como primera en el arreglo correspondiente será solución óptima.

El algoritmo del método se presenta en la Figura 1.2a, donde v_t es el número total de posibles variantes (vectores x) en la tarea concreta.

Con frecuencia se requiere hallar no solo la solución óptima, sino la k mejores soluciones. En este caso la salida contendría:

$$x_j(L), (j = 1, \dots, n; L = 1, \dots, K);$$

$$f(L), (L = 1, \dots, K);$$

$$g_j(L), (j = 1, \dots, m; L = 1, \dots, K),$$

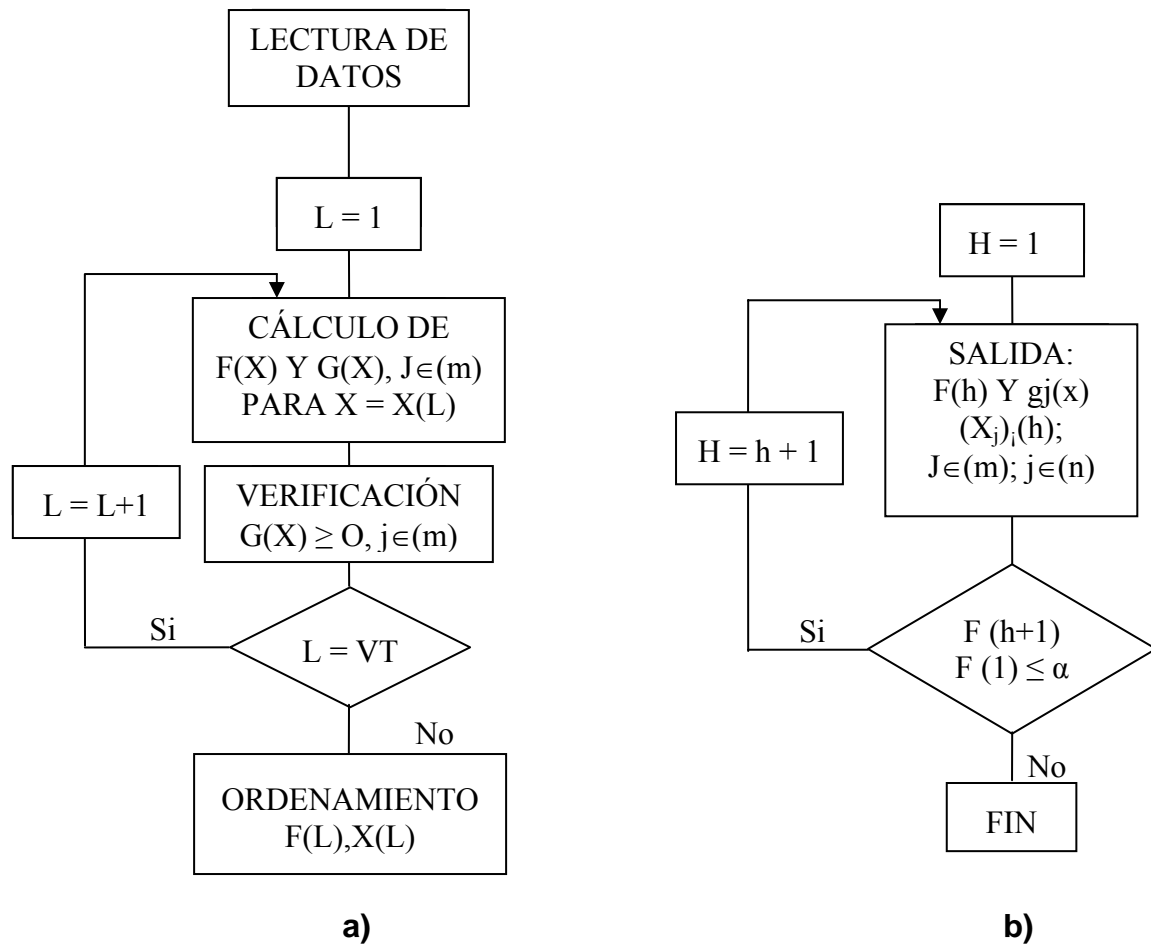


Figura1.2. Algoritmos específicos del método de búsqueda exhaustiva.

a) algoritmo general; b) algoritmo para la generación de soluciones óptimas.

Aquí, L se considera el contador de variables, por lo que a cada L está asociada una combinación concreta de la variable x_j .

En otros casos se requiere conocer todas aquellas soluciones que se diferencian de la mejor en no más de un parámetro α . En este caso al algoritmo de la Figura 1.2a se le añade el algoritmo que se ilustra en la Figura 1.2b.

El método de búsqueda exhaustiva resulta de gran utilidad en tareas cuya complejidad de descripción hace inaplicables otros esquemas, y se caracteriza por tener un número no excesivo de posibles soluciones.

1.7- Conclusiones del capítulo 1

- La literatura científica recoge múltiples teorías de secado que explican el transporte de la humedad los materiales porosos. Sin embargo, las teorías más completas para la descripción del proceso de secado son aquellas que consideran que la migración de la humedad se debe a más de un mecanismo físico.
- El desarrollo del marco teórico de la investigación permitió establecer los fundamentos necesarios para el estudio del proceso de secado natural de las menas lateríticas y posibilitó la clasificación del sólido investigado que permite predecir el comportamiento del mecanismo de secado en correspondencia con sus propiedades físicas y el tipo de humedad contenida.
- En las investigaciones tecnológicas que se desarrollan en el área de las ingenierías se emplean diversos métodos de optimización discreta, los más difundidos son los denominados: búsqueda exhaustiva, acotaciones y ramificaciones, y programación dinámica. La selección del método a utilizar debe considerar, entre otros aspectos, las características específicas del objeto de estudio y los resultados que se desean obtener en el proceso de optimización.

Capítulo 2

Procedimiento para el cálculo de los parámetros necesarios para la optimización de la forma geométrica de la sección transversal de las pilas de minerales.

CAPÍTULO 2

PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS NECESARIOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA FORMA GEOMÉTRICA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LAS PILAS DE MINERALES

2.1- Introducción

La optimización de la geometría de la sección transversal de las pilas de menas lateríticas expuestas a secado natural es una tarea compleja, por cuanto, se deben determinar los parámetros del proceso que determinan la captación de la energía solar en la superficie de secado de las pilas de minerales. Teniendo en cuenta lo anterior se declara como **objetivo** del capítulo establecer el procedimiento que posibilite el cálculo de los referidos parámetros.

2.2- Ángulo de reposo de las pilas y geometría de su sección transversal

2.2.1- Procedimiento para determinar el ángulo de reposo

El ángulo de reposo caracteriza el grado de intermovilidad de las partículas que conforman a los minerales lateríticos. Es el ángulo que la superficie lateral de la pila de minerales forma con una superficie horizontal plana (Sierra, 2010). El mismo se obtiene introduciendo una muestra de menas lateríticas sin apilar dentro un cilindro hueco colocado sobre una superficie horizontal, luego se desplaza el cilindro verticalmente y las partículas de mineral se distribuyen por la generatriz de un sólido en revolución formando una pila (ver Figura 2.1).

De acuerdo con las investigaciones precedentes consultadas (Ricaurte y Legrá 2010; Sierra, 2010) el ángulo de reposo de las menas lateríticas puede ser medido de dos formas:

1. Tomando como lados la superficie horizontal y la línea que une el punto más alto de la pila de minerales. A este ángulo se le denomina ángulo maximal (φ_m).
2. Tomando como lados la superficie horizontal y la línea tangente a la superficie lateral en la dirección del punto más alto de la pila. A este ángulo se le denomina ángulo tangencial (φ_t).

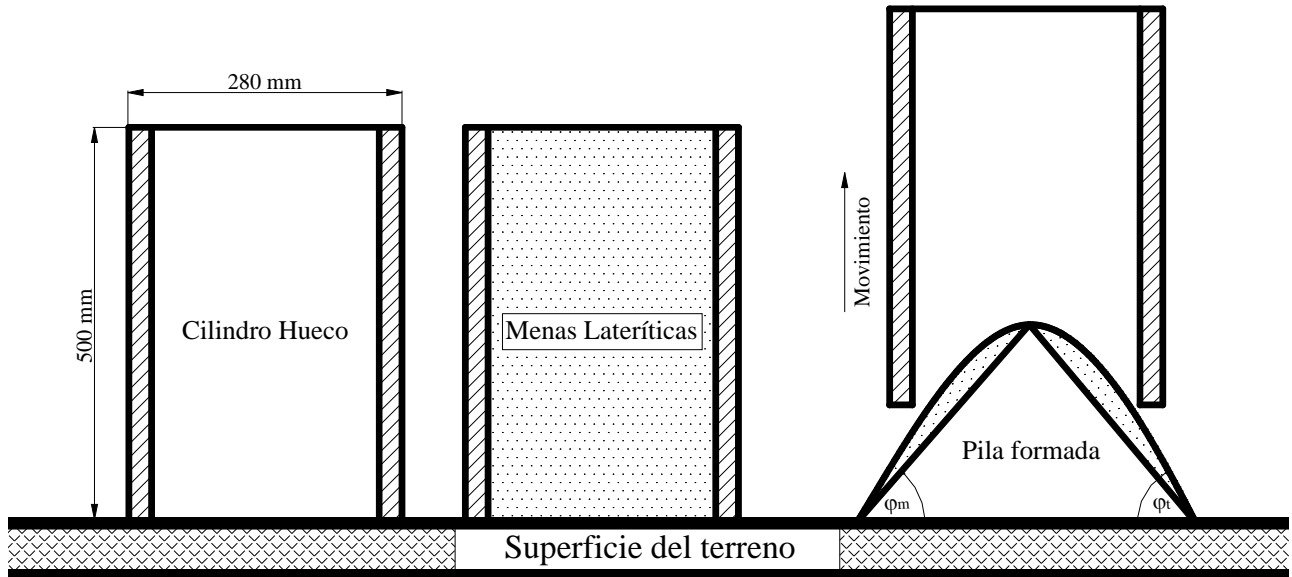


Figura 2.1. Representación de los ángulos maximal (φ_m) y tangencial (φ_t) que se obtienen durante la formación de las pilas de menas lateríticas.

Fuente: Sierra, 2010 (Modificado por el autor del presente trabajo).

2.2.2- Caracterización de la geometría de la sección transversal

La geometría de la sección transversal que adquiere una pila de menas lateríticas al ser depositada depende de los ángulos maximal y tangencial. Según la fuente consultada (Ricaurte y Legrá, 2010) deben verificarse las condiciones siguientes:

$$\varphi_m < \varphi_t \text{ y } \varphi_t \approx 90^\circ \quad [\text{sección transversal semi-elíptica}] \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \varphi_m \gg \varphi_t \text{ y se asume que} \\ \varphi_m - \varphi_t > 60^\circ \end{aligned} \quad [\text{sección transversal hiperbólica}] \quad (2.2)$$

$$\varphi_m > \varphi_t \text{ pero } \varphi_m - \varphi_t \leq 60^\circ \quad [\text{sección transversal parabólica}] \quad (2.3)$$

$$\varphi_m = \varphi_t \quad [\text{sección transversal triangular}] \quad (2.4)$$

Donde:

φ_m : ángulo maximal de la pila; grados sexagesimales.

φ_t : ángulo tangencial de la pila; grados sexagesimales.

2.3- Área de exposición y volumen de las pilas de menas lateríticas

En las investigaciones que abordan la modelación matemática del proceso de secado solar (Sogari y Saravia, 2003; Celma *et al.*, 2004; Salinas *et al.*, 2004; Jain, 2005; Ribeiro, 2005; Sacilik *et al.*, 2005; Fayett, 2008; Hernández *et al.*, 2008; Montes *et al.*, 2008; Morsetto *et al.*, 2008; Salinas *et al.*, 2008; Ferreira y Costa, 2009) por lo general se calcula el área de exposición y el volumen para las geometrías más frecuentes, en función de la geometría del recipiente que contiene el material que se desea secar y no como una función de las propiedades del material.

En el caso particular de las menas lateríticas cubanas el secado natural se realiza almacenando el material a la intemperie en pilas de diversas configuraciones geométricas de su sección transversal (Estenoz *et al.*, 2007a y b; Retirado *et al.*, 2011; Vinardell, 2011). Debido a esto, las ecuaciones clásicas que se emplean en el cálculo del área de exposición y del volumen para las geometrías cuadradas, rectangulares y cilíndricas no pueden ser aplicadas al mencionado proceso. Se requiere, entonces, modelar el área de exposición y el volumen de las pilas de menas lateríticas con geometría de su sección transversal semi-elíptica, hiperbólica, parabólica y triangular.

Para obtener el área de exposición y el volumen de una pila de lateritas se tienen en cuenta las áreas laterales y frontales presentes en la misma. De forma general se puede establecer la expresión 2.5 para el cálculo del área de una pila de minerales con simetría axial.

$$A = 2 \cdot A_{SL} + A_{SF} \quad (2.5)$$

Los parámetros A_{SL} y A_{SF} se calculan por las ecuaciones 2.6 y 2.7 (Stewart, 2009).

$$A_{SL} = 2 \cdot L_{SL} \cdot \int_0^{bo/2} \sqrt{1 + [f'(x)]^2} dx \quad (2.6)$$

$$A_{SF} = 2\pi \cdot \int_0^{bo/2} x \cdot \sqrt{1 + [f'(x)]^2} dx \quad (2.7)$$

Donde:

A : área de exposición de la pila; m^2 .

A_{SL} : área de la superficie lateral de la pila; m^2 .

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

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

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

A_{SF} : área de la superficie frontal de la pila; m^2 .

Luego, el área de exposición de la pila de minerales (A) se obtiene sumando las dos áreas anteriores (A_{SL} y A_{SF}) y resulta:

$$A = 2 \cdot L_{SL} \cdot \int_0^{b_o/2} \sqrt{1 + [f'(x)]^2} dx + 2\pi \cdot \int_0^{b_o/2} x \cdot \sqrt{1 + [f'(x)]^2} dx \quad (2.8)$$

Después de algunas transformaciones la ecuación 2.8 puede ser escrita de cómo sigue:

$$A = 2 \cdot \int_0^{b_o/2} [L_{SL} + \pi \cdot x] \cdot \sqrt{1 + [f'(x)]^2} dx \quad (2.9)$$

El volumen de las pilas de menas lateríticas se calcula por la ecuación 2.10, mientras que los volúmenes de la superficies lateral y frontales se determinan por las expresiones 2.11 y 2.12, respectivamente (Stewart, 2009).

$$V = V_{SL} + V_{SF} \quad (2.10)$$

Siendo:

$$V_{SL} = A_{STSL} \cdot L_{SL} \quad (2.11)$$

$$V_{SF} = 2\pi \cdot \int_0^{b_o/2} x \cdot f(x) dx \quad (2.12)$$

Donde:

V : volumen de la pila; m^3 .

V_{SL} : volumen de la superficie lateral de la pila; m^3 .

V_{SF} : volumen de la superficie frontal de la pila; m^3 .

A_{STSL} : área de la sección transversal de la superficie lateral; m^2 .

2.3.1- Pilas de sección transversal semi-elíptica

Para el cálculo del área de exposición y el volumen de las pilas de menas lateríticas que tienen la geometría de su sección transversal semi-elíptica (Figura 2.2) se emplean las expresiones 2.13 y 2.14.

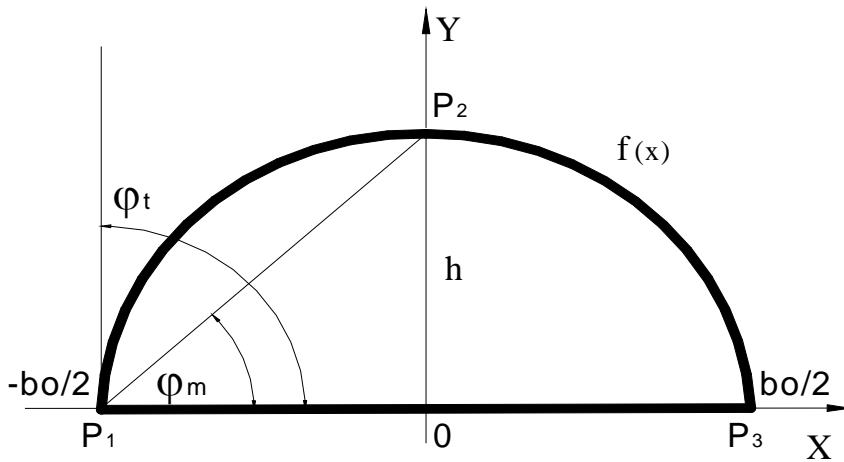


Figura 2.2. Vista frontal de una pila de sección transversal semi-elíptica.

$$A = 2 \cdot \int_0^{bo/2} [L_{SL} + \pi \cdot x] \cdot \sqrt{1 + \frac{-x \cdot \tan(\varphi_m)}{\sqrt{\left(\frac{b_o}{2}\right)^2 - x^2}}} dx \quad (2.13)$$

$$V = b_o^2 \cdot \frac{\pi}{8} \cdot \tan(\varphi_m) \cdot L_{SL} + 2\pi \cdot \int_0^{bo/2} x \cdot \left\{ \left[\left(\frac{b_o}{2}\right)^2 - x^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \tan(\varphi_m) \right\} dx \quad (2.14)$$

2.3.2- Pilas de sección transversal hiperbólica

Para el cálculo del área de exposición y el volumen de las pilas de menas lateríticas que tienen la geometría de su sección transversal hiperbólica (Figura 2.3) se emplean las expresiones 2.15 y 2.16.

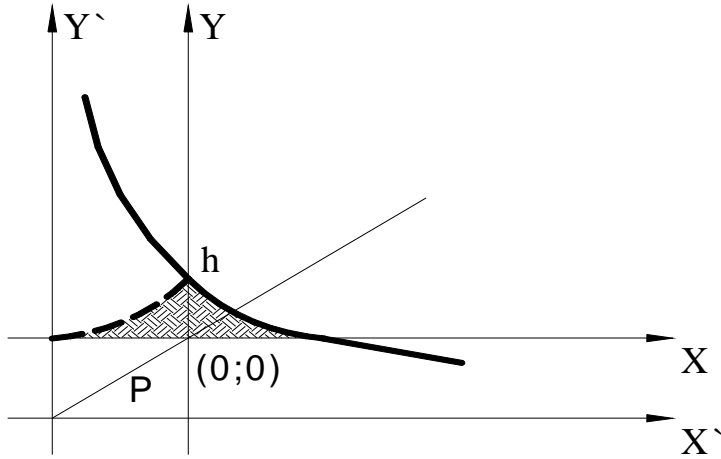


Figura 2.3. Vista frontal de una pila de sección transversal hiperbólica.

$$A = 2 \cdot \int_0^{b_o/2} [L_{SL} + \pi \cdot x] \cdot \sqrt{1 + \frac{\left[\frac{\frac{b_o}{2} \cdot \tan(\varphi_m)}{\tan(\varphi_m) - \tan(\varphi_t)} \right]^2 \cdot \tan(\varphi_t)}{\left(x + \frac{\frac{b_o}{2} \cdot \tan(\varphi_m)}{\tan(\varphi_m) - \tan(\varphi_t)} \right)^2}} dx \quad (2.15)$$

$$V = b_o^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left\{ \frac{\tan^2(\varphi_m) \cdot \tan(\varphi_t)}{[\tan(\varphi_m) - \tan(\varphi_t)]^2} \cdot \ln \left[\frac{\tan(\varphi_m)}{\tan(\varphi_t)} \right] - \frac{\tan(\varphi_m) \cdot \tan(\varphi_t)}{\tan(\varphi_m) - \tan(\varphi_t)} \right\} \cdot L_{SL} +$$

$$+ 2\pi \cdot \int_0^{b_o/2} x \cdot \left[\frac{\left[\frac{\frac{b_o}{2} \cdot \tan(\varphi_m)}{\tan(\varphi_m) - \tan(\varphi_t)} \right]^2 \cdot \tan(\varphi_t)}{\left(x + \frac{\frac{b_o}{2} \cdot \tan(\varphi_m)}{\tan(\varphi_m) - \tan(\varphi_t)} \right)} - \frac{\frac{b_o}{2} \cdot \tan(\varphi_m) \cdot \tan(\varphi_t)}{\tan(\varphi_m) - \tan(\varphi_t)} \right] dx \quad (2.16)$$

Los valores de φ_m y φ_t , cuando se trata de los ángulos de reposo, se determinan en función de la granulometría (G) y la humedad (H) de las menas lateríticas cubanas, para ello se emplean las ecuaciones empíricas 2.17 y 2.18. Estas expresiones fueron

propuestas por Sierra (2010) y posteriormente utilizadas con éxito por Retirado (2012) en la modelación matemática del proceso investigado.

$$\varphi_m = 30,58 - 0,4592 \cdot G - 0,00496 \cdot G \cdot H + 0,00651 \cdot G^2 + 0,01109 \cdot H^2 \quad (2.17)$$

$$\varphi_t = 33,25 - 0,505 \cdot G - 0,0025 \cdot G \cdot H + 0,0062 \cdot G^2 + 0,008 \cdot H^2 \quad (2.18)$$

Verificándose que:

$$5 \text{ mm} \leq G \leq 78 \text{ mm} \quad \text{y} \quad 26\% \leq H \leq 42\% \quad (2.19)$$

Donde:

G : granulometría promedio de las menas lateríticas; mm.

H : humedad promedio de las menas lateríticas; %.

2.3.3- Pilas de sección transversal parabólica

Para el cálculo del área de exposición y el volumen de las pilas de menas lateríticas que tienen la geometría de su sección transversal parabólica (Figura 2.4) se emplean las expresiones 2.20 y 2.21.

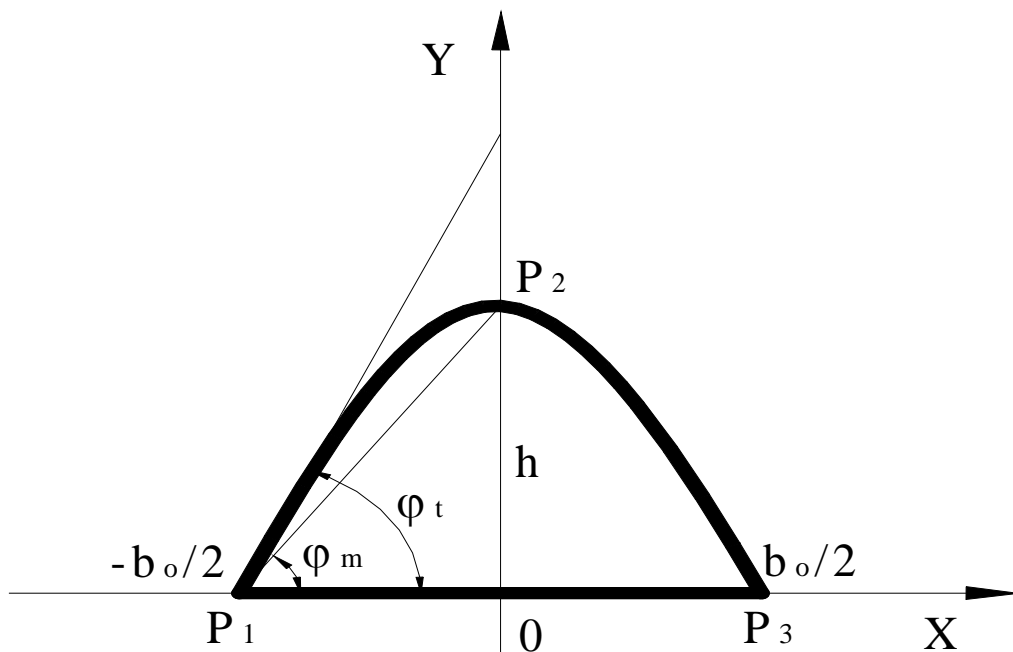


Figura 2.4. Vista frontal de una pila de sección transversal parabólica.

$$A = 2 \cdot \int_0^{b_o/2} [L_{SL} + \pi \cdot x] \cdot \sqrt{1 + \left(-\frac{\tan(\varphi_t)}{\tan(\varphi_m)} \cdot \frac{\tan(\varphi_m)}{\left(\frac{b_o}{2}\right)^{\tan(\varphi_m)-1}} x^{\tan(\varphi_m)-1} \right)^2} dx \quad (2.20)$$

$$V = b_o^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\frac{\tan(\varphi_t)}{\tan(\varphi_m)}}{\frac{\tan(\varphi_t)}{\tan(\varphi_m)} + 1} \right) \cdot \tan(\varphi_m) \cdot L_{SL} + \quad (2.21)$$

$$+ 2\pi \cdot \int_0^{b_o/2} x \cdot \left(-\frac{\tan(\varphi_m)}{\left(\frac{b_o}{2}\right)^{\tan(\varphi_m)-1}} x^{\tan(\varphi_m)-1} + \left(\frac{b_o}{2}\right) \cdot \tan(\varphi_m) \right) dx$$

2.3.4- Pilas de sección transversal triangular

Para el cálculo del área de exposición y el volumen de las pilas de menas lateríticas que tienen la geometría de su sección transversal triangulares (Figura 2.5) se emplean las expresiones 2.22 y 2.23.

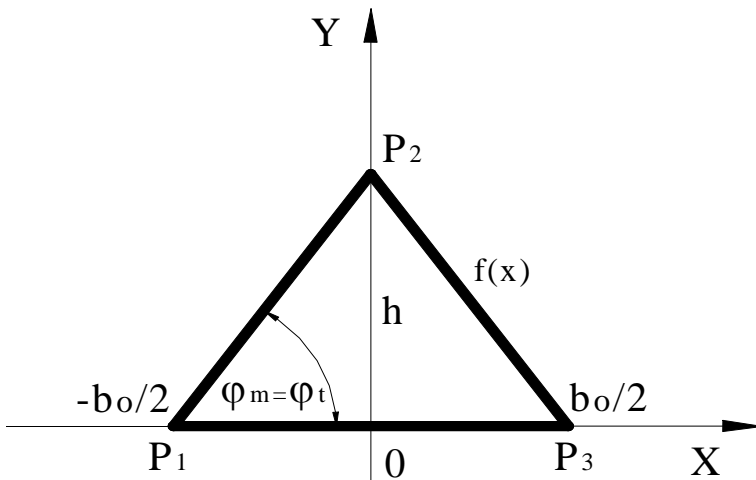


Figura 2.5. Vista frontal de una pila de sección transversal triangular.

$$A = 2 \cdot \int_0^{b_o/2} [L_{SL} + \pi \cdot x] \cdot \sqrt{1 + [-\tan(\varphi_m)]^2} dx \quad (2.22)$$

$$V = b_o^2 \cdot \frac{1}{4} \cdot \tan(\varphi_m) \cdot L_{SL} + 2\pi \cdot \int_0^{b_o/2} x \cdot \left[\frac{b_o}{2} \cdot \tan(\varphi_m) \cdot \left(1 - \frac{2x}{b_o} \right) \right] dx \quad (2.23)$$

2.4- Flujos de calor transferidos durante el proceso de secado natural

2.4.1- Flujo de calor por radiación

Para determinar el flujo de calor por radiación que recibe la pila de menas lateríticas se realiza el balance de energía en la superficie de secado de la misma y se obtiene la expresión 2.24.

$$Q_{Rad} = \alpha_c \cdot G_c + \alpha_s \cdot I(\varphi, \psi) - \vartheta \cdot I(\varphi, \psi) = \alpha_c \cdot G_c + (\alpha_s - \vartheta) \cdot I(\varphi, \psi) \quad (2.24)$$

Donde:

α_c : absortividad del cielo; adimensional.

G_c : irradiación del cielo; W/m^2 .

α_s : absortividad solar de las menas lateríticas; adimensional.

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

ϑ : reflectividad de las menas lateríticas; adimensional.

La irradiación del cielo debido a la emisión atmosférica se calcula por la expresión 2.25 recomendada por Anderson (1982).

$$G_c = \sigma \cdot T_{cielo}^4 \quad (2.25)$$

Donde:

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

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

El valor de la temperatura efectiva del cielo depende de las condiciones atmosféricas, la misma varía desde 230 K para un cielo claro y frío hasta 285 K aproximadamente, para condiciones nubladas y calientes. La misma puede ser estimada en función de la temperatura del aire, según la expresión 2.26 propuesta por Duffie y Beckman (1991).

$$T_{cielo} = 0,0552 \cdot T_a^{1,5} \quad (2.26)$$

2.4.1.1- Radiación global que incide en la superficie de la pila

Para calcular la radiación solar global $[I(\varphi, \psi)]$ que incide sobre la superficie de secado de la pila de minerales la cual está inclinada y orientada en φ y ψ grados, se emplea la expresión 2.27, nótese que esta expresión depende del ángulo φ . En el caso de las pilas de sección transversal parabólica el ángulo de referencia para el cálculo es el tangencial (φ_t) y para las pilas de sección transversal triangular se considera para el cálculo el ángulo maximal (φ_m).

$$I(\varphi, \psi) = I_H \cdot \left[(1 - C_e) \cdot R(\varphi, \psi) + C_e \cdot \frac{1 + \cos(\varphi)}{2} + \frac{1 - \cos(\varphi)}{2} \cdot \eta \right] \quad (2.27)$$

Siendo:

$$R(\varphi, \psi) = \frac{\text{sen}(\delta_s) \cdot \text{sen}(l_a - \varphi) + \cos(\delta_s) \cdot \cos(l_a - \varphi) \cdot \cos(w_h)}{\text{sen}(\delta_s) \cdot \text{sen}(l_a) + \cos(\delta_s) \cdot \cos(l_a) \cdot \cos(w_h)} \quad (2.28)$$

Donde:

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

C_e : coeficiente empírico, adimensional.

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

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

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

η : reflectividad del suelo frente al plano receptor, habitualmente oscila entre 0,17 y 0,2.

δ_s : declinación solar; grados sexagesimales.

l_a : latitud; grados sexagesimales.

w_h : ángulo horario; grados sexagesimales.

Luego la expresión apropiada para el cálculo del flujo de calor por radiación que recibe la superficie de secado de la pila de minerales lo constituye la ecuación 2.29, la misma se obtiene sustituyendo las expresiones 2.25 y 2.27 en la 2.24.

$$Q_{Rad} = \alpha_c \cdot \sigma(T_{cielo})^4 + (\alpha_s - g) \cdot I_H \left[(1 - C_e) \cdot R(\varphi, \psi) + C_e \cdot \frac{1 + \cos(\varphi)}{2} + \frac{1 - \cos(\varphi)}{2} \cdot \eta \right] \quad (2.29)$$

2.4.2- Flujo de calor por convección

El flujo de calor por convección que intercambian la superficie de la pila y el aire se determina, según la ley de Newton-Richman, por la expresión 2.30 (Kaviani, 1994; Incropera y De Witt, 2003).

$$Q_{Conv} = h_a \cdot (T_s - T_a) \quad (2.30)$$

Donde:

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

T_s : temperatura de la superficie de secado; K .

T_a : temperatura del aire; K .

La literatura internacional reporta diversas investigaciones encaminadas a determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección durante el secado solar de diferentes materiales (Jain y Tiwari, 2003, 2004; Tiwari *et al.*, 2004; Kumar y Tiwari, 2006). En general los modelos obtenidos para el cálculo del coeficiente convectivo constituyen adaptaciones del modelo reportado por Kumar y Tiwari (1996).

En el presente trabajo el coeficiente de transferencia de calor por convección (h_a) se determina por la expresión 2.31 (Incropera y De Witt, 1999, 2003), para ello se calcula el número de Nusselt (Nu) en función del tipo de convección predominante durante la implementación del proceso.

$$h_a = \frac{Nu \cdot k_a}{L} \quad (2.31)$$

Donde:

Nu : número de Nusselt; adimensional.

k_a : conductividad térmica del aire; $W/m \cdot K$.

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

Debido a que el secado solar de las menas lateríticas se desarrolla a la intemperie, el material intercambia calor con el aire en condiciones naturales, en estas circunstancias el intercambio de calor se produce por convección libre, forzada y mixta (Retirado *et al.*, 2011).

Para calcular el número de Nusselt en la convección libre (Nu_L) Tiwari y Sarkar (2006) recomiendan la expresión 2.32. En la misma las propiedades termofísicas del aire se determinan a la temperatura promedio.

$$Nu_L = 0,56 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}} = 0,56 \cdot (Ra)^{\frac{1}{4}} \quad (2.32)$$

Donde:

Nu_L : número de Nusselt para la convección libre; adimensional.

Gr : número de Grashof; adimensional.

Pr : número de Prandtl del aire; adimensional.

Ra : número de Rayleigh; adimensional.

Para determinar el número de Nusselt (Nu_F) cuando predomina la convección forzada (caso más frecuente en la implementación práctica del proceso) se tiene en cuenta que el Nu_F es función de los números de Reynolds, Prandtl y Gujman, según la expresión 2.33 reportada por Kasatkin (1987).

$$Nu_F = 2 + \frac{1}{40} \cdot (Re)^{\frac{9}{10}} \cdot (Pr)^{\frac{1}{3}} \cdot (Gu)^{\frac{2}{15}} \quad (2.33)$$

Donde:

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

Re : número de Reynolds; adimensional.

Gu : número de Gujman; adimensional.

Cuando predomina la convección mixta o mezclada el número de Nusselt (Nu_M) puede ser determinado por la expresión 2.34, la misma fue propuesta por Churchill (1983) y posteriormente ha sido recomendada por Incropera y De Witt (1999, 2003). El signo positivo se aplica al flujo transversal y el negativo al flujo opuesto.

$$Nu_M = \left\{ \left[2 + 0,025 \cdot Re^{\frac{9}{10}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot Gu^{\frac{2}{15}} \right]^3 \pm \left[0,56 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}} \right]^3 \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (2.34)$$

Donde:

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

Sustituyendo la expresión 2.31 en la 2.30 se obtiene la expresión general para el cálculo del flujo de calor por convección (ecuación 2.35). En la misma se debe sustituir la expresión del número de Nusselt (2.32; 2.33 o 2.34) en función del tipo de convección predominante.

$$Q_{Conv} = \frac{Nu \cdot k_a}{L} \cdot (T_s - T_a) \quad (2.35)$$

2.4.3- Flujo de calor por conducción

El calor que se transfiere por conducción desde la superficie de secado hacia el interior de la pila de minerales se calcula aplicando la Ley de Fourier (expresión 2.36), la misma ha sido reportada en diferentes literaturas (Edwards y Penney, 1994; Incropera y De Witt, 1999, 2003).

$$Q_{Cond} = -k \cdot \frac{T_s(\tau) - T(y, \tau)}{y} \quad (2.36)$$

Donde:

k : conductividad térmica de las menas lateríticas; W/m·K.

$T_s(\tau)$: temperatura en la superficie de la pila de minerales en el instante τ (para $y = l$); K.

$T(y, \tau)$: temperatura en el interior de la pila a la distancia “ y ” en el instante τ ; K.

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

La temperatura en la superficie de la pila de minerales [$T_s(\tau)$] se calcula como una función de la radiación solar global [$I(\varphi, \psi)$], la cual varía con la inclinación de la superficie (φ), el tiempo (τ), el ángulo de incidencia (ϕ) y la altura solar (h_s), para este propósito se emplea la expresión 2.37.

$$\varepsilon \cdot \sigma [T_s(\tau)]^4 + h_a \cdot T_s(\tau) - \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_a^4 - h_a \cdot T_a - \left[\alpha_c \cdot \sigma (0,0552 \cdot T_a^{1,5})^4 + (\alpha_s - \vartheta) \cdot I(\varphi, \psi) \right] = 0 \quad (2.37)$$

La temperatura de las menas lateríticas en el interior de la pila de minerales a la distancia “y” en el instante τ [$T(y,\tau)$] se determina obteniendo la distribución de temperatura en la pila, para ello es necesario resolver la ecuación de difusión del calor (expresión 2.38).

2.4.3.1- Distribución de temperatura en la pila

La expresión que caracteriza la distribución de temperatura [$T(y,\tau)$] de cada sección del corte se obtiene considerando que la conducción del calor transitoria cumple las condiciones del primer problema general de contorno definido por Tijonov y Samarsky (1980), para ello se emplea la ecuación 2.38 con las condiciones iniciales y frontera representadas en el sistema 2.39.

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} - \alpha \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = f(y,\tau) \tag{2.38}$$

$$f(y,\tau) = 0; \varphi(y) = T_0; \mu_1(\tau) = T_0 \text{ y } \mu_2(\tau) = T_s(\tau) \tag{2.39}$$

Donde:

α : difusividad térmica de las menas lateríticas; m^2/s .

T_0 : temperatura inicial de las menas lateríticas; $^{\circ}C$.

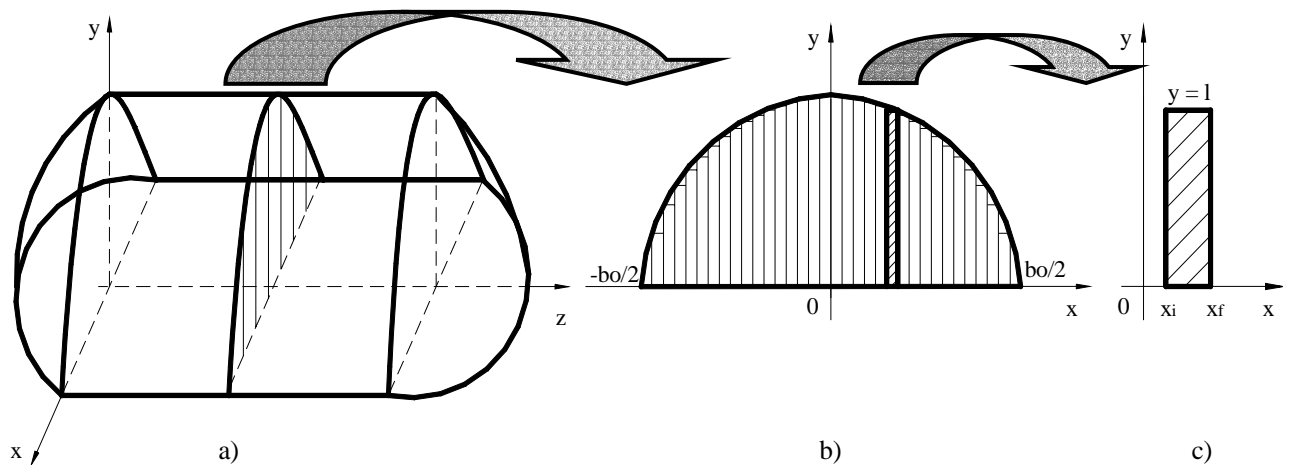


Figura 2.6. Esquema para el análisis de la distribución de temperatura y humedad.

a): Pila de mineral; b): Corte de la sección transversal; c): Sección analizada en el corte.

Para emplear este enfoque es necesario discretizar el problema de la distribución de temperatura 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 2.6.

Para resolver la ecuación 2.38 con las condiciones representadas en 2.39 se aplica el método de separación de variables y se obtiene según Retirado (2012):

$$T(y, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} 2 \frac{\cos(n\pi)}{n\pi} \cdot e^{\alpha \cdot \left(\frac{-n\pi}{l}\right)^2 \cdot \tau} \left[\int_0^{\tau} e^{\alpha \cdot \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \cdot \theta} \cdot \frac{dT_s(\theta)}{d\tau} d\theta + T_s(0) - T_0 \right] \cdot \text{sen}\left(\frac{n\pi}{l} y\right) + \left\{ T_0 + \frac{y}{l} [T_s(\tau) - T_0] \right\} \quad (2.40)$$

La expresión 2.40 constituye la ecuación matemática satisfactoria para el cálculo de la distribución de temperatura del material en una pila de menas lateríticas expuesta a secado natural.

2.5- Distribución de humedad en la pila

La expresión que caracteriza la distribución de humedad $[H(y, \tau)]$ en la pila de menas lateríticas se determina considerando que la ecuación 2.41 con las condiciones iniciales y de frontera representadas en el sistema de ecuaciones 2.42, se corresponde con el primer problema general de contorno definido por Tijonov y Samarsky (1980).

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} - k_u \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = f(y, \tau) \quad (2.41)$$

$$H(y, 0) = \Omega(y); H(0, \tau) = H_0 \text{ y } H(l, \tau) = H_s(\tau) \quad (2.42)$$

Donde:

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

H_0 y $H_s(\tau)$: humedad inicial del mineral y en la superficie de la pila (para $y = l$); kg/kg.

Para resolver la ecuación 2.41 con las condiciones representadas en 2.42 se aplica el método de separación de variables, se emplea la Figura 2.6 y se obtiene según Retirado (2012):

$$H(y, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-k_u \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \tau} \left\{ \cos(n\pi) \left[\frac{2 \cdot \int_0^{\tau} e^{-k_u \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \theta} R_n(\theta) \cdot d\theta - 2 \cdot [H_1 - H_s(0)]}{n\pi} + \frac{2H_s(0)}{n\pi} \right] + \left[\frac{2[H_0 - H_s(0)] \cdot \text{sen}(n\pi)}{n^2 \pi^2} + \frac{2 \left[n\pi \int_0^l H_1(y) \cdot \text{sen}\left(\frac{n\pi}{l} y\right) dy - 0 - H_0 \cdot l \right]}{n\pi \cdot l} \right] \right\} \cdot \text{sen}\left(\frac{n\pi}{l} y\right) + H_0 + \frac{y}{l} [H_s(\tau) - H_0] \tag{2.43}$$

La expresión 2.43 constituye la ecuación matemática satisfactoria para el cálculo de la distribución de humedad del material en una pila de menas lateríticas expuesta a secado natural.

2.6- Conclusiones del capítulo 2

- Se estableció un procedimiento de cálculo que permite la determinación de los parámetros necesarios para la optimización de la forma geométrica de la sección transversal de las pilas de menas lateríticas expuestas al proceso de secado natural.
- El procedimiento de cálculo establecido conjuga diversos aspectos teóricos expuestos en las investigaciones precedentes consultadas. Sin embargo, el mismo está particularizado a las condiciones específicas en que se desarrolla el proceso de secado natural de las menas lateríticas en las empresas productoras de níquel cubanas.

Capítulo 3

Optimización de la forma geométrica de la sección transversal de las pilas de menas lateríticas expuestas a secado natural

CAPÍTULO 3

OPTIMIZACIÓN DE LA FORMA GEOMÉTRICA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LAS PILAS DE MENAS LATERÍTICAS EXPUESTAS A SECADO NATURAL

3.1- Introducción

La obtención de la forma geométrica de la sección transversal de las pilas de menas lateríticas que mayor cantidad de energía solar térmica y eólica capta, aunque es una tarea compleja y laboriosa, tiene mucha importancia para el proceso de secado natural, porque permite racionalizar su implementación en las condiciones de explotación de las empresas productoras de níquel cubanas.

El **objetivo** de este capítulo es exponer los resultados obtenidos en la optimización de la forma geométrica de la sección transversal de las pilas de menas lateríticas expuestas a secado natural.

3.2- Desarrollo de la optimización

3.2.1- Elección del método de optimización

Se seleccionó el método propuesto por Sierra (2010), el cual básicamente consiste en desarrollar las acciones que a continuación se relacionan:

1. Discretizar los valores de las variables. Con este procedimiento el problema queda escrito como un Problema de Optimización Combinatoria.
2. Aplicar el método denominado Búsqueda Exhaustiva, el cual consiste en evaluar las restricciones para cada una de las combinaciones de los valores discretos de las variables. Cuando cierta combinación de valores de las variables satisface las restricciones, entonces, se considera que se obtuvo una solución factible (Arzola, 2000; Legrá y Silva, 2011).
3. Evaluar la función objetivo para todas las soluciones factibles y seleccionar las mejores soluciones (combinaciones que generen el menor o los menores valores; o que generen el mayor o los mayores valores) de acuerdo con las particularidades del proceso investigado.

La ventaja de este método es que no se presentan complicaciones relacionadas con la continuidad, aleatoriedad y derivabilidad de las funciones objetivos y las restricciones. Sus desventajas están relacionadas con la correcta selección de la discretización de manera que se contemple el análisis del mayor número de casos y se logre obtener una solución satisfactoria en un tiempo razonable.

3.2.2- Procedimiento de optimización utilizado

El proceso de discretización del problema de optimización se realiza siguiendo los pasos que a continuación se relacionan:

- Se divide la pila en un número n de cortes finos k_1, k_2, \dots, k_n ; al espesor de cada corte k_i se les denomina e_i . Cada uno de estos cortes k_i es dividido en m sectores $C_{i1}, C_{i2}, C_{ij}, \dots, C_{in}$, tal como se muestra en la Figura 3.1.

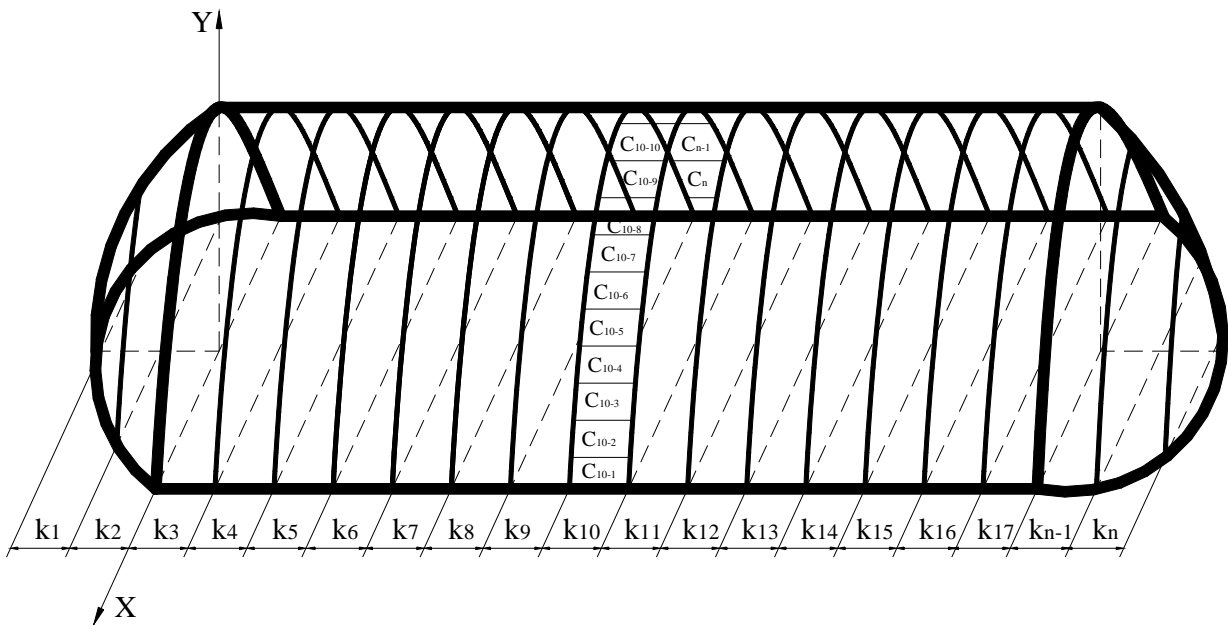


Figura 3.1. Representación de los cortes k_1, k_2, \dots, k_n y los sectores $C_{10-1}, C_{10-2}, \dots, C_n$ que se forman al dividir la superficie de captación solar de la pila.

- La superficie queda dividida en secciones superficiales S_{ij} determinadas por cada corte k_i y cada sector C_{ij} . A cada sección superficial S_{ij} se le puede asociar una sección plana P_{ij} determinada por los cuatro vértices de S_{ij} .

- A cada corte k_i se le asocia una función $f(X_i)$ tal que a cada valor de X se le asocia el valor de Y en la superficie de la pila.

En la práctica el ancho de la base de la pila de cada corte fue dividido en m subintervalos, donde se cumple la condición de que $3 \leq m \leq 100$. Por defecto se tomó: $m = 50$.

- Esta partición de la base generó los subintervalos $[X_j, X_{j+1}]$, siendo $j = 1, 2, \dots, m$. Al evaluar para cada valor X_j, X_{j+1} y X_m se obtienen los respectivos valores de Y_j, Y_{j+1} y Y_m , donde:

$$X_m = \frac{X_j + X_{j+1}}{2} \tag{3.1}$$

A continuación se determinan los parámetros α_j y l_j mediante las expresiones 3.2 y 3.3, para ello se emplea la Figura 3.2.

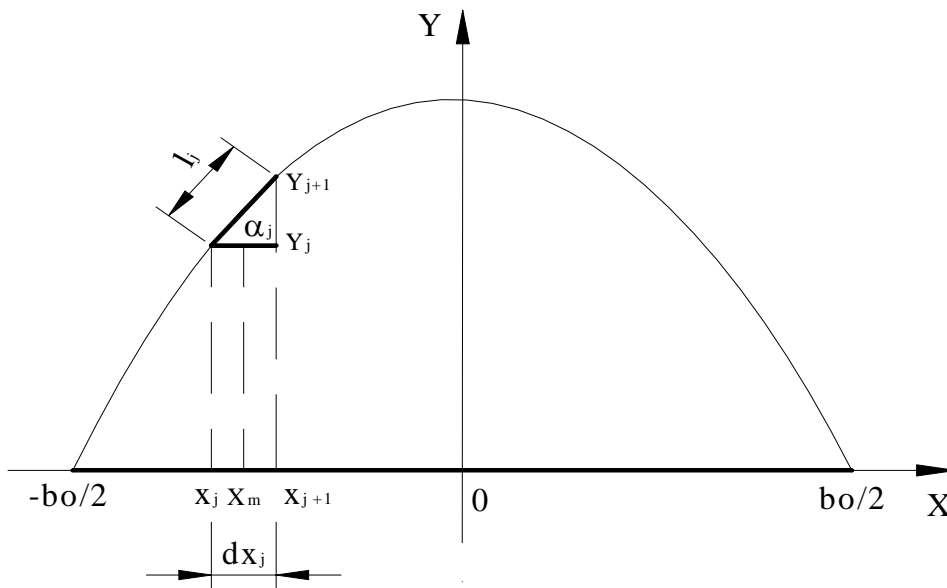


Figura 3.2. Esquema estructural para el cálculo de los parámetros α_j y l_j .

$$\alpha_j = \arctan\left(\frac{Y_{j+1} - Y_j}{X_{j+1} - X_j}\right) \tag{3.2}$$

$$l_j = \sqrt{(X_{j+1} - X_j)^2 + (Y_{j+1} - Y_j)^2} \quad (3.3)$$

El área de cada sección superficial S_{ij} puede ser aproximada al área de la sección plana P_{ij} , la misma se calcula por la expresión 3.4.

$$A_{ij} = l_j \cdot e_i \quad (3.4)$$

- Mediante las expresiones 3.5; 3.6 y 3.7 se determina la radiación solar global (I_{SG}) que recibe la pila de minerales en un período de 12 horas, contadas desde la 6 hasta las 18 horas del día.

$$I_{SG} = \sum_{i=1}^n I_i \quad (3.5)$$

$$I_i = \sum_{j=1}^m I_{ij} \quad (3.6)$$

$$I_{ij} = \sum_{h=6}^{18} I_{ijh} \quad (3.7)$$

Donde:

I_{SG} : radiación solar global que recibe la superficie de la pila de menas lateríticas; J/día.

n : número de cortes en que se divide la superficie de la pila; adimensional.

I_i : radiación solar global que recibe el corte k_i ; J/día.

m : número de sectores en que se divide cada uno de los cortes de la superficie; adimensional.

I_{ij} : radiación solar global que recibe una sección plana P_{ij} determinada por el corte i y el sector j ; J/día.

h : número de horas en que las secciones reciben radiación solar ($6 \leq h \leq 18$); adimensional.

El cálculo de I_{ijh} se explica en el Epígrafe 2.4.1.1 y su expresión de cálculo es la 2.27. Esta radiación es una aproximación razonable de la radiación que recibe la sección S_{ij} .

Aplicación del método de optimización denominado Búsqueda Exhaustiva

- Se toman los valores mínimos prefijados para el ángulo maximal de la pila [$\varphi_m = \varphi_{m(Minimo)}$] y para el ángulo tangencial de la pila [$\varphi_t = \varphi_{t(Minimo)}$]. Es obvio que la combinación de los valores de estos dos ángulos determina cierta configuración geométrica de las secciones P_{ij} .
- Se determina el valor de I_{SG} para los ángulos φ_m y φ_t prefijados.
- Se inicia un doble lazo algorítmico donde se van incrementando los valores de φ_m y φ_t hasta que los mismos alcanzan ciertos valores máximos prefijados $\varphi_m = \varphi_{m(Máximo)}$ y $\varphi_t = \varphi_{t(Máximo)}$. Para cada combinación de los ángulos φ_m y φ_t se calcula I_{SG} .
- Entre todos los valores calculados de I_{SG} se selecciona el valor máximo [$I_{SG(Máximo)}$]. La pareja de ángulos φ_m y φ_t que lo generó determina la mejor configuración geométrica de la sección transversal de la pila de menas lateríticas.

Nota: el procedimiento de optimización descrito se implementó en la aplicación informática que se muestra en el Anexo 1.

3.2.3- Resultados obtenidos en la optimización

3.2.3.1- Según la densidad de radiación recibida en la superficie

Los resultados obtenidos para la densidad de radiación solar recibida (DR) reflejan un comportamiento oscilatorio con tendencia decreciente cuando se analizan los valores correspondientes a los diferentes ángulos calculados (Tabla 1 del Anexo 2). Sin embargo, cuando se fija el valor del ángulo tangencial (AT) y se varía el ángulo maximal (AM) ocurre un decrecimiento para todas las combinaciones analizadas, observándose que para un mismo ángulo tangencial se obtiene mayor densidad de radiación en las pilas de sección transversal parabólica (combinación donde $AT > AM$). Los valores extremos (máximo y mínimo) de densidad de radiación se obtienen en las combinaciones 25° - 20° y 70° - 70° , respectivamente, lo que es lógico debido a la marcada incidencia que tiene el ángulo de inclinación de la superficie (φ) en la función objetivo que se empleó para el cálculo (ver ecuaciones 3.5; 3.6; 3.7 y 2.27).

Este análisis puntual de las soluciones que generan los valores máximo y mínimo, si bien es cierto que puede conducir, desde el punto de vista teórico, a la optimización de la forma geométrica de la sección transversal de la pila de menas lateríticas, basada en

el enfoque clásico (ver Epígrafe 1.6), en la práctica es poco factible porque durante los procesos de apilado y remoción del mineral es extremadamente difícil mantener un valor fijo de la inclinación de la superficie, por tanto, para el proceso investigado se debe considerar la posibilidad que brinda el enfoque flexible de la optimización (ver Epígrafe 1.6), de encontrar un conjunto de soluciones que satisfagan las restricciones de la función objetivo y que en la implementación práctica del proceso pueda materializarse sin grandes dificultades.

Los resultados expuestos en la Tabla 1 del Anexo 2 se graficaron y se muestran en la Figura 3.3 con el propósito de encontrar la región de soluciones satisfactorias, como se aprecia en la figura anteriormente mencionada, se pueden obtener valores de densidad de radiación suficientemente grandes para oscilaciones de los ángulos maximal y tangencial entre 20° - $29,78^{\circ}$ y 20° - $48,95^{\circ}$, respectivamente. Esto permite que la implementación del proceso investigado sea más ajustada a la realidad física en que se desarrolla. Para ello fue imprescindible la aplicación del enfoque flexible de optimización, recomendado en la literatura (Arzola, 2000; Legrá y Silva, 2011).

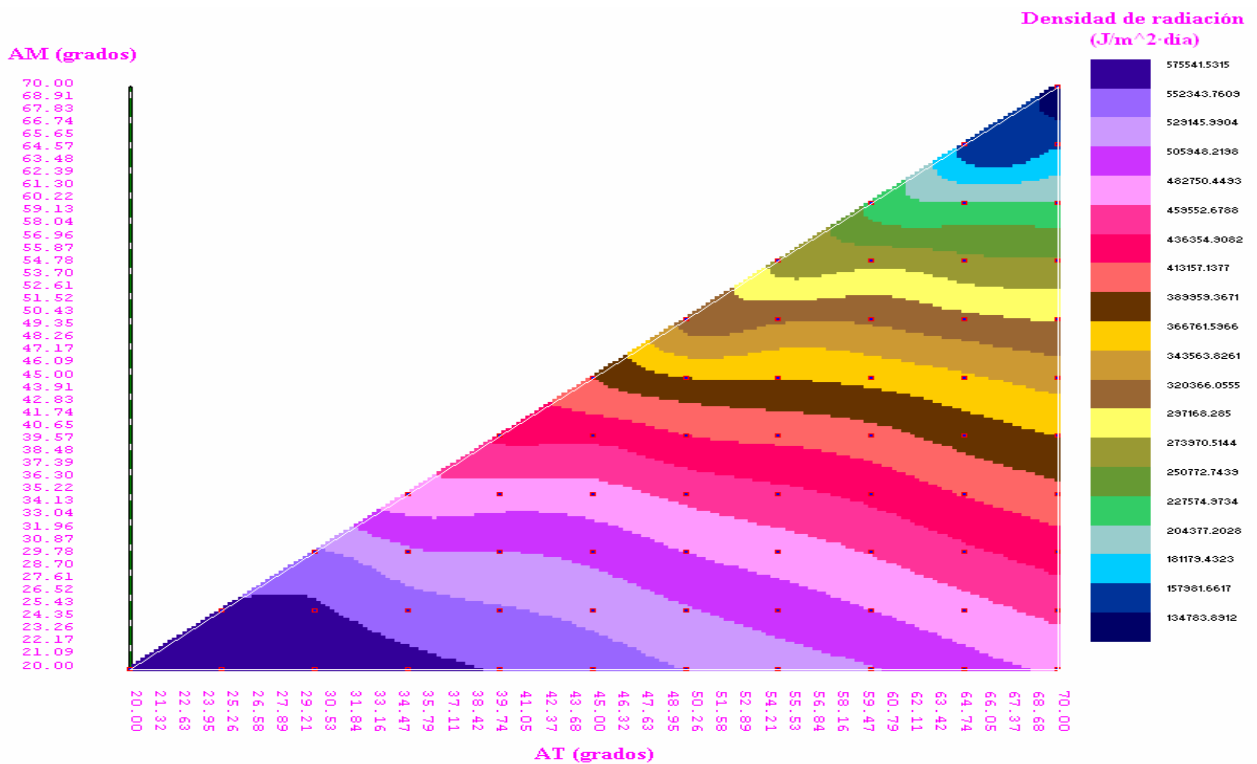


Figura 3.3. Comportamiento de la densidad de radiación recibida en la superficie.

Observación: se emplean AT y AM en lugar de φ_t y φ_m para facilitar la realización de los gráficos.

3.2.3.2- Según la radiación total y el calor total recibidos en la superficie

Al considerar como función objetivo la radiación total los resultados obtenidos muestran un comportamiento similar al caso de estudio anteriormente analizado (Epígrafe 3.2.3.1). En la Tabla 1 del Anexo 2 se observa que el valor máximo de radiación total se obtiene en la combinación 30°-30° de los ángulos maximal y tangencial lo que es indicativo de que se puede exponer al secado natural una pila de mayor volumen respecto a la obtenida en la optimización realizada en el epígrafe anterior. Por su parte, el valor mínimo igualmente se obtiene en la combinación 70°-70°.

En la Figura 3.4 se aprecia la existencia de una región donde se obtienen valores satisfactorios de radiación total sobre la superficie de la pila cuando los ángulos maximal y tangencial oscilan entre 20°-31,96° y 20°-45,66°, respectivamente. De lo anterior se infiere que en los dos casos de estudio analizados, las mejores soluciones de optimización se obtienen para combinaciones de ángulos inferiores a 50°-50°. Por tanto una recomendación práctica para la implementación del proceso es que se deben construir las pilas alargadas pero de poca altura para propiciar que el espesor de secado sea pequeño y que la captación de energía solar sea grande.

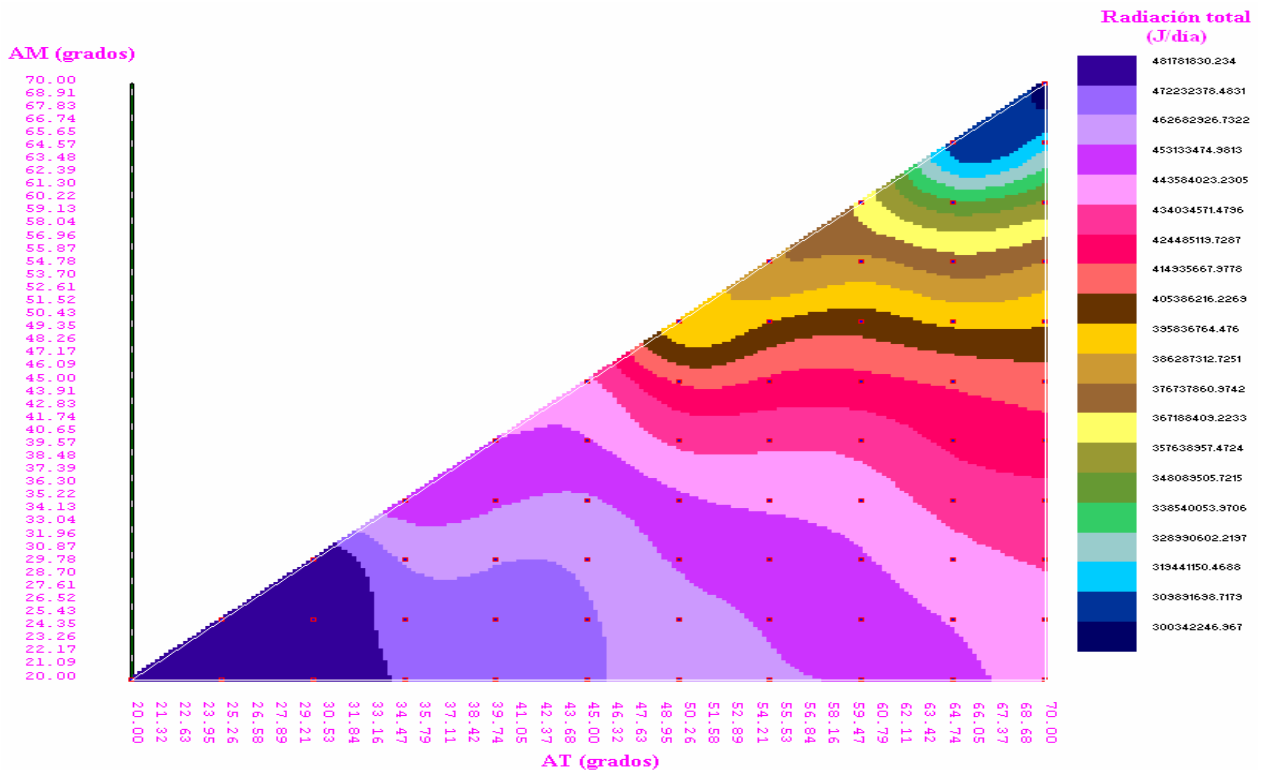


Figura 3.4. Comportamiento de la radiación total recibida en la superficie de la pila.

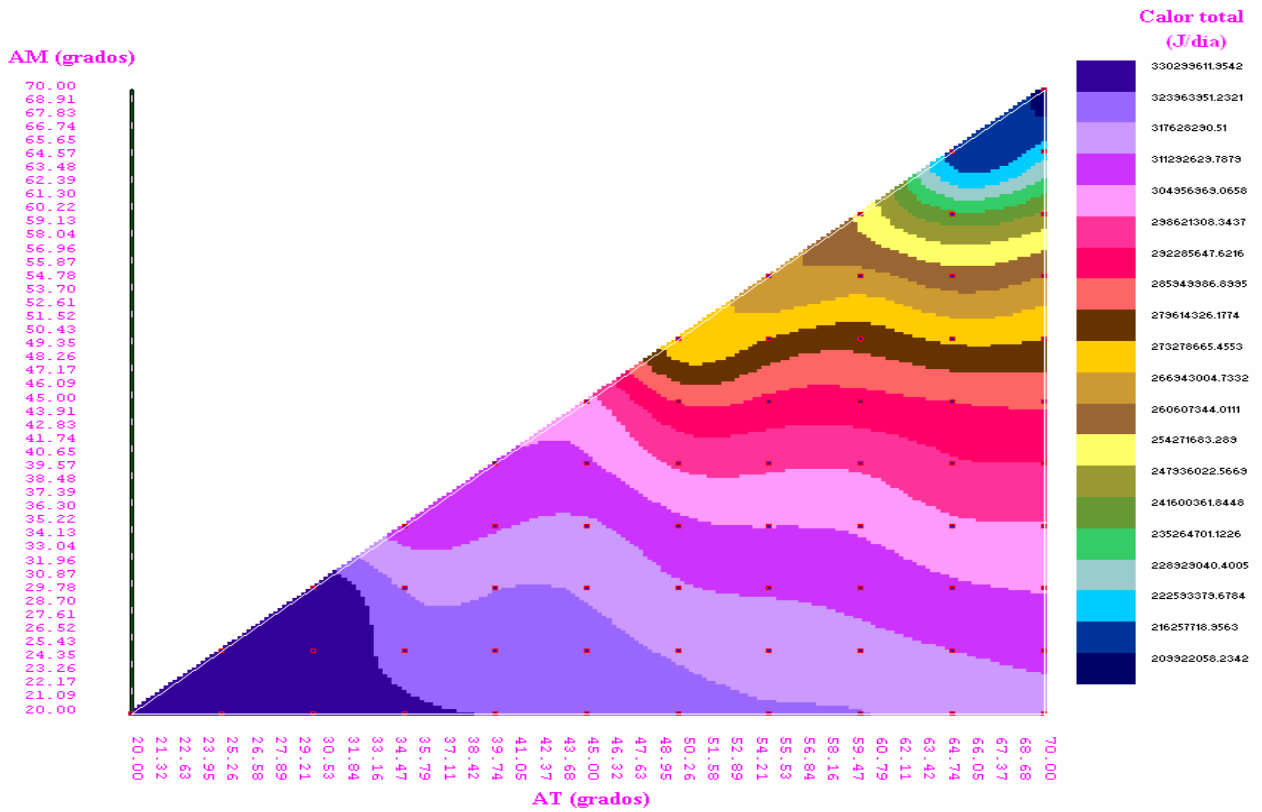


Figura 3.5. Comportamiento del calor total recibido en la superficie de la pila.

Al valorar los resultados obtenidos para el flujo de calor total recibido en la superficie se obtiene un comportamiento similar al caso de la radiación total (ver Figuras 3.4 y 3.5), coincidiendo que los valores máximo y mínimo se obtienen en las combinaciones 30° - 30° y 70° - 70° (ver Tabla 2 del Anexo 2). Sin embargo, la región de soluciones factibles se obtiene cuando los ángulos maximal y tangencial oscilan entre 20° - $31,96^{\circ}$ y 20° - $59,47^{\circ}$, respectivamente. La similitud entre los dos comportamientos analizados se debe a la marcada incidencia que tiene la radiación total en el flujo de calor total recibido por la superficie. En este punto se debe recordar que el calor total es la suma o la diferencia entre el calor por radiación y el calor por convección y que el segundo es poco influyente para las condiciones del secado natural del mineral.

3.2.3.3- Según el porcentaje y el volumen de mineral secado

Los comportamientos obtenidos para el porcentaje de mineral secado y el volumen de mineral secado son opuestos pero lógicos, en el primer caso se obtienen los valores máximo y mínimo en las combinaciones 20° - 20° y 70° - 70° de los ángulos maximal y

tangencial y para el segundo caso se invierten las combinaciones encontrándose el valor máximo en 70°-70° y el mínimo en 20°-20° (ver Tabla 2 del Anexo 2). Considerando el enfoque flexible de optimización la región de soluciones factibles para el caso del porcentaje de mineral secado se obtiene cuando los ángulos toman valores entre 20°-27,61° y 20°-42,37°, respectivamente (ver Figura 3.6).

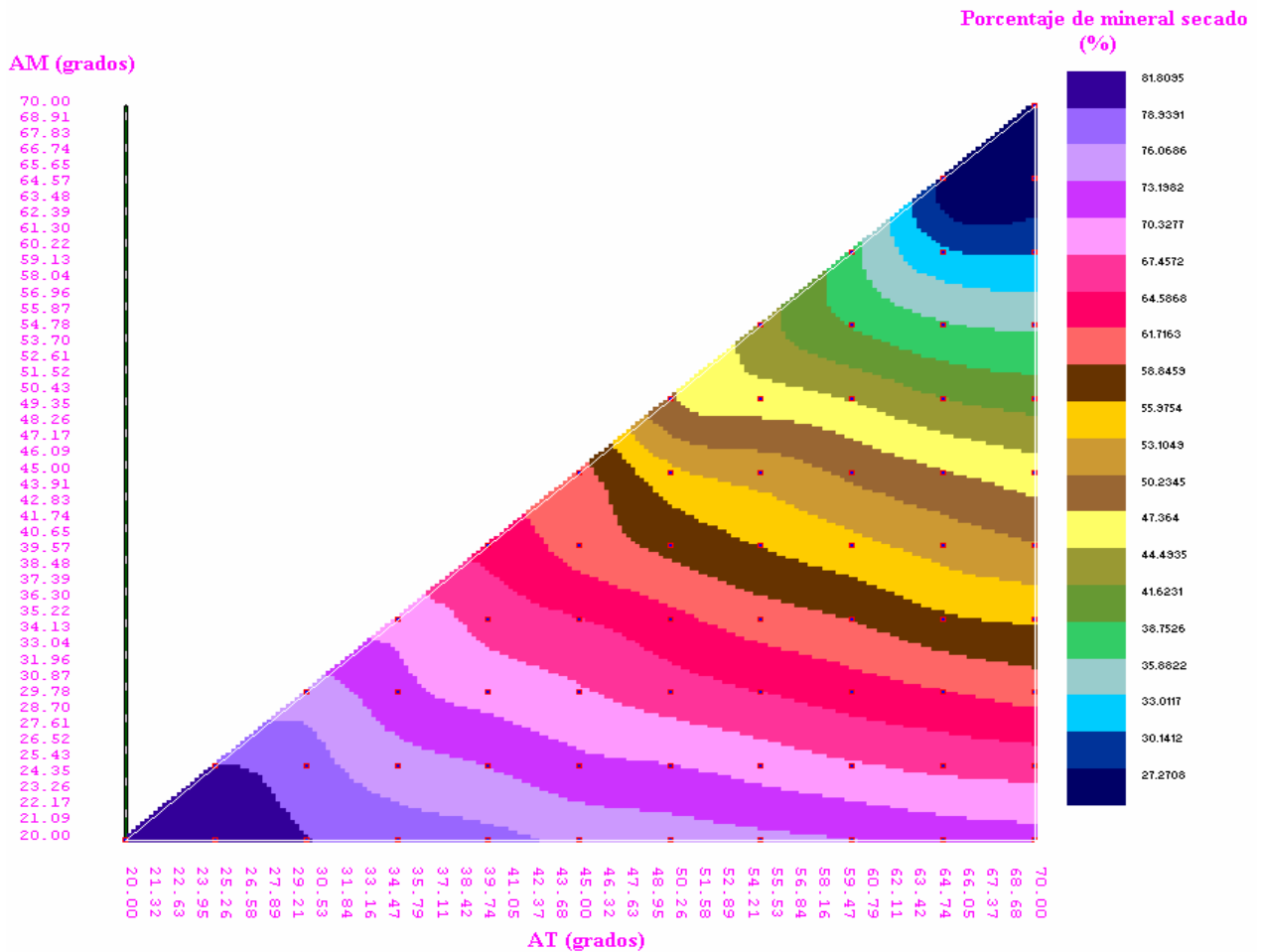


Figura 3.6. Comportamiento del porcentaje de mineral secado.

Entre tanto los mayores volúmenes de mineral secado se obtienen para oscilaciones 43,91°-70 y 67°-70° de los ángulos maximal y tangencial (Figura 3.7). De lo anterior se infiere que para optimizar la forma geométrica de la sección transversal de las pilas con la finalidad de implementar el proceso en la práctica productiva se debe tener en cuenta el compromiso que existe entre obtener mayor cantidad de material seco o las mayores reducciones en la humedad del material.

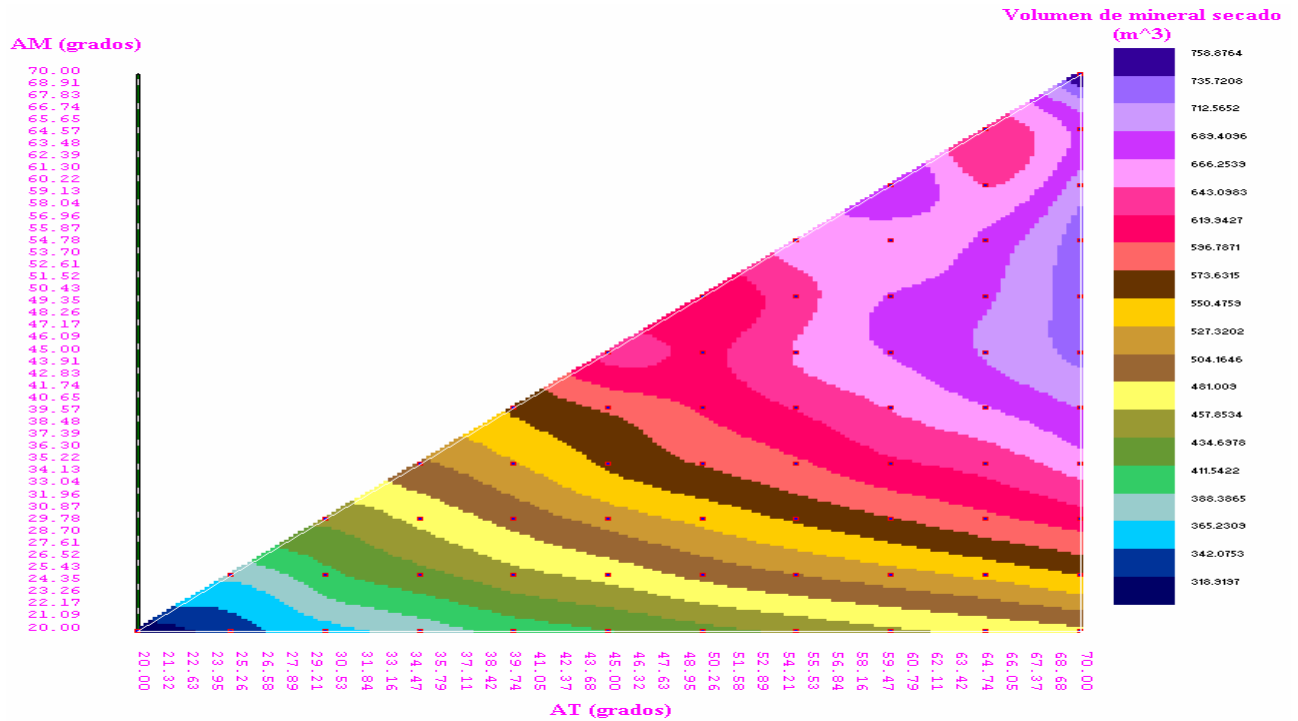


Figura 3.7. Comportamiento del volumen de mineral seco.

3.2.3.4- Influencia del área de exposición y el volumen de las pilas de minerales

Desde el punto de vista de la optimización del proceso de secado natural se deben considerar no solo las tendencias crecientes del área y el volumen (ver Figuras 3.8 y 3.9), sino también la forma geométrica de la sección transversal de la pila, porque de ella depende en buena medida el volumen de material que se puede exponer al proceso de secado en una superficie horizontal disponible y la cantidad de radiación solar que puede captar la superficie de secado de la pila.

En el caso particular del volumen, la optimización de la sección transversal de la pila debe realizarse estableciendo un compromiso entre la productividad que demanda el proceso productivo y la reducción en el contenido de humedad del material que se quiere obtener. Si se desea secar mayor cantidad de material, entonces los niveles de reducción del contenido de humedad serían pequeños y si, por el contrario, se desea secar más el material, entonces se debe disminuir el espesor de secado mediante la reducción del volumen de las pilas que se exponen al proceso de secado natural o el aumento del área horizontal disponible. Este compromiso que debe considerarse durante la implementación práctica del proceso está concebido en la aplicación

informática creada, pero esencialmente obedece a la lógica y la experiencia de los trabajadores encargados de implementar el proceso en las industrias niquelíferas y a las exigencias tecnológicas del proceso productivo.

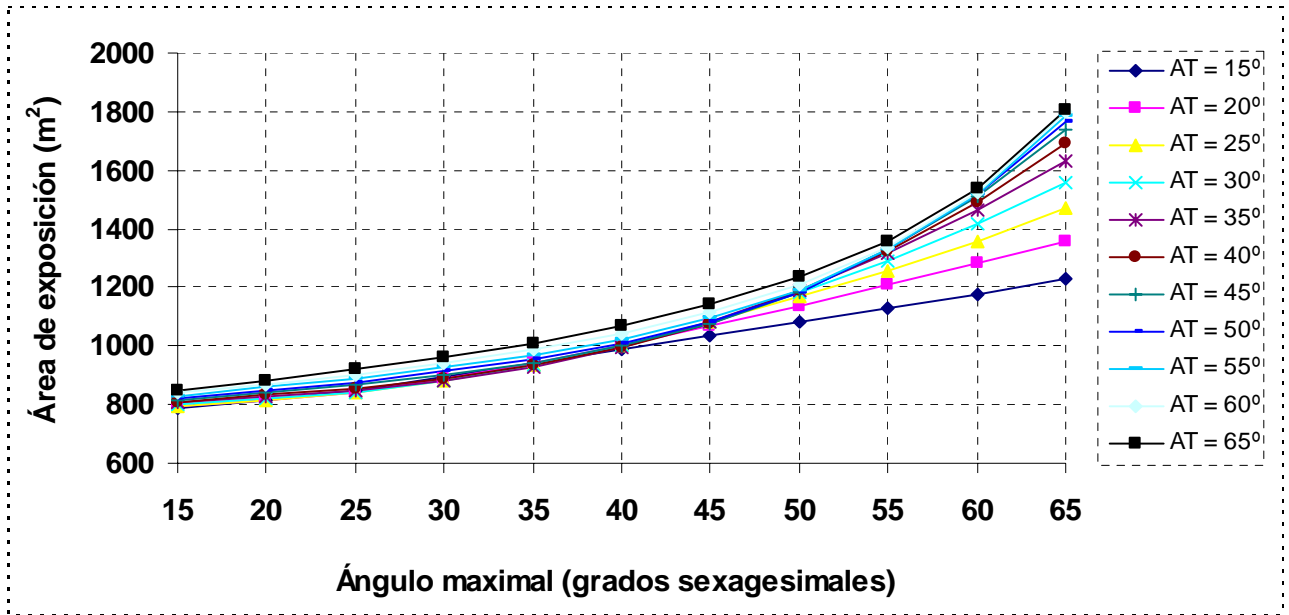


Figura 3.8. Comportamiento del área de exposición de la pila en función de los ángulos maximal y tangencial.

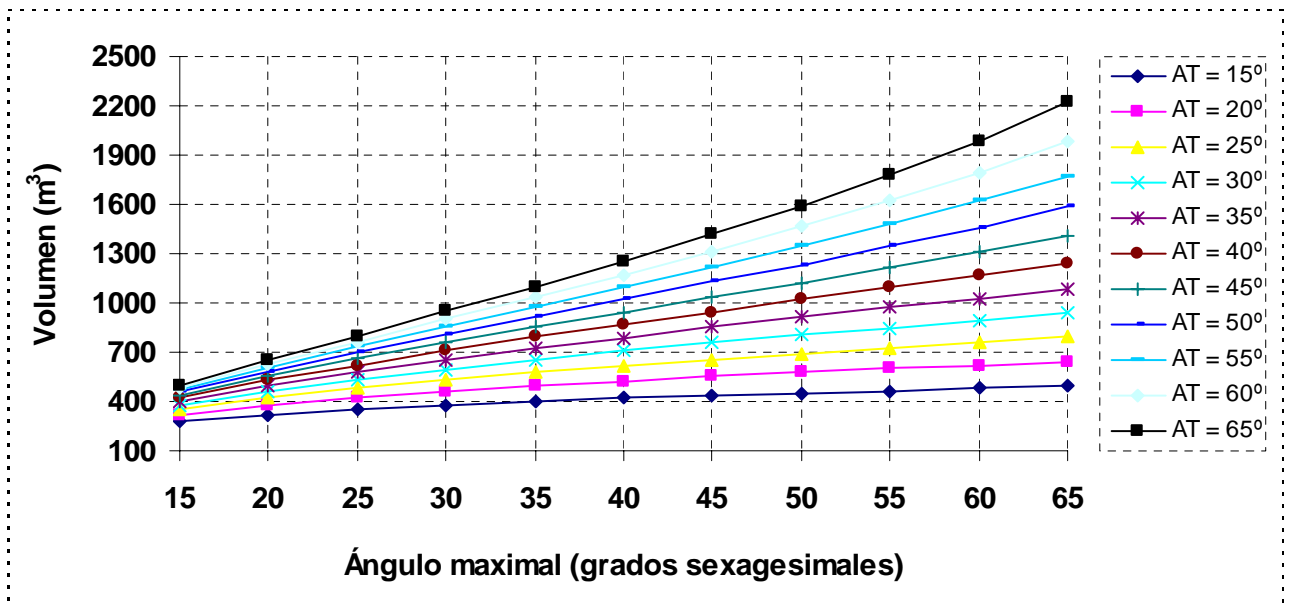


Figura 3.9. Comportamiento del volumen de la pila en función de los ángulos maximal y tangencial.

3.3- Acciones para perfeccionar la tecnología de secado natural empleada

Como se ha indicado en la introducción general del presente trabajo la tecnología actualmente empleada para la implementación del secado natural de las menas lateríticas tiene varias limitaciones, las mismas pueden ser mitigadas mediante la realización de las acciones siguientes:

- Implementar un sistema de drenaje en los yacimientos niquelíferos cubanos particularizado a las características hidrogeológicas y de relieve del yacimiento en cuestión, esto permitirá reducir la humedad de las menas lateríticas desde el propio momento de la explotación de los yacimientos.
- Caracterizar de manera rigurosa las variables climatológicas del lugar específico donde se implementará el proceso de secado natural, a partir del estudio estadístico del comportamiento de las variables en un periodo de tiempo que resulte representativo para estos fines.
- Garantizar que el patio de secado natural cumpla con las características técnicas siguientes:
 - Que el piso tenga una elevación apropiada para evitar las inundaciones en caso de lluvias e impedir el bloqueo del viento y que esté nivelado para que permita el secado uniforme de las menas lateríticas y evite la concentración de agua durante el drenaje de abundantes lluvias.
 - Que el drenaje sea eficiente y capaz de evacuar rápidamente el agua en caso de lluvias, de lo contrario el secado no será uniforme y el material entrará con un elevado contenido de humedad a los secaderos térmicos convencionales de las empresas productoras de níquel.
 - Que esté lejos del agua y de los árboles para evitar que el aire circundante mantenga alta o aumente su humedad relativa, lo cual disminuye su capacidad de absorción de humedad.
- Caracterizar las menas lateríticas desde el punto de vista, granulométrico, químico, hidrogeológico y termofísico para conocer con anterioridad el posible comportamiento térmico que experimentará durante la implementación del proceso de secado natural.

- Orientar el eje axial de las pilas de menas lateríticas en la dirección del eje Norte-Sur, esto permitirá que el Sol en su movimiento diario (de este a oeste) distribuya uniformemente la radiación solar sobre la superficie de secado de las pilas y además eliminará los inconvenientes asociados al cálculo de la radiación solar global que incide sobre una superficie de secado inclinada y que está orientada arbitrariamente.
- Caracterizar apropiadamente la geometría de la sección transversal de las pilas de menas lateríticas que se someterán al proceso de secado natural considerando las propiedades físicas (humedad y granulometría) del mineral y posteriormente calcular, con la debida precisión, el área de exposición de las pilas, el volumen de material expuesto a secado y la radiación solar global que llega a la superficie de secado. Lo anterior permitirá estimar con mayor exactitud el tiempo de secado al que deberá someterse el producto para reducir su contenido de humedad desde un valor inicial conocido hasta otro valor final deseado y, por consiguiente, mitigará los inconvenientes asociados a los prolongados tiempos de retención al que someten, a veces de forma innecesaria, las menas lateríticas en los patios de secado natural.
- Evaluar rigurosamente los procesos de transferencia de calor y masa que se producen durante el secado natural de la menas lateríticas a partir del empleo de los modelos matemáticos establecidos en el presente trabajo. Por cuanto, dichos modelos están adecuadamente ajustados a las condiciones específicas en que se desarrolla el proceso en las empresas productoras de níquel cubanas y, por tanto, garantizan un aceptable grado de confiabilidad de los resultados que se obtienen en su implementación.
- Simular la distribución de temperatura y humedad que experimentará el material durante la implementación del proceso de secado natural, y con ello predecir la variación de humedad que es posible obtener en el mineral para ciertas condiciones de secado predeterminadas. Esto lógicamente permitirá perfeccionar la planificación, ejecución y control del proceso de secado natural en las condiciones de explotación de las empresas productoras de níquel cubanas.
- Optimizar la forma geométrica de la sección transversal de las pilas considerando los criterios científico-técnicos y prácticos que se analizan en la presente investigación con la finalidad de conocer previamente la conveniencia o no de la

implementación del proceso para determinadas condiciones de explotación. Con ello se reducen los gastos económicos, a veces innecesarios, asociados a la experimentación y por tanto se racionaliza la implementación del secado natural.

3.4- Valoración de los beneficios económicos derivados de la implementación del secado natural de las menas lateríticas

3.4.1- Beneficios obtenidos en la empresa “René Ramos Latour”

En la Tabla 3.1 se expone el comportamiento del consumo de combustible en función de la humedad de las menas lateríticas a la entrada de los secaderos térmicos convencionales de la empresa para el periodo en que se alimentó el material sin y con secado natural. En la prueba de secado se alimentaron 195 173 toneladas de menas lateríticas sin secado natural, luego la misma cantidad de material fue sometida al proceso de secado natural y con ello se redujo su humedad promedio en 1,40 %.

Tabla 3.1. Incidencia de la humedad del material en el consumo de combustible de los secaderos térmicos convencionales de la empresa.

Cantidad de menas lateríticas procesadas en la prueba de secado: 195 173 toneladas				
Meses en que se realizó la prueba de secado	Material procesado sin secado natural $H_{(p)} = 32,86 \%$		Material procesado con secado natural $H_{(p)} = 31,46 \%$	
	Humedad del material a la entrada de los secaderos (%)	Consumo de combustible en los secaderos (t)	Humedad del material a la entrada de los secaderos (%)	Consumo de combustible en los secaderos (t)
Enero	32,20	23 250	32,46	23 704
Febrero	32,70	21 686	31,61	19 496
Marzo	33,56	22 679	30,95	21 719
Abril	33,13	21 722	30,56	21 942
Mayo	32,69	22 855	31,71	22 521
Total →	32,86*	112 192	31,46*	109 382

Fuente: Retirado, 2012.

Como se observa en la Tabla 3.1 en los primeros cinco meses donde se alimentó el material sin secado natural el consumo de petróleo fue igual a 112 192 toneladas, determinado en gran medida por la alta humedad de las menas, lo anterior eleva los

costos de producción y reduce considerablemente las utilidades que se pueden obtener en la explotación de los secaderos.

De acuerdo con lo expuesto en la Tabla 3.1 el índice de producción fue solo de 1,739 t de mineral/t de petróleo consumido en la operación convencional sin secado natural, lo anterior confirma la baja eficiencia con que trabaja la planta de secaderos de la empresa. Al aplicarle el secado natural al material para el mismo periodo de tiempo se obtuvo un consumo igual a 109 382 toneladas de petróleo y, por consiguiente, se logró un ahorro de 2 810 toneladas y un índice de producción de 1,784 t/t. Estos comportamientos demuestran la factibilidad económica que tiene la implementación del proceso de secado natural en la empresa analizada.

En el sistema de transporte de la fábrica también se obtienen los impactos económicos positivos que se muestran en la Tabla 3.2. Los resultados mostrados en la mencionada tabla indican que la implementación del secado natural incidió en que se obtuviera una reducción del combustible perdido, por concepto de recirculación de las menas lateríticas en el sistema de transporte, que asciende a 53 206 litros para el periodo enero-mayo. La distribución por meses, comenzando por enero fue de 22 716; 11 692; 722; 6 552 y 11 524 litros respectivamente, de la misma se observa que los mayores ahorros se obtuvieron en enero, febrero y mayo (ver Tabla 3.2). Estos comportamientos aunque no están determinados únicamente por la implementación del secado natural, los mismos si están influenciados por la aplicación del proceso porque a través del mismo se reduce la humedad del material y con ello se disminuye la adherencia del mineral a las paredes de los medios de transporte en que son trasladados desde la mina hasta la empresa.

Con la implementación del proceso de secado natural de las menas lateríticas en la empresa se alcanzó, en el sistema de transporte por ferrocarril, una productividad de 51 toneladas por vagón de las 34 que se tiene planificada. Lo anterior produjo un incremento en la cantidad de menas lateríticas transportadas (29 049 toneladas) y, por consiguiente, se obtuvieron ahorros económicos por concepto de consumo de combustible de las locomotoras utilizadas para el transporte del material desde la mina de Pinares de Mayarí hasta la empresa.

Tabla 3.2 Impacto económico de la implementación del secado natural de las menas lateríticas en el sistema de transporte de la empresa.

Carga circulante, carga improductiva y combustible perdido durante el transporte por ferrocarril de las menas lateríticas desde la mina de Pinares de Mayarí hasta la planta de secaderos de la empresa						
Meses en que se realizó la prueba de secado	Material procesado sin secado natural $H_{(P)} = 32,86 \%$			Material procesado con secado natural $H_{(P)} = 31,46 \%$		
	CC (t)	CI (%)	CP (litros)	CC (t)	CI (%)	CP (litros)
Enero	20 118	10,40	40 236	8 760	8,10	17 520
Febrero	9 714	7,04	19 428	3 868	6,40	7 736
Marzo	6 138	6,03	12 276	5 777	5,80	11 554
Abril	6 642	5,01	13 284	3 366	3,90	6 732
Mayo	12 517	9,03	25 034	6 755	7,70	13 510
Total →	55 129	7,502*	110 258	28 526	6,38*	57 052

Observación para las Tablas 3.1 y 3.2: * corresponde al valor promedio, no al total.

Simbología empleada en las Tablas 3.1 y 3.2

$H_{(P)}$: humedad promedio de las menas lateríticas a la entrada de los secaderos; %.

CC: carga circulante; **CI**: carga improductiva; **CP**: combustible perdido.

3.5. Impacto ambiental asociado al proceso de secado natural

El proceso estudiado daña poco al medio ambiente, ya que el mismo es natural y utiliza energía solar y eólica como fuentes de secado, pero durante el desarrollo del mismo existe una afectación constante al medio ambiente y los trabajadores debido a las emanaciones de polvo que se generan en el proceso de carga, descarga y remoción del mineral, por esta razón se explican las principales afectaciones causadas por el polvo.

3.5.1- Influencia del polvo en el ambiente y el organismo humano

El estado de salud del trabajador depende en gran medida de las condiciones de trabajo, su entorno laboral y su labor específica, porque es donde el mismo se expone a los diferentes contaminantes, entre los que se encuentra el polvo industrial. Las

partículas suspendidas en la atmósfera absorben la luz solar, reduciendo la energía que llega a la tierra, produciendo cambios que disminuyen notablemente la luminosidad y visibilidad, además de la luz solar las partículas en suspensión absorben la luz producida por medios artificiales.

Este fenómeno se encuentra ligado a la concentración. Para una misma concentración las partículas que absorben una mayor cantidad de energía son las de diámetro comprendido entre 0.1 a 1 μm . Entre los efectos que pueden tener sobre los materiales se encuentran:

Abrasión: realizada por aquella partícula de mayor diámetro y dotadas de elevada velocidad (efecto de pequeña incidencia).

Ataque químico: puede realizarse directamente por las partículas o generalmente por los gases existentes conjuntamente con ellas.

Los efectos que produce sobre la vegetación pueden considerarse como muy pequeños y prácticamente inexistentes. Solo pueden cifrarse como peligrosos aquellos que se derivan para zonas muy próximas a puntos de producción de partículas en grandes cantidades. Las partículas solas o en combinación con otros contaminantes representan un peligro notable para la salud.

Sin embargo, cuando se habla del organismo humano, la situación se torna aún más preocupante, ya que lo afecta directamente en mayor o menor medida. Los contaminantes penetran en el organismo fundamentalmente por dos vías: por inhalación de polvos en el aire por las vías respiratorias y absorción de polvo a través de la piel.

En la primera, las partículas entran al cuerpo humano a través del sistema respiratorio y el efecto que se produce depende de su tamaño, la composición química y mineralógica, densidad, superficie específica y otras.

En la segunda, las partículas de diámetro superiores a 5 μm quedan retenidas en los bellos de la cavidad nasal y también pueden quedar atrapadas por la mucosa que tapiza la tráquea y la cavidad nasal. Los comprendidos entre 0,5 y 5 μm son capaces de penetrar hasta el sistema respiratorio inferior depositándose en los bronquios. De aquí que en la mayoría de los casos sean eliminados al cabo de algunas horas por respiración.

La situación más preocupante corresponde a las partículas menores de $0,5 \mu\text{m}$, ya que se ha estimado que más del 50 % de las partículas de $0,01$ a $0,1 \mu\text{m}$ que penetran en los alvéolos se depositan allí, donde es difícil eliminarlos, pudiendo permanecer durante meses e incluso durante años degradando la salud del hombre.

A pesar de los aspectos antes mencionados, se puede afirmar que con la implementación del secado solar se reducen considerablemente las emanaciones de gases producto de la combustión liberados por los secaderos rotatorios, debido a que el tiempo de permanencia del mineral dentro de los mismos es mucho menor y el consumo específico de combustible decrece considerablemente.

Al valorar las afectaciones medioambientales asociadas al proceso estudiado (por emanaciones de polvo) se observa que el secado solar como elemento de la minería a cielo abierto afecta de manera directa el entorno y el medio ambiente, en el trabajo no se exponen los valores cuantitativos de las concentraciones de los diferentes elementos porque no se han realizado mediciones recientes en la mina de la empresa.

3.6. Conclusiones del capítulo 3

- La optimización de la forma geométrica de la sección transversal de las pilas de minerales evidenció que se pueden obtener valores máximos y mínimos puntuales para la densidad de radiación, la radiación total, el calor total, el porcentaje de mineral secado y el volumen de mineral secado. Sin embargo, por las características del proceso y el material investigados la implementación del secado natural debe desarrollarse considerando la región de soluciones factibles que se obtienen en la optimización, la cual puede asumirse razonablemente cuando los ángulos maximal y tangencial varían entre 30 y 60 grados sexagesimales.
- Con el aumento de los ángulos maximal y tangencial se incrementan los valores del área de exposición y el volumen de las pilas de minerales y se reducen la densidad de radiación, la radiación total y el calor total que inciden sobre la superficie de secado, así como, el porcentaje de mineral secado. Por tanto, en la implementación práctica del proceso debe considerarse la interrelación que existe entre la productividad que demanda el proceso productivo y la reducción de humedad que se desea obtener en el material durante el secado natural.

Conclusiones Generales y Recomendaciones

CONCLUSIONES GENERALES

- El método de optimización seleccionado posibilitó la discretización de los valores de las variables, la evaluación exhaustiva de las restricciones para cada uno de los valores discretos de las variables, la evaluación de la función objetivo para todas las soluciones factibles y la selección de las mejores soluciones.
- La optimización de la forma geométrica de la sección transversal de las pilas de minerales se desarrolló atendiendo a múltiples criterios relacionados con el aprovechamiento de la energía térmica disponible para el secado. La misma evidenció que la implementación del proceso de secado natural de las menas lateríticas debe realizarse con pilas de sección transversal parabólica que tengan la superficie de secado inclinada entre 30 y 60 grados sexagesimales, respecto al plano horizontal.
- La implementación del secado natural de las menas lateríticas en la empresa “Comandante René Ramos Latour” de Nicaro redujo el contenido de humedad del material en 1,40 % y en consecuencia la carga circulante improductiva en el sistema de transporte por ferrocarril disminuyó en 1,122 % y la productividad del referido sistema de transporte se incrementó en 17 t/vagón provocando que por estos conceptos se ahorran 10 641,2 y 16 800 litros de petróleo por mes, como promedio.
- En la empresa se redujeron las emisiones de gases tóxicos producto de la combustión del petróleo. Sin embargo, se produce afectación al medio ambiente y los trabajadores debido a las emanaciones de polvo que se generan en el proceso de carga, descarga y remoción de las menas lateríticas en el patio de secado.

RECOMENDACIONES

- Incorporar los resultados obtenidos en el trabajo durante la implementación del proceso de secado natural en las empresas productoras de níquel cubanas.
- Emplear la información científico-técnica establecida en la tesis durante la realización de actividades docentes en las asignaturas afines a la temática investigada.
- Continuar y perfeccionamiento de la presente investigación mediante:
 - La búsqueda de la forma geométrica óptima de la sección transversal de las pilas de menas lateríticas para un número mayor de casos de estudios y para otras condiciones de secado natural no consideradas en el presente trabajo;
 - La determinación de la forma geométrica óptima de la sección transversal mediante la aplicación de otros métodos de optimización y;
 - La optimización de otros parámetros fundamentales del proceso de secado natural de las menas lateríticas.

Referencias Bibliográficas

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abdala, J.; S. Fonseca; J. Pantoja. Secado de café en secadores solares multipropósito y de tambor rotatorio. *Tecnología Química*, 2003, 23(3): 68-79.
2. Abdel-Rehim, Z.; Z. Nagib. Solar drying of Bagasse Pulp. *Journal of Applied Sciences Research*, 2007, 3(4): 300-306.
3. Aldana, E.; I. Ramírez; H. Alepuz. Determinación de la carga y capacidad actuales de la instalación de secado de mineral de la empresa Ernesto Che Guevara. *Tecnología Química*, 2004, 24(2): 90-96.
4. Anderson, E. *Solar energy fundamentals for designers and engineers*. New York: Addison-Wesley, 1982.
5. Arzola, J. *Sistemas de Ingeniería*. La Habana: Editorial Félix Varela, 2000.482 p.
6. Berger, D.; T. Pei. Drying of hygroscopic capillary porous solids, a theoretical approach. *Journal Heat Mass Transfer*, 1973, 16: 293-302.
7. Bergues, C.; J. Abdala; P. Griñán; S. Fonseca; E. Pantoja; Z. Acosta; G. Hernández. Concepción y evaluación de un secador solar de granos con cubierta de polietileno. *Tecnología Química*, 2003a, 23(1): 68-73.
8. Bergues, C.; O. Fabar; A. Martínez. Minisecador solar para la agricultura urbana "MINISOL". Concepción, evaluación y caracterización de sus cambios tecnológicos. *Tecnología Química*, 2006, 26(2): 37-48.
9. Bergues, C.; P. Griñán; J. Abdala; S. Fonseca. 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. 2003b.
10. Bergues, C.; P. Griñán; S. Fonseca; J. Abdala; G. Hernández. Construcción y evaluación del secador solar de granos a escala industrial de 3m² en condiciones de explotación. *Tecnología Química*, 2002, 22(3): 87-91.
11. Beltagy, A.; G. Gamea; A. Essa. Solar drying characteristics of strawberry. *Journal of Food Engineering*, 2007, 78 (1): 456-464.
12. Boizán, M. *Macrocinética del secado de Bagazo*. Santiago de Cuba: Ediciones ISJAM, 1991. 145p.
13. Celma, A.; S. Rojas; I. Montero. Simulación térmica del proceso de secado.

- Alimentación, Equipos y Tecnología*, 2004, 192(1): 86-90.
14. Churchill, S. *Convined free and forced conveccition aroun inmmersed bodies*. Nueva York: Hemisphere Publisching, 1983.
 15. Duffie, J.; W. Beckman. *Solar engineering of thermal processes*. New York: Wiley Institution, 1991, 919 p.
 16. Espinosa, M.; N. Pérez. *Evaluación del estado técnico de las muestras extraídas y depositadas en áreas de la mina de la empresa Ferroníquel Minera, para los trabajos de secado solar y homogenización*. Informe de investigación presentado en el Consejo Técnico de la empresa Ferroníquel Minera SA, 2010a. 30 p.
 17. Espinosa, M.; N. Pérez. *Resultados obtenidos en pruebas de secado solar realizadas por el Centro de Investigaciones del Níquel a la empresa Ernesto Che Guevara*. Informe de investigación presentado en el Consejo Técnico de la empresa Ferroníquel Minera SA, 2010b. 20 p.
 18. Estenoz, S.; A. Alderí; A. Reyes; Y. Lovaina; H. Pinto. *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. 2007b.
 19. Estenoz, S.; A. Alderí; N. Batista; A. Donatién; N. Pérez. *Aplicación del secado solar y la homogenización en la industria niquelífera Comandante Ernesto Che Guevara*. En: II Congreso Cubano de Minería. La Habana. 2007c.
 20. Estenoz S.; A. Alderí; N. Batista; A. Donatién. *Resultados en la industria minera del secado solar y la homogenización de minerales en pilas a la intemperie*. Santiago de Cuba. En: Memorias en CD del Evento CIEMA´05, 2005, Noviembre 8-11.
 21. Estenoz, S. *Desarrollo sostenible en la minería a través del aprovechamiento integral de los yacimientos lateríticos*. *Tecnología Química*, 2001, 21(3): 54-60.
 22. Estenoz, S.; A. Mejías; A. Donatién; A. Adherí. *Evaluación de las tecnologías de explotación de depósitos mineros para homogenización y secado solar en la mina de la empresa Ernesto Che Guevara*. Informe Técnico, 2007a. 46 p.
 23. 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.

24. Estenoz, S.; M. Espinosa. *Procedimiento para el secado solar de materiales a la intemperie*. OCPI. Fecha de solicitud: 2003. Cuba, patente de invención No. 175.
25. Estenoz, S.; N. Pérez; I. Ramírez. *Secado solar y homogenización de minerales a la intemperie en la industria cubana del níquel*. En: Memorias del evento CUBASOLAR. Villa Clara. 2006.
26. Fayett, D. *Optimización del secado solar para lodos residuales y cuantificación de metales pesados*. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. 2008. 46 h.
27. Ferreira, S.; A. Costa. Parámetros de transferencia de materia en el secado de frutas. *Información Tecnológica*, 2009, 20(2): 89-104.
28. Ferro, V.; S. Fonseca; J. Abdala; A. Torres; J. Pantoja; C. Bergues; P. Griñán; G. Ibáñez. Análisis de opciones para el secado solar de café. Aspectos cinéticos (Parte I). *Tecnología Química*, 1999, 19(3): 18-25.
29. Ferro, V.; J. Abdala; S. Fonseca; J. Pantoja; A. Torres; C. Bergues; P. Griñán; G. Ibáñez. Análisis de opciones para el secado solar de café. Aspectos energéticos, de rendimiento y económicos (Parte II). *Tecnología Química*, 2000, 20(1): 52-57.
30. Fonseca, S.; C. Bergues; J. Abdala; P. Griñán; G. Hernández. Estudio de la cinética del secado de granos en el prototipo de secador solar. Análisis de los resultados. *Tecnología Química*, 2002, 22(2): 59-64.
31. Fonseca, S.; J. Abdala; A. Torres; J. Pantoja. Análisis térmico del secador solar de tambor rotatorio para granos. *Tecnología Química*, 2000, 20(3): 70-75.
32. Fonseca, S.; J. Abdala; V. Ferro; J. Pantoja; A. Torres. Estudio comparativo del secado solar de café en plazoletas tradicionales y ennegrecidas. *Tecnología Química*, 2003, 23(3): 48-54.
33. Gógüs, F.; M. Maskan. Air drying characteristics of solid waste (pomace) of olive oil processing. *Journal of Food Engineering*, 2006, 72(4): 378-382.
34. Góngora, E.; D. Guzmán; A. Columbié; S. Marrero; Y. Retirado. Modelo matemático multivariable para un proceso de enfriamiento industrial de sólidos en cilindros rotatorios horizontales. *Energética*, 2007, 28(2): 15-25.
35. Góngora, E.; D. Guzmán; A. Columbié; S. Marrero Y. Retirado; M. Lamorú. Modelo matemático multivariable para un proceso de enfriamiento industrial de sólidos en

- cilindros rotatorios horizontales. En: 5to Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente. Cienfuegos. 2008, ISBN: 978-959-257-186-0.
36. Griñán, P.; S. Fonseca. *La madera y el secado solar*. Santiago de Cuba: Ediciones ISJAM, 2003.
 37. Guzmán, D. *Modelación, simulación y control del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso carbonato amoniacal*. Tesis Doctoral. ISMM. 2001. 124 h.
 38. Hernández, J.; P. Quinto. *Aplicación del modelo de Kowalski al secado de Madera de Abeto*. En: VII Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas. México DF. Noviembre, 2003a.
 39. Hernández, J.; P. Quinto; J. Cuevas; R. Acosta. Estudio del secado de *Capsicum Annum L* (Chile Jalapeño) a través del modelo de Likov. *Caos Conciencia*, 2008, 1:21-30.
 40. Hernández, J.; P. Quinto. *Secado de medios porosos: Situación actual y perspectivas*. En: VII Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas. México DF. Noviembre, 2003b.
 41. Hernández, J.; P. Quinto. Secado de medios porosos: una revisión a las teorías actualmente en uso. *Científica*, 2005, 9(2): 63-71.
 42. Incropera, F.; D. De Witt. *Fundamentos de la transferencia de calor*. 4 ed. México: Prentice Hall, 1999. 912 p.
 43. Incropera, F.; D. De Witt. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 2003. 3 t.
 44. Jain, D.; G. Tiwari. Effect of greenhouse on crop drying under natural and forced convection I: Evaluation of convective mass transfer coefficient. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45(1): 765–783.
 45. Jain, D.; G. Tiwari. Thermal aspects of open sun drying of various crops. *Energy*, 2003, 28(1): 37-54.
 46. Jain, D. Modeling the system of multi-tray crop drying using an inclined multi-pass solar air heater with in-built thermal storage. *Journal of Food Engineering*, 2005, 71(1): 44-54.
 47. Kasatkin, A. *Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química*. La Habana:

- Editorial Pueblo y Educación, 1987. 2 t.
48. Kaviani, M. *Principles of convective heat transfer*. Nueva York: Springer-Verlag, 1994.
 49. Kowalski, S.; C. Strumillo. Moisture transport, thermodynamics, and boundary conditions in porous materials in presence of mechanical stresses. *Chemical Engineering Science*, 1997, 52(7):1141-1150.
 50. Kowalski, S.; C. Strumillo. Thermomechanical approach to shrinking and cracking phenomena in drying. *Drying technology*, 2001, 19(5): 731-765.
 51. Krischer, O. *Die wissenschaftlichen grundlagen der trocknungstechnik*. Chap. IX, Springer Berlin, 1963.
 52. Kumar, A.; G. Tiwari. Effect of mass on convective mass transfer coefficient during open sun and greenhouse drying of onion flakes. *Investigation Report*, 2006.
 53. Kumar, S.; G. Tiwari. Estimation of convective mass transfer in solar distillation system. *Solar Energy*, 1996, 57(1): 459-469.
 54. Legrá, A.; O. Silva. *La investigación científica: Conceptos y Reflexiones*. La Habana: Editorial Félix Varela, 2011. 445p.
 55. Leyva, A.; A. Díaz; O. Leyva; J. Trotman. *Etapas preliminar del secado solar del Carbón mineral a la intemperie en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas*. Informe de investigación, 2010. 10 p.
 56. Likov A. Application of irreversible thermodynamic methods to investigation of heat and mass transfer. *Journal of Heat and Mass Transfer*, 1966, 9: 139-152.
 57. Likov, A. *Teoría del secado*. 2 ed. Moscú: Editorial Energía, 1968.
 58. Miranda, J. Composición y conjugación de métodos de determinación de humedad de la industria del Níquel. *Minería y Geología*, 1996, 13(2): 39-45.
 59. Montes, E.; R. Torres; R. Andrade; O. Pérez; J. Marimon ; I. Meza. Modelado de la cinética de secado de Ñame en capa delgada. *Ingeniería e investigación*, 2008, 28(2): 45-52.
 60. Morsetto, J.; A. Lema; M. Pontin; G. Paisio. Estudio preliminar sobre la cinética de secado para Perejil en condiciones de secado solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 2008, 12(8): 141-146.
 61. Pacheco, P; J. Suárez; E. Juliá. Secado solar de maderas. Perspectiva teórica.

- Tecnología Química*, 2006, 26(3): 71-75.
62. Philip, J.; A. De Vries. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Trans. Am. Geophys Union*, 1957, 38(2): 222-232.
 63. Picado, A.; R. Mendieta; J. Martínez. Cinética de secado de la Levadura Cervecera. *Revista Científica Nexo*, 2006, 19(01):49-56.
 64. Rebinder, P. *Secado de materiales dispersos en la industria química*. Moscú: Editorial XIMIA, 1979. 123p.
 65. Retirado, Y.; A. Legrá. Modelación matemática del área de exposición y del volumen de las pilas de menas lateríticas expuestas a secado solar natural. *Minería y Geología*, 2011, 27(2): 84-108.
 66. Retirado, Y. *Comportamiento de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico*. Tesis de Maestría. ISMM. 2007. 71h.
 67. Retirado, Y.; E. Góngora; E. Torres; A. Rojas. Comportamiento de la humedad en el secado solar del mineral laterítico. *Minería y Geología*, 2007, 23(3): 1-19.
 68. Retirado, Y.; E. Góngora; E. Torres; M. Lamorú; B. Leyva. Transferencia de calor en el secado solar a la intemperie de menas lateríticas ferroniquelíferas. *Minería y Geología*, 2011, 27(1): 1-21.
 69. Retirado, Y.; E. Góngora; E. Torres; N. Hernández. *Cinética del secado solar del mineral laterítico empleado en la industria del níquel en Moa*. En: 5to Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente. Cienfuegos. 2008, ISBN: 978-959-257-186-0.
 70. Retirado, Y.; E. Góngora; E. Torres; N. Hernández. Comportamiento de la adherencia en menas lateríticas sometidas a secado solar natural. *Minería y Geología*, 2009, 25(1): 1-11.
 71. Retirado, Y. 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. 2010, ISBN: 978-959-16-1216-8.
 72. Ribeiro, P. *Concepção e modelação numérica de secador solar para tratamento de efluente de processo de dessalinização*. Tesis Doctoral. Universidad Técnica de Lisboa, 2005.
 73. Ricaurte, C.; A. Legrá. Contribución al cálculo del área de la sección de la carga en

- los transportadores de mineral laterítico. *Minería y Geología*, 2010, 26 (3): 1-22.
74. Rudenko, K.; M. Shemajanov. *Eliminación de la humedad y el polvo*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1989. 352p.
75. Sacilik, K.; R. Keskin; A. Elicin. Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of Food Engineering*, 2005, 73(3): 231-238.
76. Salinas, C.; R. Ananias; M. Alvear. Simulación del secado convencional de la madera. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 2004, 6(1): 1-20.
77. Salinas, C.; R. Ananías; P. Ruminot. Modelación de las curvas de secado por alta temperatura de Pino. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 2008, 10(3): 207-217.
78. Sierra, R. *Optimización energética en el diseño de los transportadores de bandas utilizados en la industria del níquel*. Tesis Doctoral. ISMM. 2010. 98 h.
79. Sogari, N.; L. Saravia. Modelización de un secadero solar de maderas con circulación de aire por convección natural. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 2003, 7(1): 7-12.
80. Stewart, J. *Cálculo con trascendente tempranas*. 4 ed. La Habana: Editorial Félix Varela, 2009. 3 t.
81. Tijonov, A.; A. Samarky. *Ecuaciones de la física matemática*. Moscú: Editorial MIR, 1980. 824p.
82. Tiwari, G.; B. Sarkar. Experimental study of greenhouse Prawn drying under natural convection. *Agricultural Engineering International*, 2006, 8(16): 1-9.
83. Tiwari, G.; S. Kumar; O. Prakash. Evaluation of convective mass transfer coefficient during drying of Jaggery. *Journal of Food Engineering*, 2004, 63 (1): 219–227.
84. Torres, E.; Y. Retirado. Modelación matemática del transporte neumático del mineral laterítico en fase densa. *Minería y Geología*, 2007, 23(1): 1-31.
85. Treybal, R. *Operaciones con transferencia de masa*. La Habana: Edición Revolucionaria, 1985. 815 p.
86. Vinardell, J. *Implementación del secado solar natural de las menas lateríticas en las empresas niquelíferas cubanas*. Tesis de Maestría. ISMM. 2011. 63 h.
87. Whitaker, S. Simultaneous heat, mass and momentum transfer and theory of drying. *Heat Transfer*, 1977, 13 (2): 119-203.

Anexos

ANEXO 1

IMÁGENES DE LA APLICACIÓN INFORMÁTICA UTILIZADA EN LA OPTIMIZACIÓN DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LAS PILAS

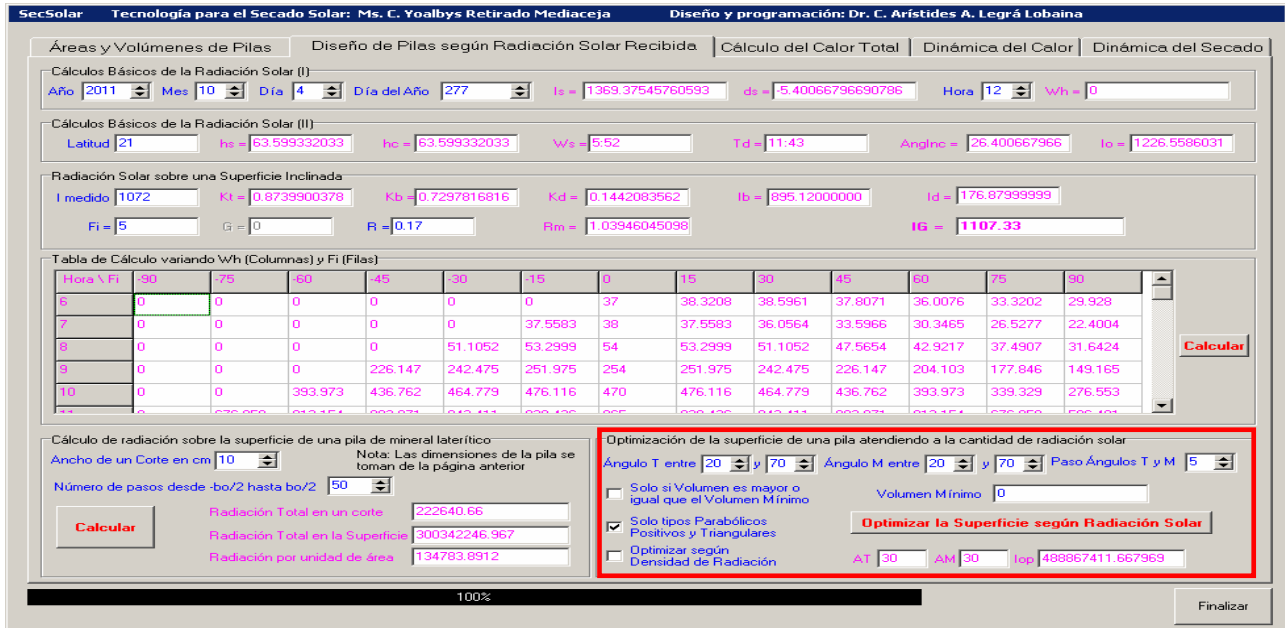


Figura 1. Ventana utilizada para la optimización de la sección transversal de las pilas atendiendo a la densidad de radiación y la radiación total.

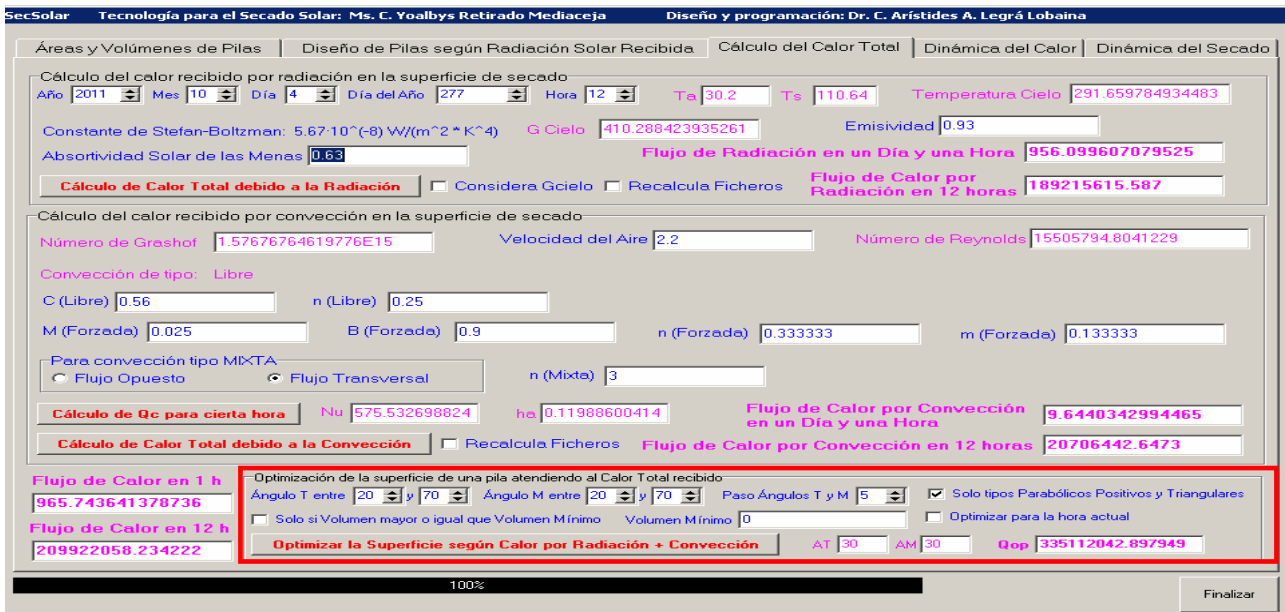


Figura 2. Ventana utilizada para la optimización de la sección transversal de las pilas atendiendo al calor total.

ANEXO 2

PARÁMETROS OBTENIDOS EN LA OPTIMIZACIÓN DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA PILA DE MENAS LATERÍTICAS

Tabla 1. Valores calculados para los dos criterios de optimización considerados.

Dimensiones de la superficie horizontal (largo x ancho): 140 m x 5,49 m							
AT (grados)	AM (grados)	DR (J/m ² · día)	RT (J/día)	AT (grados)	AM (grados)	DR (J/m ² · día)	RT (J/día)
20	20	598 576,32	485 471 621,20	55	45	388 937,80	426 255 493,01
25	20	598 652,95	487 041 100,78	55	50	339 659,23	405 016 333,08
25	25	581 058,74	488 623 627,13	55	55	291 975,00	387 957 817,31
30	20	595 181,70	487 094 118,27	60	20	530 678,19	461 494 555,97
30	25	578 915,22	488 526 352,48	60	25	506 376,20	457 575 363,55
30	30	555 509,63	488 867 411,66	60	30	481 680,37	454 064 884,32
35	20	583 352,14	480 949 373,91	60	35	453 584,75	448 459 162,56
35	25	563 517,12	478 867 615,74	60	40	421 460,48	440 283 757,61
35	30	533 696,57	471 497 409,03	60	45	383 106,34	427 245 978,64
35	35	493 282,09	458 945 337,11	60	50	339 583,10	410 266 344,19
40	20	573 993,01	477 240 543,17	60	55	290 830,83	388 887 045,05
40	25	554 553,65	475 547 430,38	60	60	245 158,33	373 685 977,38
40	30	529 494,90	471 554 672,25	65	20	515 428,64	455 131 137,25
40	35	493 579,48	461 188 023,62	65	25	491 863,43	452 608 799,79
40	40	455 950,71	453 621 953,78	65	30	464 671,14	447 145 363,33
45	20	563 910,32	473 292 955,83	65	35	435 457,94	440 298 192,71
45	25	545 815,24	473 070 846,91	65	40	404 227,22	432 269 922,01
45	30	522 536,87	470 425 542,53	65	45	370 479,17	422 794 496,19
45	35	491 829,58	463 747 893,19	65	50	326 923,11	403 220 622,87
45	40	453 850,63	453 654 425,70	65	55	280 218,19	380 410 096,28
45	45	413 449,54	445 623 031,30	65	60	228 064,76	350 119 456,06
50	20	552 010,17	468 186 338,71	65	65	175 518,25	316 522 196,81
50	25	531 493,59	466 295 602,49	70	20	502 317,26	451 584 030,56
50	30	506 258,14	461 769 795,55	70	25	476 568,97	448 005 532,36
50	35	476 482,24	455 030 215,78	70	30	448 926,91	442 646 982,16
50	40	437 415,06	441 722 338,84	70	35	420 604,40	436 832 794,26
50	45	390 774,34	423 357 465,14	70	40	389 778,36	428 884 245,42
50	50	337 347,07	399 981 191,25	70	45	356 663,40	419 104 496,58
55	20	540 268,91	463 635 939,98	70	50	318 520,24	404 166 805,50
55	25	519 226,23	461 862 359,39	70	55	277 598,79	386 427 789,33
55	30	494 601,41	458 075 224,73	70	60	229 776,98	359 152 870,50
55	35	465 385,35	451 512 586,57	70	65	178 402,08	324 388 643,63
55	40	430 655,70	441 411 116,91	70	70	134 783,89	300 342 246,96

Tabla 2. Valores calculados para los tres criterios de optimización considerados.

Dimensiones de la superficie horizontal (largo x ancho): 140 m x 5,49 m									
AT (grados)	AM (grados)	CT (J/día)	PVS (%)	VMS (m ³)	AT (grados)	AM (grados)	CT (J/día)	PVS (%)	VMS (m ³)
20	20	332 582 624,68	84,68	318,92	55	45	293 804 952,35	54,80	667,86
25	20	333 661 144,90	83,86	355,09	55	50	279 759 699,19	48,78	656,30
25	25	334 814 479,91	81,82	394,76	55	55	268 495 387,79	45,77	676,29
30	20	334 105 021,86	81,97	379,36	60	20	324 263 650,35	76,13	476,42
30	25	334 748 857,67	80,01	427,45	60	25	319 676 438,83	70,75	540,50
30	30	335 112 042,89	77,51	463,03	60	30	315 569 335,46	66,10	594,72
35	20	331 376 873,69	80,15	398,21	60	35	310 393 571,91	61,66	638,38
35	25	328 448 738,55	77,51	449,68	60	40	303 850 568,90	56,88	667,18
35	30	323 655 438,95	74,22	486,41	60	45	294 460 304,45	52,52	690,45
35	35	315 500 325,13	72,15	522,72	60	50	283 245 203,64	47,21	690,69
40	20	330 069 790,95	79,74	420,19	60	55	269 119 160,29	41,51	672,90
40	25	327 103 801,28	76,02	472,58	60	60	259 126 964,39	39,76	712,57
40	30	323 715 395,64	72,20	511,73	65	20	321 155 448,81	75,07	486,26
40	35	316 976 370,11	69,36	548,29	65	25	317 706 228,41	69,69	555,39
40	40	312 096 639,64	66,47	577,11	65	30	312 408 914,86	64,80	612,94
45	20	328 595 041,57	78,29	433,98	65	35	306 226 753,94	59,40	651,58
45	25	326 387 319,21	74,09	488,97	65	40	299 497 657,35	54,89	687,52
45	30	323 232 441,45	70,68	536,49	65	45	292 196 060,05	50,48	714,50
45	35	318 639 359,58	67,57	576,63	65	50	278 404 880,04	44,61	708,79
45	40	312 114 664,68	63,53	600,25	65	55	263 262 500,06	39,11	694,97
45	45	306 917 583,91	62,63	648,01	65	60	243 091 230,83	33,58	666,31
50	20	326 505 284,39	77,52	449,20	65	65	220 608 568,41	29,39	652,05
50	25	323 146 356,47	73,32	510,32	70	20	320 044 251,81	74,42	498,16
50	30	318 353 169,93	68,96	556,56	70	25	316 069 425,51	69,13	573,71
50	35	312 940 857,76	65,42	598,34	70	30	310 873 365,16	63,52	630,53
50	40	304 024 882,97	60,99	622,32	70	35	305 491 503,70	58,45	678,29
50	45	291 906 426,71	56,79	639,50	70	40	298 733 005,66	53,37	712,97
50	50	276 361 462,78	50,69	625,09	70	45	290 993 609,18	48,70	741,68
55	20	324 667 532,04	76,76	462,99	70	50	279 757 226,85	43,34	747,84
55	25	321 224 561,52	72,06	526,36	70	55	267 197 598,25	38,26	745,83
55	30	316 977 220,31	67,53	576,50	70	60	249 078 382,34	32,88	724,05
55	35	311 285 407,30	63,20	616,14	70	65	225 912 807,72	27,92	696,44
55	40	303 790 003,35	58,79	644,38	70	70	209 922 058,23	27,51	782,03

Simbología empleada en las Tablas 1 y 2 del Anexo 2DR: densidad de radiación; J/m² · día.

RT: radiación total; J/día.

CT: calor total; J/día.

PVS: porcentaje de volumen de mineral secado; %.

VMS: volumen de mineral secado; m³.