



REPUBLICA DE CUBA
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
«Dr. Antonio Núñez Jiménez»
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECHANICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA

**COMPORTAMIENTO DE LA HUMEDAD DURANTE EL
SECADO SOLAR DEL MINERAL DE PINARES DE
MAYARÍ**

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO METALURGICO

Luís Rodríguez Hernández

Moa: 2013



REPUBLICA DE CUBA
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
«Dr. Antonio Núñez Jiménez»
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECHANICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA

**COMPORTAMIENTO DE LA HUMEDAD DURANTE EL
SECADO SOLAR DEL MINERAL DE PINARES DE
MAYARÍ**

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO METALURGICO

Autor Luís Rodríguez Hernández

Tutores: Instructor, Ing. Crispín Sánchez Guillé
Asistente, Ing. Lianis de los Ángeles Columbié Lamorú, M.Sc.

Moa: 2013

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: **Luís Rodríguez Hernández**, autor de este trabajo y mis tutores, el Ing. Crispín Sánchez Guillé y la MSc. Lianis Columbié Lamorú, declaramos la propiedad intelectual del mismo al servicio del Departamento de Metalúrgica – Química del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

Luís Rodríguez Hernández

Ing. Crispín Sánchez Guillé

M.Sc. Lianis Columbié Lamorú,

Pensamiento

Precisamente es lo que más estamos sembrando, lo que más estamos El Futuro de nuestra patria tiene que ser necesariamente un futuro de hombres de ciencia, tiene que ser un futuro de hombres de pensamientos, porque sembrando son oportunidades a la inteligencia.

Fidel Castro Ruz

Agradecimiento

A mis hijas que con su sonrisa disipan ironías y negativas que la vida nos impone.

A mis amigos y compañeros de penurias.

A la revolución que es mi dueña.

A mis profesores, que son los máximos responsables de que hoy, gracias a sus dedicaciones y esfuerzo este aquí, convirtiéndome hoy en alguien más útil.

Dedicatoria

A mi familia y amigos.

A la revolución Cubana.

A los que utilizan la ciencia para el bienestar social y no para enriquecerse.

RESUMEN

En la Empresa Comandante René Ramos Latour, el contenido elevado de humedad en la materia prima mineral incide en el aumento del consumo de combustible en los secadores durante el secado térmico. Se evaluó de forma experimental la humedad durante el secado solar del mineral laterítico a la intemperie por dos alternativas: secado por escurrimiento y secado en la plataforma de hormigón al oeste del depósito exterior. El método de análisis de la humedad utilizado fue el de diferencias de pesadas. El estudio demostró que la alternativa de mejores resultados fue el secado solar en la plataforma de hormigón al oeste del depósito exterior, donde se obtuvo una reducción de la humedad alrededor de 11,8 % y un consumo de combustible de 29,89 kg/t lo que representa un ahorro de 7 165 459 CUC al año.

ABSTRACT

At the company Comdte René Ramos Latour, the elevated humidity content in the raw material mineral affects the increase of the fuel consumption in the dryers during the thermal drying. The humidity was evaluated outdoors in experimental form during the solar drying of the laterític mineral by two alternatives: drying by draining and drying in the concrete platform, at the west of the outer deposit. The method of analysis of the humidity used was of weight differences. The study demonstrated that the alternative of better results was the solar drying at the concrete platform at the west of the outer deposit, where we obtained a reduction at the humidity around 11, 8 % and fuel consumption of 29,89 kg/t what represents a saving of 7 165 459 CUC per year.

ÍNDICE	PAG
INTRODUCCIÓN	1
1 MARCO TEÓRICO	3
1.1 GENERALIDADES DEL PROCESO DE SECADO.....	3
1.2 ESTADO DEL ARTE	4
1.2.1 <i>Trabajos relacionados con el proceso de secado</i>	4
1.2.2 <i>Trabajos relacionados con el secado de las menas lateríticas</i>	6
1.2.3 <i>Factores fundamentales que intervienen en el proceso de secado solar</i>	11
1.3 CONCLUSIONES PARCIALES.....	13
2 MATERIALES Y MÉTODOS	14
2.1 MÉTODOS EMPLEADOS EN LA INVESTIGACIÓN.....	14
2.2 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	14
2.3 CARACTERÍSTICAS DEL MINERAL.....	16
2.3.1 <i>Composición química del mineral de Pinares de Mayarí</i>	16
2.3.2 <i>Composición granulométrica del mineral de Pinares de Mayarí</i>	16
2.4 MUESTREO DEL MINERAL PARA CARACTERIZAR	17
2.4.1 <i>Toma de muestra para determinar la humedad</i>	17
2.4.2 <i>Toma de muestra para determinar la composición química y mineralógica del mineral</i>	18
2.4.3 <i>Secado</i>	18
2.4.4 <i>Cuarteo</i>	18
2.5 EQUIPAMIENTO EMPLEADO EN LA INVESTIGACIÓN	19
2.6 ALTERNATIVAS PROPUESTAS PARA EL SECADO DE MINERAL	20
2.6.1 <i>Secado por escurrimiento en los depósitos P0 y P1 en pilas estáticas y P4 en pilas removidas</i>	21
2.6.2 <i>Secado en el depósito de hormigón al oeste del depósito exterior</i>	22
2.7 CONCLUSIÓN PARCIAL.....	23
3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	24
3.1 PRUEBAS REALIZADAS AL MINERAL ANTES DE APLICAR LAS VARIANTES	24
3.1.1 <i>Secado solar de pequeñas muestras de mineral</i>	24
3.1.2 <i>Secado solar de pequeñas pilas con diferentes alturas</i>	25
3.2 SECADO DE PILAS POR ESCURRIMIENTO (ALTERNATIVA 1).....	27
3.2.1 <i>Secado de pilas estáticas por escurrimiento</i>	27
3.2.2 <i>Secado de pilas removidas diariamente por escurrimiento</i>	28
3.3 SECADO DE MINERAL EN EL DEPÓSITO DE HORMIGÓN AL OESTE DEL DEPÓSITO EXTERIOR (ALTERNATIVA 2)	29
3.3.1 <i>Comportamiento de la humedad del mineral en las alternativas analizadas</i>	29
3.4 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL PROCESO DE SECADO OBTENIDOS	30
3.5 VALORACIÓN ECONÓMICA	31
3.5.1 <i>Secado por escurrimiento en los depósitos P0 o P1 en pilas estáticas</i>	31
3.5.2 <i>Secado por escurrimiento en los depósitos P0 o P1 en pilas removidas</i>	32
3.5.3 <i>Secado por escurrimiento en el depósito P4</i>	32
3.5.4 <i>Secado en el depósito de hormigón</i>	33
3.5.5 <i>Comparación de las alternativas de secado estudiadas</i>	33
3.6 IMPACTOS SOCIALES.....	34
3.7 IMPACTOS AMBIENTALES	34
3.8 CORRESPONDENCIA ENTRE LA RELACIÓN COSTO – BENEFICIO ALCANZADA Y LA PREVISTA.....	35
3.9 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	35
CONCLUSIONES GENERALES	37
RECOMENDACIONES	38
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

La industria cubana del níquel se encuentra inmersa en dos grandes cambios: la modernización de sus plantas, con el objetivo de disminuir los costos de producción por tonelada de níquel, y el perfeccionamiento empresarial para hacerla más competitiva en el mercado internacional. Este último como proceso integral no puede soslayar el impulso tecnológico a partir de una aplicación consecuente de la ciencia y la técnica.

El proceso de secado del mineral consume el 23 % del total de la energía consumida por la empresa. En aras de disminuir el consumo de combustible se ha planteado aumentar la eficiencia del proceso de secado en los cilindros rotatorios aplicando previamente el secado solar (Retirado, 2007).

La búsqueda de una tecnología adecuada para el proceso de secado solar en la planta de preparación de mineral permitirá el desarrollo acelerado de la empresa y el logro de la misión de esta industria: incrementar y diversificar la producción de níquel y cobalto alcanzando los estándares internacionales de eficiencia metalúrgica, costos de producción y productividad que permitan maximizar los aportes a la economía (Quintana, 1999)

La preparación de los minerales lateríticos para el proceso extractivo carbonato amoniacal hasta el presente, se ha efectuado mediante el secado y la reducción de tamaño, logrando los niveles de humedad establecidos por diseño.

Actualmente en la Empresa Comandante René Ramos Latour el mineral que se somete a operación proviene de Pinares de Mayarí y tiene una humedad que oscila entre 36 y 37 %. Este mineral es trasladado mediante un transportador de 10,5 km de longitud, con una diferencia de altitud de 600 m hasta los vagones de ferrocarril para llevarlo a la industria.

La humedad promedio del mineral que se alimenta a la planta de secaderos de la Empresa René Ramos Latour es de 36,5 %, lo que provoca alto consumo energético y

problemas mecánicos en el equipamiento instalado, como tupiciones, derrames y otros.

Teniendo en cuenta los aspectos explicados anteriormente se propone como

Problema:

Alta humedad del mineral de entrada a los secaderos de la Empresa Comandante René Ramos Latour.

Objeto de investigación: Proceso de secado del mineral de entrada a los secaderos de la Empresa Comandante René Ramos Latour.

Objetivo general: Disminuir la humedad del mineral de alimentación a los secaderos por debajo del 33 % que permita disminuir el consumo energético a valores inferiores a 30 kg/t.

Hipótesis: Si se logra un proceso de secado que nos permita reducir por debajo de 33 % la humedad del mineral y el consumo específico de combustible por valores inferiores a 30 kg/t, se podrá obtener mejores resultados de productividad, calidad, eficiencia metalúrgica y un ahorro considerable de combustible.

Objetivos específicos:

- Realizar el análisis bibliográfico sobre el proceso de secado de mineral laterítico que permita el establecimiento del estado del arte de la temática.
- Caracterizar la materia prima que entra al proceso de secado en la Empresa René Ramos Latour.
- Realizar el estudio del comportamiento de la humedad del mineral en su recorrido hasta ingresar en la industria que permita la obtención de una base de datos.
- Realizar el estudio de factibilidad técnico – económica de la variante escogida para secar el mineral.

1 MARCO TEÓRICO

Desde la puesta en marcha de la Empresa Comandante René Ramos Latour con un proceso de lixiviación con carbonato amoniacal conocido como proceso CARON, se introduce un mineral con elevada humedad que aumenta el consumo energético en los secaderos afectando la eficiencia de la industria.

El proceso de secado del mineral que consume alrededor del 23 % del total de la energía consumida por la empresa, es un tema que ha sido abordado por diferentes investigadores. En este capítulo se realizará el análisis y revisión bibliográfica con relación al estado actual del proceso de secado solar del mineral laterítico con el objetivo de realizar un análisis crítico de los mismos y establecer puntos comunes con la presente investigación.

1.1 Generalidades del proceso de secado

El exceso de humedad contenida en los materiales puede eliminarse aplicando métodos mecánicos como sedimentación, filtración, escurrimiento, centrifugación, sin embargo, la deshidratación más completa se obtiene evaporando la humedad y eliminando los vapores formados, es decir, mediante el secado.

Por su esencia física el secado es un proceso difusivo complicado, cuya velocidad se define por la velocidad de difusión de la humedad desde el interior del material a secar hacia el medio ambiente. La deshidratación por secado se reduce a la transferencia de calor y de sustancia (humedad) desde dentro del material a la superficie y su transporte desde la misma al medio ambiente. El secado es la combinación de los procesos de intercambio de calor y transferencia de masa.

El proceso de secado, tiene características tecnológicas en el cual juega un papel principal la forma en que se encuentra la humedad en el material, lo que determina la ocurrencia del mismo. Es un proceso tecnológico ante el cual las características estructurales, tecnológicas y bioquímicas de los materiales poseen una importancia primordial, pues la teoría de secado no es solamente la evaporación de la humedad

contenida en el sólido, sino el estudio de las formas de enlace que posee la humedad en los materiales.

En las regiones industrializadas el bajo costo de combustible permitió hace varias décadas el desarrollo de procesos de secado artificial a gran escala basados en el uso de combustibles. En los últimos años, la escasez y el elevado precio de éstos han despertado un nuevo interés en el secado solar, tratando de desarrollar diversas técnicas que permitan solucionar los problemas relacionados con el proceso secado.

1.2 Estado del arte

1.2.1 Trabajos relacionados con el proceso de secado

Lykov (1954), demostró experimentalmente que el proceso de secado depende del mecanismo de transporte de la humedad en el interior del sólido bajo la acción de un gradiente térmico, de la energía de vaporización y de la difusión del vapor desde la superficie del material hacia los alrededores, a través de la capa límite. Este descubrimiento es válido para el secado de los materiales capilaroporosos, grupo al que corresponde el mineral laterítico según la clasificación dada por Kasatkin (1987).

Las fuerzas capilares que causan el transporte del líquido en términos de gradientes del contenido de humedad y temperatura fueron estudiados por Philip et al (1957) y aunque el trabajo se realizó para diferentes condiciones de experimentación en el mismo se indican los elementos a considerar en el estudio experimental del proceso.

En Cuba se han desarrollado diferentes investigaciones relacionadas con el secado de materiales y productos alimenticios tales como: café, cacao, cebolla, madera, cemento, zeolita, entre otros, todos con resultados satisfactorios para cada uno de estos materiales. Dentro de ellos se puede destacar el trabajo desarrollado por Novoa et al. (1995) Para el secado de zeolita a escala de laboratorio, en este se obtienen ecuaciones empíricas que describen el comportamiento de la cinética del secado del producto siguiendo el modelo propuesto por Hall (1983), obteniendo además, los valores de humedad de equilibrio para diferentes temperaturas y humedad inicial; finalmente con todos los resultados alcanzados realizaron un software para simular el proceso y predecir su comportamiento bajo determinadas condiciones de operación.

Todo lo anterior es aplicable al secado de materiales de forma estática con régimen de temperatura constante. En el secado solar de los materiales a la intemperie estas condiciones no se cumplen debido a que el proceso depende de los parámetros

termofísicos del sólido objeto de secado y de los climatológicos de la región que varían aleatoriamente y no pueden ser preestablecidos, debido a esto los mecanismos de transferencia de calor y masa se manifiestan de forma compleja, difícil de predecir a través del secado estático con regímenes de temperatura constante. De los aspectos anteriores se deduce la necesidad de estudiar los principales trabajos científicos referidos al proceso con velocidad de secado decreciente.

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 de café sigue esencialmente el mismo camino 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 la mismas, con los del proceso en secaderos convencionales.

En este mismo año 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 grano.

Todd (2001), que detalla un programa para la inversión en el secado de madera cita dos procesos de secado comparando cada uno de ellos con las diferentes ventajas y desventajas que estos presentan.

Ya en el 2002 Bergues et al. 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.

Pasado dos años de su investigación Fonseca et al. (2002) presentan los resultados de las pruebas cinéticas de un secador solar con cubiertas de polietileno. Se experimentó con semilla de maíz, soya y calabaza, obteniéndose resultados satisfactorios. De estas pruebas se pudo determinar que el secado de 3 kg/m² día de semillas en estos secadores es una solución alternativa económicamente viable para el secado de semillas en Cuba.

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 m² 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.

1.2.2 Trabajos relacionados con el secado de las menas lateríticas

El secado solar ha sido abordado por diferentes investigadores (Sherwood, 1936; Lykov, 1968; Knoule, 1968; Strumillo, 1975; Perry et al., 1985), sin embargo no se encuentran referencias a experimentos sobre secado de material laterítico, por lo que depende de las propiedades termofísicas de difícil determinación, a lo que se une la influencia que ejercen las condiciones climatológicas donde se encuentra el depósito de la materia prima mineral sometida a secado (Retirado, 2007).

Por otra parte, la mayor experiencia en el secado solar se ha alcanzado para materiales unicomponentes que son de baja complejidad, pues los multicomponentes exigen el conocimiento y control de numerosos factores involucrados en el proceso.

Relacionado con el secado de mineral en la industria del níquel 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.

Los resultados de los análisis demostraron la efectividad del método de reflexión neutrónica sobre el método tradicional y se demostró además, que el proceso de secado en los hornos de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” es

excesivo y desvirtúa la interpretación del balance de masa entre la mina y el taller de preparación de mineral, también es extensivo a la empresa “René Ramos Latour” porque son manifestaciones similares de sobresecado que implica un mayor consumo de combustible e inestabilidad en el secado a nivel de secadero rotatorio.

Torres (1999) y Torres et al, (2000) investigan el comportamiento del arrastre de partículas finas en los gases durante el secado de la mena laterítica en uno de los secaderos rotatorios en la Empresa Ernesto Che Guevara en condiciones normales de operación, en otro secadero eliminaron los levantadores sectoriales en el último tercio del equipo y analizaron en ambos la influencia de los gases residuales provenientes de la planta de horno de reducción, luego obtienen la correlación entre la velocidad de los gases en el interior del cilindro, el contenido de humedad de los gases y el arrastre de partículas.

Investigaciones recientes (Estenoz et al., 2003b; Santos, 2005; Ramírez, 2006; Romero, 2006) plantean que durante el secado solar la humedad del material laterítico depende de varios factores, entre los que se destacan: masa de mineral a secar, composición mineralógica, temperatura del medio ambiente, humedad relativa, radiación solar, precipitaciones y velocidad del viento, teniendo en cuenta las variaciones climatológicas frecuentes que caracterizan a la región de Moa.

Sin embargo, se desconoce en qué medida influye cada uno de estos parámetros en el contenido de humedad.

Aldana et al. (2004) analizan los problemas que limitan la productividad de los secaderos de menas lateríticas en la empresa Ernesto Che Guevara, 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; Estenoz y Pérez, 2001, Retirado, 2007).

Un año más tarde Estenoz et al. (2005) refiere que en Brasil la empresa Tocantim S:A maneja 2,4 millones de toneladas de minerales lateríticos en depósitos mineros de secado solar, para reducir la humedad del mineral en 4 % y elevar la homogenización de los flujos de salida de las minas a 75 – 78 grados. También expone que en Filipinas 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.

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 obtiene la velocidad de secado para las condiciones de intemperie, luego establecen los modelos estadísticos que relacionan la humedad final con los restantes parámetros que influyen en el proceso. Otros resultados satisfactorios relacionados con el estudio experimental del proceso con mena laterítica son reportados por diferentes investigadores (Santos, 2005, Ramírez, 2006, Romero 2006, 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.

En el mismo año Retirado et al. (2009) estudian 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 Ferróniquel Minera S.A. Al analizar la variación del contenido de humedad del mineral comprobaron que se redujo entre 4,92 y 10,13 %. De lo anterior se infiere que las potencialidades energéticas de la región permita la aplicación del proceso objeto de estudio a otros materiales con características similares a las menas lateríticas investigadas.

Se conoce de prácticas internacionales que el manejo reiterado de las menas lateríticas en los depósitos de secado solar influye positivamente en la reducción de la humedad, el desmenuzamiento y la homogenización del mineral (estenoz et al. 2005).

En Cuba el referido proceso se desarrolla en la empresa Ernesto Che Guevara y René Ramos Latour, pero durante la implementación del mismo existen dificultades que limitan la obtención de eficiencias racionales en el mismo. En general se someten las menas lateríticas al secado a la intemperie y no se conoce el potencial de secado de las regiones en el momento de la exposición del mineral y por tanto no se tiene la certeza de la variación de humedad que puede experimentar el producto y del tiempo que se requiere para reducir su contenido de humedad desde un valor inicial a otro final.

En ambas entidades productivas el secado solar natural se implementa de forma complementaria empírica sin simulaciones matemáticas previas que permitan inferir la factibilidad técnica y económica de su implementación. Lo anterior es consecuencia, entre otros factores, de la ausencia de los modelos matemáticos apropiados para el cálculo de los parámetros fundamentales del proceso.

Retirado et al (2007) evaluaron de forma experimental la humedad durante el secado solar del mineral laterítico a la intemperie. El método de análisis utilizado fue el de diferencias de pesadas y se empleó la regresión lineal múltiple para establecer los modelos matemáticos de las masas de trabajo.

El material laterítico se dispuso en forma de pilas para facilitar el drenaje del agua y como variables investigadas se tuvieron en cuenta la masa del mineral a secar y humedad final. Se procedió a remover las pilas de un lado a otro, siempre en una misma dirección (de este a oeste) en condiciones meteorológicas normales, según procedimiento de Estenoz et al. (2003). Para determinar el contenido de humedad se tomaron muestras de las capas superficiales de las pilas cuatro veces al día (8:00 AM; 10:00 AM; 2:00 PM y 4:00 PM).

Durante el estudio se demostró que los parámetros climatológicos más influyentes en el secado solar del mineral laterítico son la temperatura del medio ambiente, las precipitaciones, la velocidad del viento y la temperatura del punto de rocío. Con la implementación del secado solar solo se puede reducir la humedad físico-mecánica ligada al mineral, confirmado mediante los análisis térmicos diferenciales aplicados a muestras de perfiles lateríticos. Con el secado solar se redujo en un 13 % el contenido de humedad del material, siendo el tiempo de secado de 102 y 51 horas para las pilas 1 y 2, respectivamente y quedaron establecidos los modelos.

El secado solar del mineral de Pinares de Mayarí fue estudiado por Sánchez (2008), a partir de cuatro pruebas de secado solar durante 12 días

La primera prueba consistió en una pila piramidal de 2700 mm de altura y diámetro de la base de 7800 mm, a la misma se le midió la temperatura y se tomaron muestras en la superficie, a 100 mm, 200 mm y 300 mm de profundidad en los lados *oeste* y *este*, durante 12 días, además se tomó muestras a una altura de 1000 mm de la base de la pirámide de forma horizontal, a 300 mm, 600 mm, 900 mm, 1200 mm y 1500 mm de profundidad, el último día, para ver la humedad del mineral.

En la segunda prueba la pila fue rectangular de 300 mm de altura, 1000 mm de ancho y 3000 mm de largo, a la misma se le tomó temperaturas y muestras en la superficie, a 100 mm, 200 mm y 300 mm de profundidad durante 12 días.

La tercera prueba estuvo formada por cinco pilas rectangulares de 400 mm de altura, 1000 mm de ancho y 3000 mm de largo, a la misma se le tomó temperaturas y muestras en la superficie, a 100 mm, 200 mm y 300 mm de profundidad durante 12 días.

La cuarta prueba estuvo formada por cinco pilas rectangulares de 400 mm de altura, 1000 mm de ancho y 3000 mm de largo, a la misma se le tomó temperaturas y muestras en la superficie, a 100 mm, 200 mm y 300 mm de profundidad, removiendo a las 3:00 pm todos los días, durante 12 días.

Para la primera prueba la humedad del mineral es mayor con la profundidad y en el lado *este*, comparándolo con el *oeste*.

En la segunda y tercera pruebas son pilas estáticas pero de diferentes alturas, dando como resultado que la pila de menor altura se seca más rápido.

Y en la cuarta prueba es donde se logran los mejores resultados porque se remueve diariamente a las 3:00 pm, consiguiéndose en los 12 días humedades menores de un 15 %, a pesar de llover durante el transcurso de la prueba.

Principio de trabajo del secado directo al sol

En el secado directo al sol, el producto está expuesto a la radiación solar, al viento y a otras condiciones ambientales, siendo los requerimientos energéticos de la operación suministrados por la energía solar, como fuente única de energía, el principio de trabajo del secado directo al sol se muestra en la figura 1, donde se aprecia que parte

de la radiación de onda corta incidente del sol es absorbida por el producto y parte es reflejada.

Una fracción de la radiación absorbida y el aire caliente que circula sobre el producto provoca el calentamiento superficial del mismo, dando lugar a la propagación de calor al interior, consiguiéndose elevar la temperatura del producto y producción de vapor de agua, y a la evaporación de la humedad superficial, lográndose de esta forma la reducción de la humedad del producto.

Sin embargo la otra fracción se pierde por la transmisión de la radiación de ondas largas al ambiente y por la conducción a través de los elementos en contacto con el terreno.



Figura 1. Principio de trabajo del secado directo al sol.

1.2.3 Factores fundamentales que intervienen en el proceso de secado solar

Aunque se sabe que las características meteorológicas no se pueden cambiar, se conoce cuáles tienen mayor incidencia en el secado de materiales directos al sol, como la temperatura del aire, la humedad relativa del aire, velocidad del viento, radiación solar, precipitaciones, etc.

Para el secado solar es importante conocer las características del producto, por lo que se tiene en cuenta el contenido inicial de humedad del mismo y el contenido final de humedad que se desea obtener. También en este punto tenemos que considerar el

estado físico como la forma, el tamaño, superficie, etc. y la sensibilidad a la temperatura.

Temperatura del aire

La temperatura desempeña un papel importante en el proceso de secado, conforme se incrementa su valor se acelera la eliminación de humedad dentro de los límites posibles.

Durante el proceso de secado, se origina un gradiente de temperatura con respecto al espesor del material, que tiende a disminuir conforme se reduce el contenido de humedad.

Humedad relativa del aire

La humedad relativa del aire se define como la razón entre la presión de vapor de agua presente en ese momento y la presión de saturación de vapor de agua a la misma temperatura.

Generalmente, se expresa en porcentaje (%) y a medida que se incrementa la temperatura del aire aumenta su capacidad de absorción de humedad y viceversa.

Cuando el aire contiene su máxima capacidad, se dice que se trata de un aire completamente saturado y por lo tanto incapaz de absorber más humedad, por el contrario, el aire no saturado tiene la posibilidad de absorber una cantidad determinada de humedad hasta lograr su saturación, mientras menor sea la humedad relativa mayor es la posibilidad de reducir la humedad del material.

Velocidad del aire

La velocidad del aire tiene como función principal, transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en el material facilitando la evaporación y transportar la humedad saliente del material.

La capa límite que existe entre el material a secar y el aire juega un papel importante en el secado. Cuando menor sea el espesor de la capa límite, más rápida será la remoción de la humedad. La forma de la corriente del aire es importante para la velocidad, una corriente turbulenta es mucho más eficaz que una laminar, pues la primera afecta en mayor forma la capa límite y el aire.

Durante las primeras etapas del secado, la velocidad del aire desempeña un papel muy importante, sobre todo cuando el material contiene un alto contenido de humedad. A mayor velocidad, mayor será la tasa de evaporación y menor el tiempo de secado y viceversa, si la velocidad del aire disminuye la tasa de evaporación

disminuye y el tiempo de secado aumenta. Por tal razón, para asegurar un secado rápido y uniforme es indispensable una circulación de aire fuerte y regular.

1.3 Conclusiones parciales

Los trabajos consultados demostraron que el secado solar es muy empleado en el mundo para el secado de diferentes materiales con buenos resultados.

Durante el estudio se demostró que los parámetros climatológicos más influyentes en el secado solar del mineral laterítico son la temperatura del medio ambiente, las precipitaciones, la velocidad del viento y la temperatura del punto de rocío.

La bibliografía consultada aborda procedimientos para la aplicación del secado solar de menas lateríticas con buenos resultados

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo describe los principales métodos científicos empleados durante la investigación además de mostrar las metodologías, materiales, aparatos y técnicas de análisis empleados en el estudio.

2.1 Métodos empleados en la investigación

El método de investigación es una especie de brújula en la que no se produce automáticamente el saber, pero que evita perderse en el caos aparente de los fenómenos, aunque solo sea porque indica como no plantear los problemas y como no sucumbir en el embrujo de los prejuicios predilectos.

Se pueden establecer dos grandes clases de métodos de investigación: los métodos lógicos y los empíricos. Los primeros son todos aquellos que se basan en la utilización del pensamiento en sus funciones de deducción, análisis y síntesis, mientras que los métodos empíricos, se aproximan al conocimiento del objeto mediante su conocimiento directo y el uso de la experiencia, entre ellos se encuentran la observación y la experimentación.

Para el desarrollo de la investigación se emplearon los siguientes **métodos**:

Método de investigación documental o bibliográfica para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.

Método de investigación experimental para obtener y caracterizar el objeto de estudio y sus principales regularidades.

Método inductivo – deductivo.

2.2 Metodología de la investigación

La experimentación juega un papel fundamental en todos los campos de la investigación y el desarrollo. El objetivo es obtener información de calidad, que permita desarrollar nuevos productos y procesos, comprender mejor un sistema (un proceso industrial, un procedimiento analítico) y tomar decisiones sobre como optimizarlo y mejorar su calidad, comprobar hipótesis científicas, etc.

Existen dos métodos de planificación de experimentos, el método estadístico y el método clásico. Los métodos de planificación estadísticos se utilizan generalmente cuando se requieren encontrar las variantes óptimas de un proceso complejo con gran número de variables y donde es necesaria la variación de diversos factores simultáneamente. Por otra parte, el campo del método clásico se limita a la obtención de las dependencias particulares entre dos o tres parámetros. Estas dependencias son interesantes, principalmente para la interpretación de planos (Mitrofanov, 1982).

Para esto se realiza la investigación en tres etapas fundamentales:

Etapas 1. Búsqueda bibliográfica y preparación de las condiciones para la experimentación.

Esta etapa incluye la revisión de la literatura existente, trabajos técnicos y de investigación del estado del arte de la temática que permita determinar los valores de composición química y física reportados del mineral de Pinares, así como comportamiento histórico de la humedad, alternativas propuestas para el secado de mineral laterítico que puedan ser adaptadas a las condiciones del mineral existente para la investigación.

Etapas 2. Estudio del comportamiento de la humedad del mineral en todo su recorrido hasta la industria.

En esta etapa se estudiará el comportamiento de la humedad del mineral que se alimenta a secaderos lo que incluye:

Toma de muestras representativas para el análisis químico (Ni, Co, Fe, Si, Mg, Mn, Cu, y otros elementos de interés) y físico (análisis de fases, y de humedad) del mineral a la entrada del transportador y a la entrada de los secaderos.

Estudio del comportamiento de la humedad del mineral en varios puntos del transportador y a la entrada de los secaderos de acuerdo al periodo establecido para que sea representativo el muestreo. Este estudio incluye el estudio de las condiciones climatológicas de la zona que pueden influir en el comportamiento de la humedad.

Análisis estadísticos de los resultados obtenidos con el uso de gráficos, tablas que permitan ilustrar los resultados.

Etapa 3. Estudio de propuestas de alternativas para el secado del mineral.

En esta etapa se analizarán dos alternativas de solución que permitan disminuir la humedad del mineral por debajo de 33 % y el consumo específico de combustible para valores inferiores a 30 kg/t para determinar la de mejores resultados.

2.3 Características del mineral

2.3.1 Composición química del mineral de Pinares de Mayarí

El mineral analizado se encuentra en el yacimiento de Pinares de Mayarí y corresponde al periodo del 7 al 29 de marzo de 2012, que se alimentó a la Empresa Comandante René Ramos Latour. El análisis químico demostró un alto contenido de hierro, sílice, cromo y aluminio presentes en este yacimiento, el níquel y el cobalto en el orden de 1,04 % y 0,13 % respectivamente. En menores cantidades se encuentran el manganeso, cinc, cobre y magnesio, como se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Composición química promedio del mineral de Pinares de Mayarí.

Composición química del mineral (%)									
Al	Cr	MgO	Mn	SiO ₂	Zn	Cu	Ni	Co	Fe
3,19	2,13	1,37	0,84	4,77	0,05	0,05	1,04	0,13	49,1

2.3.2 Composición granulométrica del mineral de Pinares de Mayarí

Al pasar las muestras de mineral por los tamices en forma consecutiva con abertura entre las mallas de 6,70, 4,75, 3,36, 0,147, 0,074 y 0,043 mm se obtienen los resultados presentados en la figura 2.2, donde se destaca que el 39 % del mineral tiene la fineza adecuada para el proceso de reducción sin la necesidad de pasarlo por los molinos, el 84 % de las partículas son menores de 3,36 mm y solo el 6 % son partículas superiores a los 6,70 mm

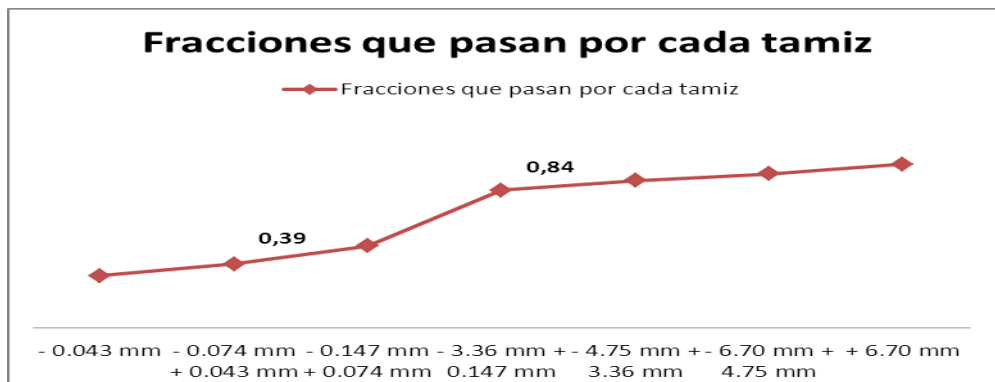


Figura 2.1. Análisis granulométrico del mineral de Pinares de Mayarí.

2.4 Muestreo del mineral para caracterizar

El muestreo del mineral se realizó como se presenta en la figura 2.2. Para la toma de una muestra representativa se tomaron de 15 a 20 kg puntualmente a lo largo de la banda transportadora de alimentación intermedia (P1) y a la entrada de la industria.

2.4.1 Toma de muestra para determinar la humedad

Las muestras tomadas para determinar la humedad del mineral fueron de 10 kg aproximadamente, de un área de 0,3 m por 0,3 m hasta dejar limpio el hormigón, las cuales se homogenizaron y se colocaron en una estufa en muestras de 3 kg con una temperatura de 105 °C a 110 °C hasta que el peso de la misma se mantuvo constante, indicando que su humedad es cero y de esta forma se determina la humedad en base húmeda.

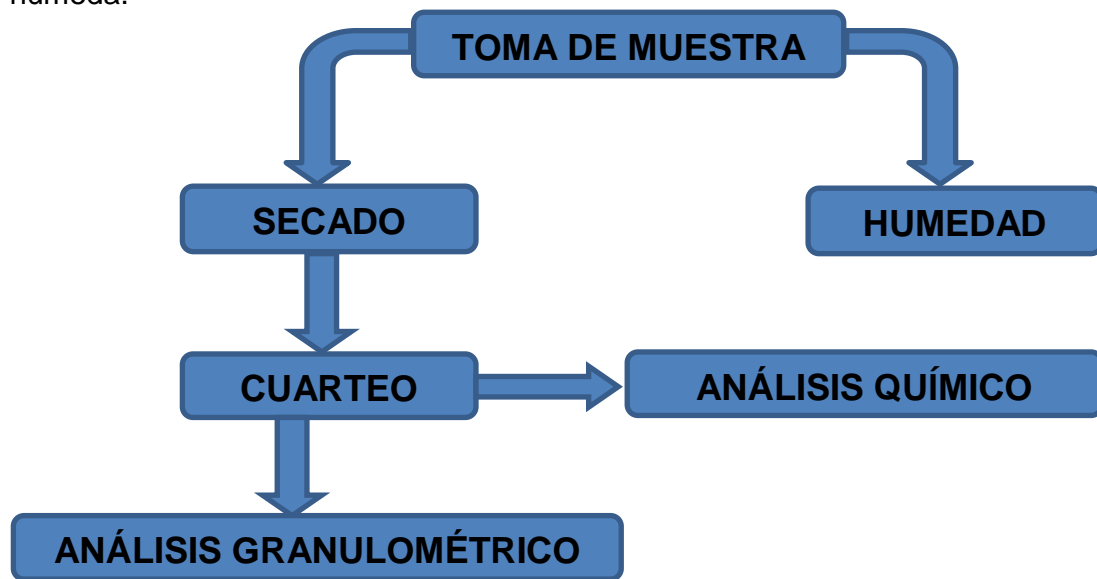


Figura 2.2. Esquema del muestreo realizado.

Las muestras fueron tomadas de forma puntual en diferentes lugares del transportador incluyendo la estación de carga de vagones (P4) que llegan al depósito exterior de la empresa y a la entrada de la industria.

Las muestras se tomaron cada 2 horas, en pomos de 100 mL y se enviaron al laboratorio de la unidad de proyecto de Nicaro del Centro de Investigaciones del Níquel, las cuales se analizaron por el método de determinaciones directas que implica medir la masa del producto y la masa seca correspondiente al eliminar el

agua evaporable contenida en él, aplicando calor a una temperatura de 105 °C a 110 °C hasta llegar a un peso constante de la muestra.

La cantidad de humedad presente en el mineral se expresa en base seca e indicada como porcentaje, como se presenta en la ecuación 2.1.

$$\% H = \frac{W_w}{W_d} = \frac{W_o - W_d}{W_d} \quad (2.1)$$

Donde:

% H : % de humedad del mineral en base seca. (kg de agua/kg de mineral seco)

W_w : Cantidad de agua en el mineral húmedo. (kg)

W_d : Peso del mineral seco. (Kg)

2.4.2 Toma de muestra para determinar la composición química y mineralógica del mineral

Para determinar la composición química y mineralógica del mineral es necesario secarlo y cuartearlo para lograr buenos resultados en el tamizado.

2.4.3 Secado

El material se sometió al proceso de secado en una estufa a la temperatura de 105 – 110 °C como se muestra en la figura 2.3.



Figura 2.3. Estufa de secado.

2.4.4 Cuarteo

El cuarteo se realizó de forma manual utilizando el método de cono y cuarteo, que consiste en mezclar el material para posteriormente apilarlo a la forma de un cono. Este se aplasta y se divide con una pala o espátula en forma de cruz (4 partes iguales). Se retiran 2 cuartos opuestos y los otros 2 restantes que forman la nueva

muestra, se vuelven a mezclar y el proceso se repite varias veces hasta obtener el tamaño apropiado de muestra (3 kg), como lo muestra la figura 2.4.

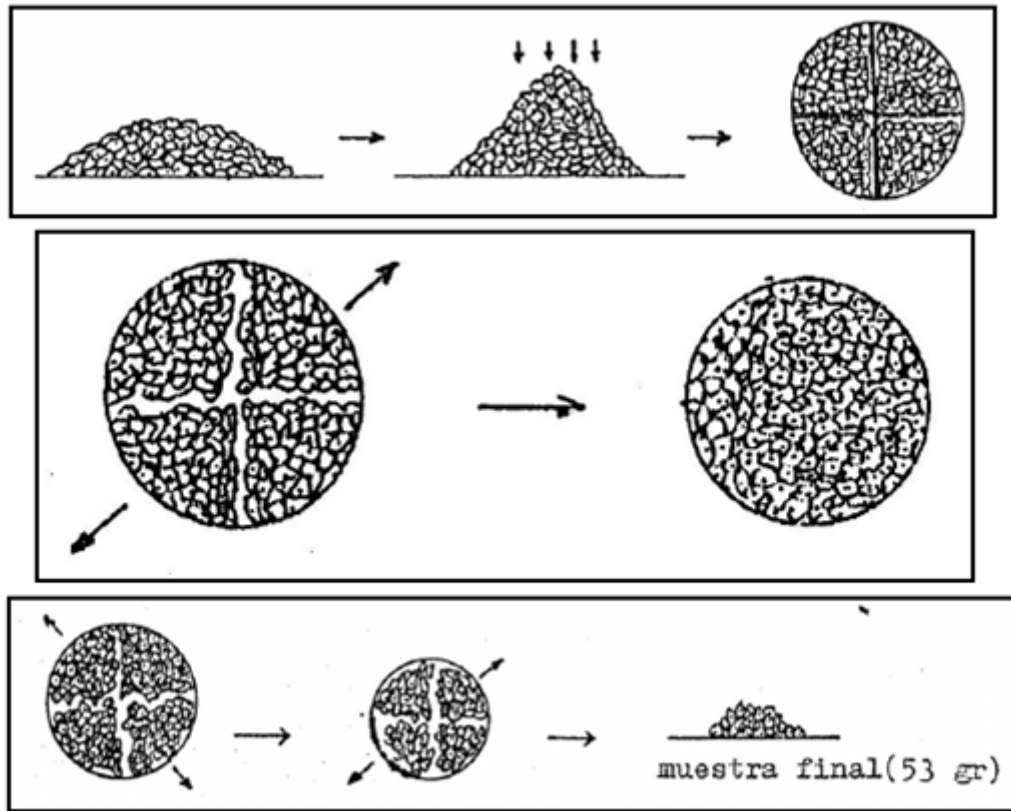


Figura 2.4. Método de cono y cuarteo.

Después que se obtiene la muestra necesaria se envía al laboratorio para obtener los resultados de la composición química que se muestra en la tabla 2.1 y la composición granulométrica se muestra en la figura 2.1.

2.5 Equipamiento empleado en la investigación

En la investigación para el traslado del mineral y preparación de las pilas se emplearon cargadores frontales sobre neumático, buldócer y camiones rígidos.

El comportamiento granulométrico del mineral se determinó usando un juego de tamices con tamaño de abertura 6,70 mm, 4,75 mm, 3,36 mm, 0,147 mm, 0,074 mm y 0,043 mm como se muestra en la figura 2.5.



Figura 2.5. Juego de tamices.

Las muestras se secaron en una estufa con una temperatura máxima de 200 °C, 220 V y un control de sensibilidad de ± 1 °C para el secado de las muestras (figura 2.3). Una balanza digital para la pesada de los reactivos y muestras que se muestra en la figura 2.6.



Figura 2.6. Balanza digital DENVER INSTRUMENT.

2.6 Alternativas propuestas para el secado de mineral

El mineral de Pinares de Mayarí en la actualidad después de extraerse y alimentarse al transportador, tiene una humedad que oscila entre 38 y 40 %, lo que dificulta las operaciones de alimentación en P-0 (transportador), donde se tupa la tolva inicial y hace que se pierda mineral de calidad con el rechazo y la descarga de los vagones en el depósito exterior de la empresa pues el mineral se queda adherido a los vagones y al llegar a la planta se tupen los alimentadores, lo que provoca inestabilidad en las operaciones y conlleva a altos consumos de combustible para la reducción de la humedad.

Por las condiciones climáticas tan desfavorables que existen en la mina (baja temperatura ambiente, humedad relativa alta y lluvias con frecuencia), proponemos como alternativa de secado: el secado por escurrimiento y el secado en la plataforma de hormigón al oeste del depósito exterior.

2.6.1 Secado por escurrimiento en los depósitos P0 y P1 en pilas estáticas y P4 en pilas removidas

Para realizar el secado por escurrimiento, en la mina se cuenta con tres depósitos denominados P0 (estación de criba y descarga de camiones), P1 (alimentación intermedia) y P4 (descarga a los vagones), donde existe espacio para depositar el mineral con posibilidades de continuar aumentando su capacidad. Los depósitos deben cumplir la condición que permita que el agua de escurrimiento de las pilas o la que cae por lluvias corran; por lo tanto la plataforma debe tener una ligera inclinación en la dirección que se realicen las pilas.

El secado por escurrimiento puede acelerarse removiendo las pilas, debido al movimiento del mineral que se encuentra en el interior hacia la superficie como se muestra en la figura 2.7.



Figura 2.7. Pilas removidas en el depósito P1.

Estas pruebas de escurrimiento del mineral de Pinares de Mayarí se realizaron en el punto P1, por donde se alimenta el transportador cuando no se alimenta por el punto P0. En este punto se depositaron de cuatro a seis camiones de forma consecutiva quedando una pila en forma de cordillera de 4,5 m de altura y un largo de 8 a 11 m.

Se comenzó a muestrear diariamente en la superficie y a 50 cm de profundidad de la pila a una altura de 1,5 m. Además se le quitó una sección diariamente, a la que se le

tomó una muestra después de revolverla. Las muestras se tomaron en pomos de 100 mL o 500 mL.

Después de depositado el mineral por los camiones en P1, al tomar las muestras se puede observar que diariamente hay un pequeño descenso de la humedad, pero más significativo en la superficie donde la acción de los vientos y los rayos solares son directos.

En el depósito de P4 el mineral procedente del transportador se almacena de la misma forma, en pilas en forma de cordilleras y se procederá a la alimentación de los vagones luego de un tiempo de secado, ya sea por la humedad del mineral o por las características físico-químicas del mismo.

Las condiciones del tiempo son importantes para que el proceso de secado y escurrimiento sean buenos, estas pruebas se realizaron en etapas donde prácticamente no llovió.

2.6.2 Secado en el depósito de hormigón al oeste del depósito exterior

Para el secado solar el mineral procedente de la mina que viene en los vagones es situado en el depósito de hormigón, el cual se esparcirá a todo lo largo y ancho del mismo, con una altura de 10 cm, sobre el cual inciden los rayos solares directamente y los vientos del área.

El mineral es regado con un cargador frontal o un buldózer sobre toda la superficie de hormigón a una altura de 10 cm. Se toma una muestra al regarlo (1:00 pm) y otra al recogerlo (4:00 pm). De esta forma se puede comprobar la reducción de la humedad en el día.

La muestra tomada para realizar la humedad del mineral fue de 10 kg aproximadamente, la cual se homogenizó y se colocó en una estufa 3,0 kg hasta que el peso de la muestra se mantiene constante, indicando que su humedad es cero y de esta forma se determina la humedad en base húmeda.

2.7 CONCLUSIÓN PARCIAL

Después de analizado este capítulo se llegaron a las siguientes conclusiones parciales:

Se determinaron las características químicas y granulométricas del mineral objeto de estudio y el equipamiento empleado.

La determinación de la humedad de las muestras y las propuestas de alternativas de secado del mineral.

3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos sobre el comportamiento de la humedad a través de las dos alternativas estudiadas y se considera las mejoras que implica esta investigación desde el punto de vista económico y medioambiental.

3.1 Pruebas realizadas al mineral antes de aplicar las variantes

3.1.1 Secado solar de pequeñas muestras de mineral

En la figura 3.1 se muestran de forma gráfica los resultados correspondientes al secado solar de cuatro muestras con diferentes masas de mineral, 20 g, 40 g, 60 g y 80 g. La humedad se determinó cada 1 hora a temperatura ambiente y los cálculos se hicieron en base húmeda.

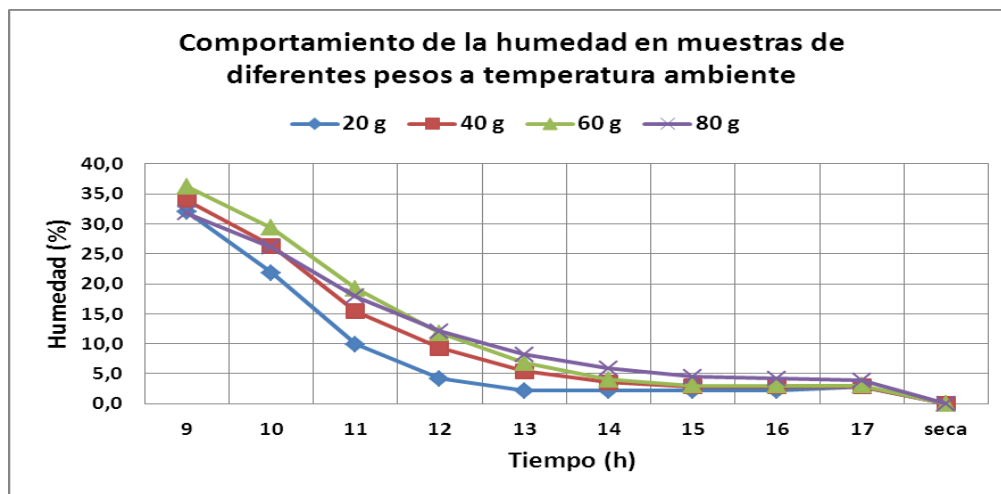


Figura 3.1. Comportamiento de la humedad de diferentes masas de mineral durante 8 horas y la temperatura ambiente.

A pesar de tomarse las muestras de un mismo lugar no tienen la misma humedad inicial. La muestra de 20 g tiene una humedad inicial de 32,0 %, la de 40 g es de 34,0 %, la de 60 g de 36,2 % y la de 80 g de solo 31,8 %, pero el proceso de secado como puede verse es diferente. La muestra de menor peso (20 g), se seca con mayor rapidez alcanzando una humedad constante de 2,2 % al cabo de la cuarta hora, las muestras de 40 g y 60 g alcanzan una humedad constante de 2,9 % y 3,0 % a las seis

horas respectivamente y la muestra de mayor peso (80 g) al terminar el experimento de 8 h continuaba disminuyendo su valor de humedad alcanzando valor mínimo de 4,2 %, por lo que es importante tener en cuenta la cantidad de mineral que se va exponer directamente al sol para el proceso de secado.

3.1.2 Secado solar de pequeñas pilas con diferentes alturas

Para observar el comportamiento de la humedad del mineral con el secado solar a una mayor escala, se realizaron pilas de mineral de diferentes alturas (3 cm, 4 cm, 5 cm y 6 cm) sobre el hormigón, con 0,3 m de ancho por 0,3 m de largo. A estas pilas se les realizó una prueba de humedad a las 8:00 am y a las 4:00 pm, con el objetivo de observar cómo se comporta la humedad con la altura de las pilas removidas y sin remover.

La figura 3.2 muestra el secado del mineral expuesto al sol durante 8 h sin remover con una altura de 3 y 4 cm respectivamente, comprobándose que mientras mayor sea la capa de mineral expuesta al sol en las mismas condiciones ambientales más difícil es la posibilidad de secado.

Ambas pilas inician con un mineral que tiene 29,4 % de humedad y terminan al cabo de las 8 horas con una humedad de 18,1 % y 21,0 % para las pilas de 3 y 4 cm respectivamente.

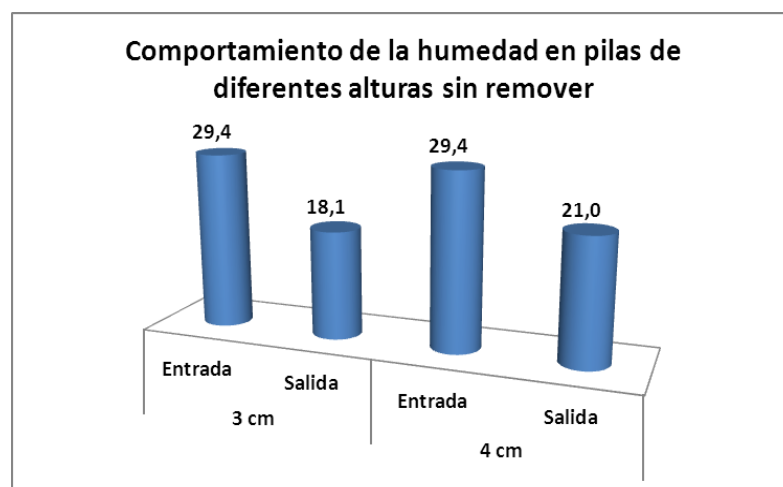


Figura 3.2. Humedad del mineral de pilas de mineral de 0,3 m de ancho y 0,3 m de largo con una altura de 3 cm y 4 cm expuestas directamente al sol.

Al exponer al sol durante 8 h pilas de mineral de 0,3 m de ancho y 0,3 m de largo con diferentes alturas (3 cm, 4 cm, 5 cm y 6 cm) y removerlas cada 2 horas, como se observa en la figura 3.3, la humedad desciende en 16,5 %, 13,3 %, 11,7 % y 9,7 % respectivamente, comprobándose que el espesor del mineral a secar es determinante en la reducción de humedad que se quiera lograr, por lo tanto entre mayor es el espesor o capa de mineral menor va ser la reducción de la humedad.

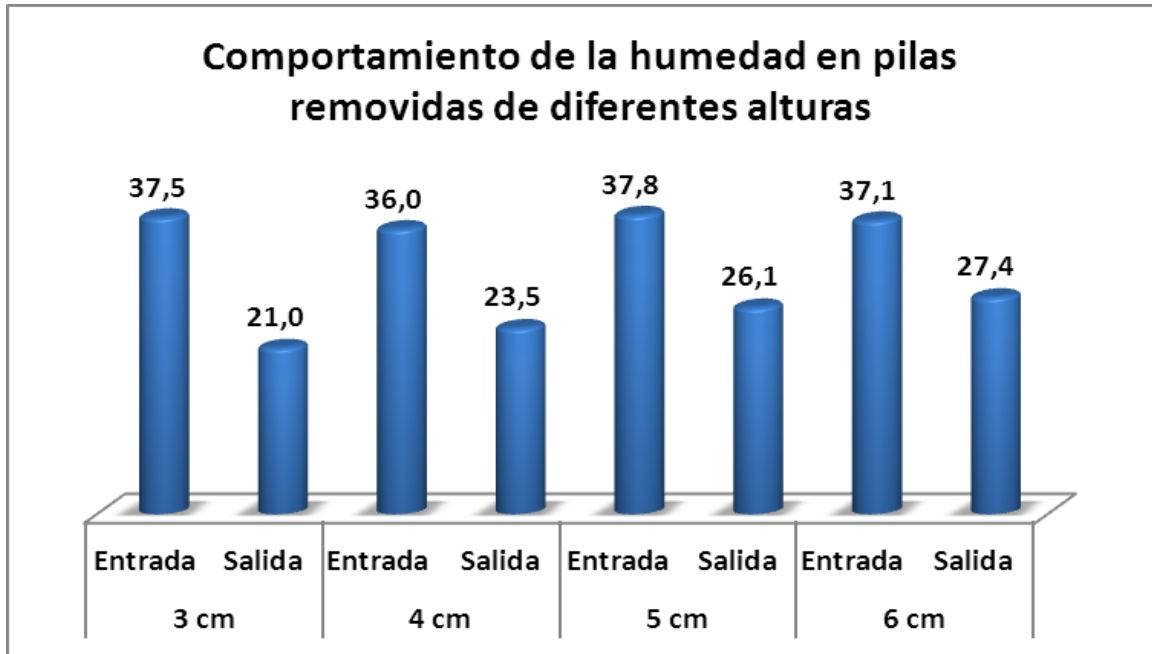


Figura 3.3. Comportamiento de la humedad en pilas de mineral de 0,3 m de ancho y 0,3 m de largo con una altura de 3 cm, 4 cm, 5 cm y 6 cm.

Al comparar las pilas de 3 cm y 4 cm de espesor sin remover y removida (Figura 3.4) se observa que a pesar de que estas últimas tienen una humedad inicial más alta el descenso es superior de un 16,5 % por 11,3 % en la pila de 3 cm sin remover, lo mismo ocurre en la pila de 4 cm cuando se remueve el mineral se logra un descenso en la humedad de hasta 13,3 % mientras que sin remover disminuye un 8,4 %.

Se puede observar además que en las pilas de 3 cm y 4 cm sin remover se logró una reducción de la humedad de 11,3 % y 8,4 % respectivamente, resultados similares a los logrados en las pilas de 5 cm de 11,7 % y 6 cm de 9,7 % removidas.

A pesar de que al remover el mineral se acelera el proceso de secado la altura o espesor del mineral es determinante en este proceso.



Figura 3.4. Comportamiento de la humedad en pilas removidas y sin remover de la misma altura.

3.2 Secado de pilas por escurrimiento (alternativa 1)

3.2.1 Secado de pilas estáticas por escurrimiento

La figura 3.5 muestra el comportamiento de la humedad promedio del mineral en pilas estáticas. En la superficie esta se reduce diariamente como promedio 3,2 % y en su interior la reducción media diaria es de 0,5 %.

Si se toma un mineral con 50 % de humedad y se coloca en pilas en forma de cordilleras en un lugar alto, con posibilidad que el agua corra y sin condiciones adversas del tiempo a los 20 días su humedad debe haber descendido hasta el 40 % y al cabo de un mes la humedad debe estar cerca de 35 %.

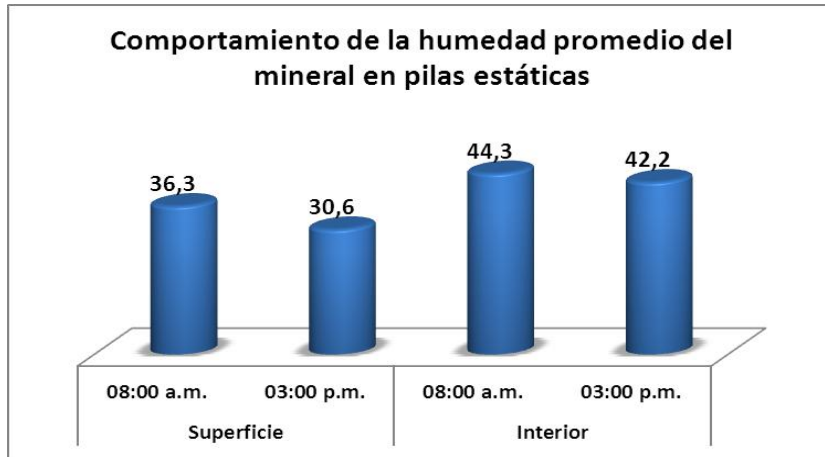


Figura 3.5. Comportamiento de la humedad promedio en pilas estáticas sometidas a secado por escurrimiento.

3.2.2 Secado de pilas removidas diariamente por escurrimiento

Cuando las pilas son removidas diariamente el proceso de secado se acelera, el mineral más húmedo se mezcla con el más seco de la superficie y cambia de posición aumentando la posibilidad de que el agua contenida en el mineral pase a la atmósfera con mayor facilidad, se puede apreciar que la humedad puede descender como promedio diario 2,5 %, a las 8:00 am se ve un descenso de 2,2 y por las tarde, 3:00 pm decrece en un 2,8 %.

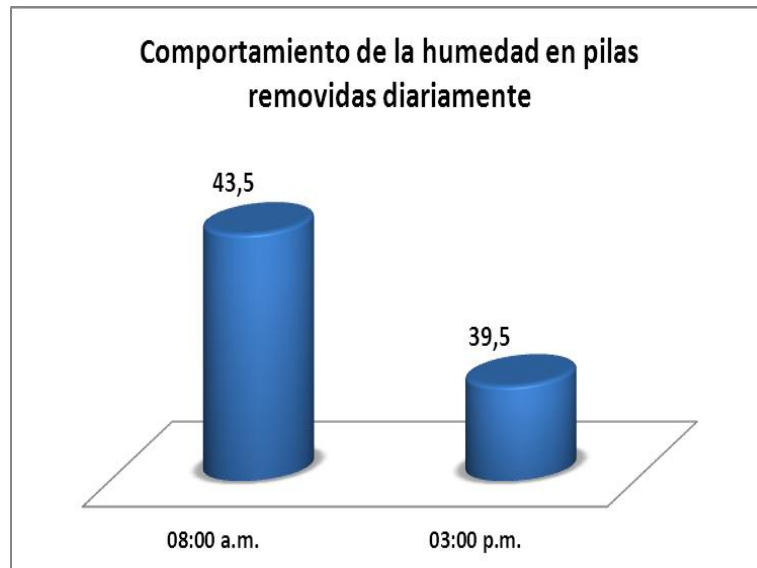


Figura 3.6. Comportamiento de la humedad en pilas removidas sometidas a secado por escurrimiento.

Por lo tanto si se parte de un mineral de 50 % de humedad moviendo las pilas diariamente y cambiándolas de posición al cabo de 10 días el mineral debe tener valores cercanos a 35 % de humedad.

3.3 Secado de mineral en el depósito de hormigón al oeste del depósito exterior (alternativa 2)

La figura 3.7 muestra que la humedad promedio del mineral a secar es de 33,5 % a las 8:00 am, al cabo de 5 h y después de removerlo había disminuido en 1,2 %. En las 3 h restantes el mineral disminuyó su humedad en un 4,1 % hasta 28,2 % debido al incremento de la radiación solar en ese momento del día, lo que concuerda con lo dicho por Retirado, 2007 que en la medida que aumenta la temperatura del medio ambiente se intensifica el proceso de secado del material.

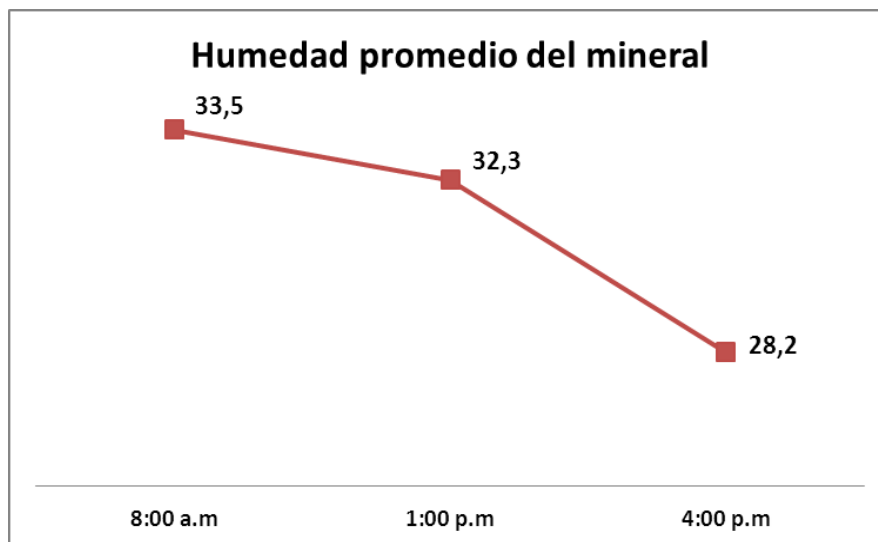


Figura 3.7. Humedad promedio del mineral en 8 h de trabajo.

3.3.1 Comportamiento de la humedad del mineral en las alternativas analizadas

Después de analizadas las dos alternativas planteadas para reducir la humedad del mineral, se observa en la figura 3.8 que a pesar de que en ambos depósitos de secado se remueve el mineral en el día, lo que favorece el proceso de secado en el depósito de hormigón ubicado al oeste del depósito exterior el mineral es mayor la disminución de la humedad debido a las condiciones climáticas existentes en el lugar además de la mejor ubicación del mineral en el mismo.

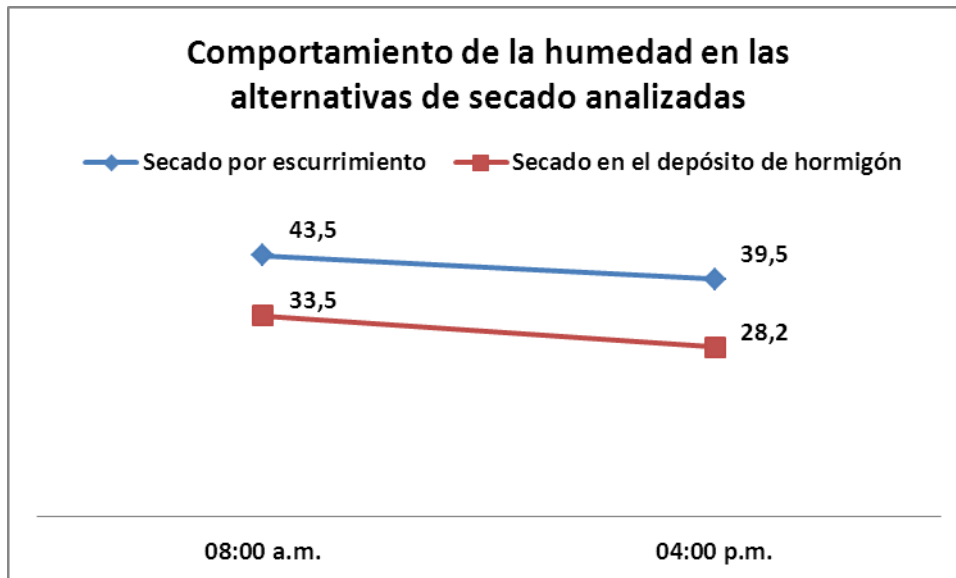


Figura 3.8. Comportamiento de la humedad del mineral en las alternativas analizadas.

Estos resultados obtenidos se probaron a nivel industrial con el objetivo de analizar la influencia que tiene la humedad en el consumo específico de petróleo en la empresa.

3.4 Validación de los resultados del proceso de secado obtenidos

La disminución de la humedad del mineral de entrada a la planta de secaderos provoca una disminución del consumo específico de petróleo y se observan efectos positivos en la productividad promedio diaria de la planta que tuvo un incremento desde 2958 t/día en enero de 2012 hasta 3635 t/día en junio del mismo año, como puede apreciarse en la figura 3.9.

En los meses de febrero y marzo se obtienen altos valores de humedad debido a las lluvias intensas ocurridas en ese periodo, por lo que la productividad no es tan elevada pero empieza su incremento paulatino hasta el mes de abril donde hay un disparo de esta variable debido a las elevadas temperaturas de ese periodo. Esto favorece el proceso de secado del mineral, pues los rayos solares son más intensos y ayuda en el descenso del consumo específico de petróleo.

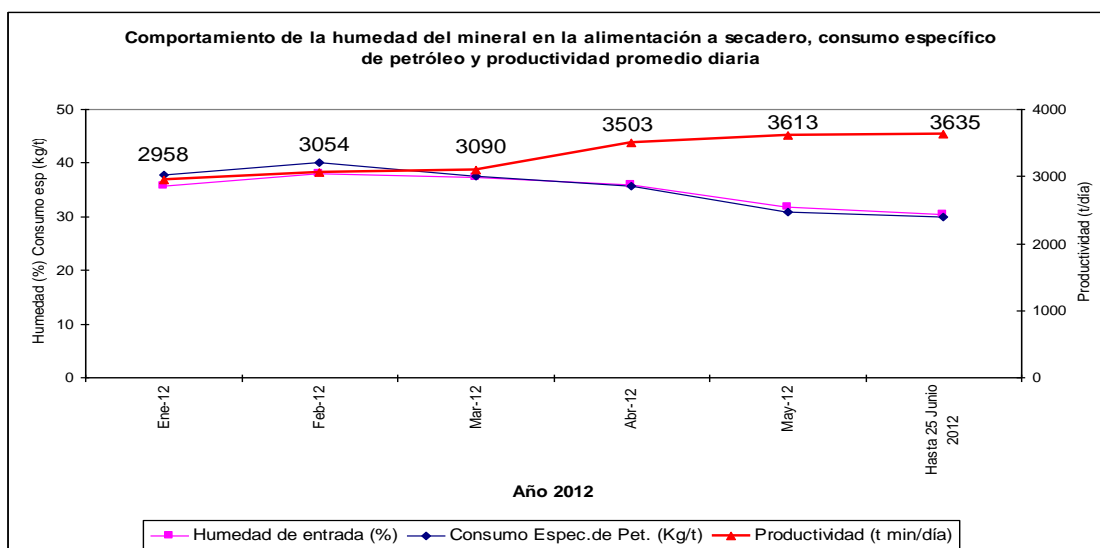


Figura 3.9. Influencia del comportamiento de la humedad del mineral en el consumo específico de petróleo y la productividad de la planta de secaderos.

3.5 Valoración económica

Para el análisis económico se tiene como referencia que el precio del crudo cubano es de \$ 439,50, el precio del diesel de \$ 0,99 y que el equipamiento con la modalidad de contrato de leasing incluye los servicios técnicos para garantizar las operaciones mineras (Mantenimiento, reparaciones, neumáticos, lubricantes, asistencia técnica, etc.)

3.5.1 Secado por escurrimiento en los depósitos P0 o P1 en pilas estáticas

En el secado por escurrimiento no hay gastos adicionales para formar las pilas porque se realiza con los camiones que traen el mineral de la mina, pero para el proceso de alimentación del transportador de banda deben emplearse dos cargadores y dos camiones.

Dentro de los gastos más significativos se encuentran los gastos por la adquisición de los equipos de \$ 1 674 074 al año incluido mantenimiento, reparaciones, neumáticos, asistencia técnica y otros, como se evidencia en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Costo de los equipos para los trabajos en el depósito de P0 o P1, para alimentar el transportador.

No.	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Costo total
1	Camiones rígidos	2	566 037	1 132 074
2	Cargador frontal sobre neumático	2	271 000	542 000
Total		4	837 037	1 674 074

Este tipo de tratamiento en estos depósitos debe ser para minerales con humedad superior a 37 % y cuando desciende un 6 % la inversión se recupera en solo 5,1 meses y las ganancias al año ascienden a \$ 3 924 200 como se evidencia en el anexo 1.

3.5.2 Secado por escurrimiento en los depósitos P0 o P1 en pilas removidas

De removerse el mineral diariamente la reducción de la humedad se lograría en solo 10 días y puede llegar hasta valores inferiores del 32 %, para lo cual se necesitaría 3 camiones y 4 cargadores, para un costo de inversión de \$ 2 782 111, como se muestra en la tabla 3.2.

Esta es una zona donde las condiciones climáticas existentes de bajas temperaturas y lluvias frecuentes no son muy favorables para el proceso de secado, pero de realizarse cuando las condiciones del tiempo sean favorables, no traería pérdidas porque no hay gastos extras ya que se normalizarían las operaciones y los equipos se parquean, aprovechando para realizar revisiones o mantenimientos.

Tabla 3.2. Costo de los equipos para los trabajos en el depósito de P0 o P1, para remover las pilas y alimentar el transportador.

No.	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Costo total
1	Camiones rígidos	3	566 037	1 698 111
2	Cargador frontal sobre neumático	4	271 000	1 084 000
Total		7	837 037	2 782 111

Con 2 cargadores más y un camión no se pueden remover todas las pilas pero si puede realizarse esa tarea de forma sistemática.

Removiendo las pilas se alcanza una ganancia de \$ 3 725 458 superior a la alcanzada en el secado de pilas de forma estática debido a que existe mayor reducción de humedad en el material (ver anexo 2).

3.5.3 Secado por escurrimiento en el depósito P4

Para las operaciones en el depósito P4 es necesario la compra de dos camiones y dos cargadores frontales para un costo de \$ 1 674 074 igual que para los depósitos de P0 y P1 (ver tabla 3.1).

Aquí se depositó mineral en los meses de marzo y abril. En esa etapa el mineral que se alimentaba al transportador tenía una humedad promedio de 37,70 % y 36,53 % respectivamente. En el mes de mayo producto al empalme que se realizaba de la

banda transportadora el promedio de humedad de ese mineral fue 27,05 % reduciéndose más de un 9 %.

Por lo tanto si el mineral en esta área es capaz de reducir su humedad por lo menos un 8 %, representa un ahorro de petróleo de 12 890.8 toneladas al año de crudo nacional en la planta de secaderos que representa ganancias de \$ 5 340 672 CUC al año (ver anexo 3).

3.5.4 Secado en el depósito de hormigón

En este depósito para las operaciones óptimas es necesario trabajar con una compactadora, un camión, cuatro cargadores y dos buldócer, de forma tal que se pueda secar todo el mineral que procesa la empresa.

Tabla 3.3. Costo de los equipos para los trabajos en el depósito de hormigón.

No.	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Costo total
1	Camiones rígidos	1	566 037	566 037
2	Cargador frontal sobre neumático	4	271 000	1 084 000
3	Compactadoras	1	500 000	500 000
4	Buldócer	2	428 371	856 742
Total		8	1 756 408	3 006 779

Se comprobó que es posible reducir la humedad más de un 11 % y la inversión se recupera en 5 meses, con un ahorro de 17 724,8 t de crudo nacional que representan un ahorro de \$ 7 165 459 (ver anexo 4).

3.5.5 Comparación de las alternativas de secado estudiadas

Todas las alternativas estudiadas permiten obtener ganancias, pero estas son superiores cuando el mineral se seca sobre el hormigón que asciende a \$ 7 165 459 como se muestra en la tabla 3.4.

El secado por escurrimiento en el depósito P1 presenta desventajas relacionadas con las condiciones climáticas de bajas temperaturas y alta humedad relativa con precipitaciones abundantes durante todo el año en esa área. Aunque la alternativa no debe tener pérdidas porque de existir condiciones del clima muy desfavorables los equipos se mantienen parqueados sin gasto alguno, se demora más la recuperación de la inversión.

En el depósito de P4 las condiciones climáticas son mejores, pero se corre el riesgo de que el mineral seco se moje en los vagones al trasladarlo a la industria, además de su colocación en el depósito exterior donde las condiciones de drenaje son críticas y

mantiene agua acumulada que al voltear los vagones el mineral cae en el agua, además por su cercanía al río se deben preparar condiciones especiales para evitar la contaminación de sus aguas.

La alternativa de mayor ventaja en cuanto a clima y cercanía de la industria es el depósito de hormigón al oeste del depósito exterior donde están las condiciones para volteo de los vagones, riego y compactación del mineral para el secado solar y lograr las mayores ganancias por el descenso de 11 % de la humedad. Al recoger el mineral seco se realizan pilas que no permiten que se mojen en su interior en caso de lluvias y la posibilidad de alimentación inmediata.

La disminución de la humedad de las menas lateríticas ante de su entrada a los secaderos mediante la implementación del secado solar natural contribuye a que la planta de preparación de mineral opere con mayor flujo de producción, disminuye el consumo de combustible lo que permite elevar la eficiencia del proceso y contribuye a maximizar los aportes al estado.

Tabla 3.4. Análisis financiero de las cuatro variantes de secado del mineral analizadas.

Indicador	Valor CUC/año			
	Secado por escurrimiento			Secado en depósito de hormigón
	P1 (pilas estáticas)	P1 (pilas removidas)	P4	
Costo de inversión	1 674 074	2 782 111	1 674 074	3 006 779
Ingresos*	5 598 274	6 507 569	7 014 746	10 172 238
Ganancia	3 924 200	3 725 458	5 340 672	7 165 459

*: Se refiere al ahorro de crudo nacional por reducción de la humedad

3.6 Impactos sociales

La introducción de la tecnología del secado solar para las menas lateríticas permite humanizar la labor de los operadores de los secaderos ubicados en la planta de preparación de mineral, mejora el entorno laboral y disminuye las emisiones de gaseosas hacia los puestos de trabajo, aumentando la calidad del aire lo que disminuye los problemas respiratorios en los trabajadores de la planta y la empresa.

3.7 Impactos ambientales

El proceso estudiado utiliza las energías solar, térmica y eólica como fuente de secado, y con la implementación del secado solar natural de las menas lateríticas se reducen las emanaciones de gases producto de la combustión (CO, CO₂, SO₂ y otros gases tóxicos) liberados por los secaderos, debido a que el tiempo de permanencia

del mineral dentro del mismo se reduce y el consumo específico de combustible decrece considerablemente. Teniendo en cuenta que estos gases son perjudiciales para la vida de los seres humanos y de las plantas se infiere que la reducción de las emanaciones mejora la calidad de aire en el entorno laboral y en los barrios cercanos a la empresa, lo que repercute en la disminución de los niveles de contaminación de las aguas y en la supervivencia de los ecosistemas de los territorios aledaños. Algunos de los gases que se generan en los secaderos y las principales afectaciones medioambientales que provocan se relacionan a continuación:

El dióxido de carbono (CO_2) es considerado el responsable del cambio climático global por su efecto sobre la atmósfera terrestre.

El óxido nítrico (HNO_3) favorece la reformación de ozono en las capas bajas de la atmósfera y es causante de fuertes irritaciones, sobre todo en las vías respiratorias y los ojos.

El monóxido de carbono (CO) es denominado también veneno de la muerte dulce porque bloquea la capacidad de fijación de oxígeno por parte de la sangre.

El dióxido de azufre (SO_2) al reaccionar con el vapor de agua contenido en el aire da lugar a la formación de las lluvias ácidas que atacan a las plantas y las edificaciones.

3.8 Correspondencia entre la relación costo – beneficio alcanzada y la prevista

Con la implementación del secado de mineral en el depósito de hormigón al oeste del depósito exterior se garantiza la alimentación de forma estable a la planta de preparación de mineral, se crea una alternativa más para cuando hay problemas con la alimentación del depósito exterior, se logra una reducción de la humedad superior a 11 % lo que provoca un ahorro en el consumo de crudo nacional de 17 724.8 t/año representando ganancias de más de 7 165 459 CUC al año y se dejarían de verter gran cantidad de gases (CO_2 y SO_2) a la atmósfera.

3.9 Conclusiones del capítulo

Después del análisis de las alternativas se concluye que el secado en el depósito de hormigón al oeste del depósito exterior brinda mayor posibilidad de reducción de la humedad superior a 11 %, lo que provoca un ahorro en el consumo de crudo

nacional de 17 724,8 t/año representando ganancias de más de 7 165 459 CUC al año y se dejarían de verter gran cantidad de gases (CO_2 y SO_2) a la atmósfera.

Los resultados industriales corroboran que hay una reducción de la humedad y el consumo de combustible del 30,35 % y 29,89 kg/t respectivamente.

CONCLUSIONES GENERALES

El mineral de Pinares de Mayarí presenta 1,04 % de níquel y se determinó que el 39 % del mismo tiene la fineza adecuada para el proceso de reducción sin la necesidad de molerlo.

Se logra una reducción de la humedad del mineral superior a 11 % y una disminución del consumo de combustible de 17 724,8 kg/t lo que representa una ganancia de 7 165 459 CUC por el secado solar en el depósito de hormigón al oeste del depósito exterior.

Los resultados industriales corroboraron que una reducción de la humedad del 30,35 % provoca una disminución de combustible de 29,89 kg/t.

Se realizó un estudio de factibilidad técnico económico que evidenció la factibilidad de todas las alternativas en buenas condiciones climáticas.

RECOMENDACIONES

Continuar los estudios relacionados con el secado solar de los minerales lateríticos.

Continuar la aplicación del secado solar sobre el depósito de hormigón en la Empresa Comandante René Ramos Latour por las ventajas que posee.

BIBLIOGRAFÍA

Mediaseja. R. "Comportamiento de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico" 2007

Leyva. A. "Etapa preliminar del secado solar del carbón mineral a la intemperie en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas" 2008.

Montero. I "Modelo y construcción de un secadero solar híbridos para residuos biomásicos" 2005.

Muñoz. D. "Secado directo e indirecto de piña".

Sánchez. C. "Pruebas de secado solar del mineral de Pinares" 2008.

Zuloeta. R. "Práctica de secado solar". 2003.

Góngora. E. "Comportamiento de la adherencia en menas lateríticas sometidas a secado solar natural" 2009.

Retirado. Y. "Comportamiento de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico" 2007.

Anexos