



MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE MOA:
Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"
FACULTAD METALÚRGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

DISEÑO DE UN DESHIDRATADOR SOLAR PARA EL SECADO DE CAFÉ EN EL MUNICIPIO DE MAISÍ.

AUTOR: RUSLEN BARROSO PIÑÓN.

TUTORES:

- ✓ DR. C. EVER GÓNGORA LEYVA; ISMM.
- ✓ M.SC. CARLOS ZALAZAR OLIVA; ISMM.
- ✓ ING. RAFAEL CHARÓN LA O; UG.

CURSO ACADÉMICO: 2018 – 2019

“AÑO 61 DE LA REVOLUCIÓN”

MOA - HOLGUÍN

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: Ruslen Barroso Piñón.

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor de la Universidad de Moa: “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Rulen Barroso Piñón

Dr. C. Ever Góngora Leyva.

PENSAMIENTO

La vida es el examen más difícil. La mayoría fracasa por intentar copiar a los demás, sin darse cuenta que todos tenemos un examen diferente.

Albert Einstein.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco este valioso y significativo logro primeramente a Dios, por ser mi guía y fortaleza. A mi familia por ser el motivo y la causa de mi lucha para llegar a culminar mis estudios; por ser la razón principal de donde obtuve el esfuerzo necesario para poder alcanzar esta meta y por enseñarme, no con palabras, sino con su amor que las limitaciones económicas no representan un obstáculo para poder alcanzar un sueño.

Al apoyo incondicional de mis tutores así como al de mis compañeros por siempre estar dispuestos a escucharme y ayudarme en las buenas y malas circunstancias vividas durante este periodo de vida.

A todos mi eterno agradecimiento.

DEDICATORIA

A mis padres por su crianza, por su apoyo, por estar orgullosos de los logros alcanzados y por brindarme su más sentido amor. A mí querido hermano por ser la persona que más aprecio y por la cual seguiré esforzándome para brindarle lo mejor de mí.

RESUMEN

El objetivo principal del proyecto fue diseñar un sistema de secado de café que afecte lo menos posible la calidad del grano y que partiera de energías renovables para reducir la huella ecológica y destacarse en la calidad del producto final para lograr mayores exportaciones.

El fundamento técnico fue aprovechar la energía solar disponible para aumentar la temperatura del aire de secado y reducir su humedad relativa, esto en dos etapas: primero utilizando un colector solar de aire y luego en una cámara de secado para deshumidificar el grano de café y reducir su contenido de humedad en base húmeda desde un 53 % hasta un 12 %, valor establecido como una norma internacional.

Con el diseño de la cámara de secado se logró no maltratar el grano ni exponerlo a la contaminación que le propicia el medio como insectos, hongos y demás, que con el secado tradicional en patios esta provocaba una gran desventaja en el producto final. Además su velocidad de deshumidificación, no se ve forzada ni acelerada.

Los principales resultados fueron una disminución del 60 % del espacio requerido para secar el café en comparación con el secado tradicional en patios, pasando de 322 m² a 132 m², y un aumento del 58 % del aumento de la disponibilidad energética para el secado (entalpía del aire), que aumento de 62,4 kg/kj a 98,5 kg/kj. Además se evidencia una disminución del tiempo de secado a través de los resultados obtenidos realizados en la investigación.

En el análisis económico para la viabilidad del proyecto se consideró un aumento del 60 % de la producción con un precio de venta de \$ 225 00/quintal de café y una utilidad de un 25 %, una inversión de \$ 35 150 y un periodo de depresión lineal de 10 años sin valor de rescate, dando como resultado una tasa interna de retorno (TIR) de 86,8 % y un valor actual neto (VAN) de \$ 131 337.

ABSTRACT

The main objective of the project was to design a coffee drying system that affects as little as possible the quality of the grain and that starts from renewable energies to reduce the ecological footprint and stand out in the quality of the final product to achieve greater exports.

The technical rationale was to take advantage of the available solar energy to increase the temperature of the drying air and reduce its relative humidity, this in two stages: first using a solar air collector and then in a drying chamber to dehumidify the coffee bean and reduce its moisture content on a humid basis from 53 % to 12 %, a value established as an international standard.

With the design of the drying chamber, it was possible not to mistreat the grain or expose it to the contamination that the environment causes such as insects, fungi and others, which with traditional drying in courtyards caused a great disadvantage in the final product. In addition, its dehumidification speed is not forced or accelerated.

The main results were a 60% decrease in the space required to dry coffee compared to traditional patio drying, from 322 m² to 132 m², and an increase of 58% in the increase in energy availability for drying (enthalpy of air), which increased from 62.4 kg / kJ to 98.5 kg / kJ. In addition, there is evidence of a decrease in drying time through the results obtained in the investigation.

In the economic analysis for the viability of the project, an increase of 60% of the production was considered with a sale price of \$ 225.00 / quintal of coffee and a profit of 25 %, an investment of \$ 35 150 and a period of 10-year linear depression with no redemption value, resulting in an internal rate of return (IRR) of 86.8 and a net present value (NPV) of \$ 131,337.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	7
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	8
1.1. Introducción	8
1.2. Tipos de deshidratadores solares.....	8
1.3. Ventajas de los deshidratadores solares	11
1.4. Ventajas sobre los secadores mecánicos:	12
1.5. Desventajas de los deshidratadores solares	12
1.6. Principios y parametros fisicos	12
1.7. Parámetros físicos que influyen en el proceso de secado:	13
1.8. El sol como fuente de energía	14
1.9. Transferencia de calor	15
1.10. Proceso deshidratación solar:.....	16
1.11. Usos del café	18
1.12. Beneficios del café	18
1.13. Proceso de transformación del café.....	19
1.14. Secado del café	22
1.14.1. También se clasifica el proceso de secado en diferentes fases:	22
1.14.2. Tipos de secados del café.	23
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
2.1. Introducción	25
2.2. Selección del deshidratador solar teniendo en cuenta el diseño y su influencia en las variables a utilizar.	25
2.3. Partes de un deshidratador solar o horno solar tipo invernadero.....	26
2.4. Diseño.....	28

2.5. Determinación del área de la cámara de secado	38
2.6. Colector solar de aire	39
2.7. Orientación del deshidratador solar.....	41
2.8. Cálculos para determinar los parámetros esenciales para la efectividad del deshidratador solar.....	41
2.9. Radiación térmica:.....	42
2.10. Balance de energía	45
2.11. Transferencia de masa.....	46
2.11.1. Transferencia de calor y masa en el secado de café	46
2.12. Altura sobre el nivel del mar y presión atmosférica	47
2.13. Ecuaciones para el balance de energía	48
2.14. Secuencia de diseño:	53
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.	55
3.1. Introducción	55
3.2. Análisis económico.....	58
3.3. Inversión inicial.....	58
3.4. Beneficio.....	59
3.5. Costos.....	60
3.6. Tasa interna de retorno y valor actual neto.	60
3.7. Conclusiones parciales	60
CONCLUSIONES GENERALES	0
RECOMENDACIONES.....	0
BIBLIOGRAFÍAS	0
ANEXOS	0

INTRODUCCIÓN

El cafeto arábico es un arbusto de la familia de las rubiáceas, nativo de Etiopía y/o Yemen; es la principal especie cultivada para la producción de café, y la de mayor antigüedad en la agricultura, es uno de los cultivos de mayor importancia económica a nivel internacional, siendo considerado como la segunda mercancía a nivel mundial después del petróleo. Se emplea como bebida, materia prima para la obtención de la cafeína, en los Estados Unidos de América se emplea en la fabricación de helados, en la repostería y confitería, en Brasil se emplea como combustible en los trenes, en la fabricación de pinturas, en la industria del plástico y en la extracción de aceites para la fabricación de jabones medicinales, en nuestro país ya se emplea en la producción de licores, confiterías, helados y los subproductos de las cosechas a partir de su descomposición se emplean como fuente de materia orgánica. La caficultura mundial está constituida, por las especies *Coffea arábica* Lin. (Domina el 70%) y *Coffea canephora* Pierre. En Cuba esta última especie representa aproximadamente el 12 % del total de la superficie dedicada a la rama cafetalera.

La especie arábica produce un grano de alta calidad que se cotiza en el mercado internacional a buen precio, pero es afectada por los nematodos parasíticos de las raíces como *Meloidogyne* spp y otros géneros, lo que limita su establecimiento en muchas zonas que presentan condiciones edafoclimáticas favorables para obtener café de alta calidad. La especie *C. Canephora* es tolerante a los nematodos, pero su calidad es inferior y se paga a menor precio.

Según datos históricos el cafeto llegó a Cuba en el siglo XVIII específicamente en el año 1748, gracias a Don José Antonio Gelabert, con semillas provenientes de Santo Domingo, actual República Dominicana. La avalancha de haciendas cafetaleras se produjo en Cuba con la llegada de colonos franceses que emigraron desde Haití debido a la revolución de 1791. Estos concedores encontraron terrenos excelentes y condiciones climáticas propicias para el cultivo del cafeto en las zonas montañosas del país ubicadas en el occidente, centro y oriente insulares. Así surgieron las grandes haciendas cafetaleras cubanas, que en breve se convirtieron en poderosos centros productores de café. Gracias a este auge, Cuba llegó a ser el primer exportador mundial a inicios del siglo XIX.

El boom cafetalero cubano tuvo lugar durante las tres primeras décadas del siglo XIX, pero ya hacia 1830 fue perdiendo fuerza, debido a la mediación de España en el comercio de la isla. La Metrópolis imponía gravámenes y altos precios a países importadores como Estados Unidos, quienes desestimulados por esta situación, volvieron su mirada hacia productores incipientes en ese momento como Brasil, Colombia y otros países del área centroamericana.

En Maisí aunque se tiene registros que se cultivaba el café a pequeña escala desde finales del siglo XIX, es a partir de 1930 con la aparición de la enfermedad llamada "pintadillas o Panamá" que provocó la disminución de la producción bananera y se incrementa la de café, ya para la década de los años 40 la producción del cultivo en Baracoa osciló finalmente (hasta 1952) entre 40 y 50 mil quintales, correspondientes a Gran Tierra y Montecristo el 30 % de la producción total, o sea de 15 a 19 mil quintales anuales. La producción total de Baracoa y Maisí en la cosecha del café 1951-1952 fue de unos 45 000 quintales. Los mayores rendimientos del cultivo del café en Maisí se alcanzan en el período de 1970 al 2 000 con cosechas que promediaban por encima del millón de latas, siendo la cosecha de 1982-1983 la de mayor producción con un record productivo de 1 470 000 latas, por lo que fue declarado como el municipio mayor productor de café en Cuba, condición que pierde a partir del año 2001 donde se inicia el decrecimiento en la producción cafetalera en nuestro municipio disminuyendo para la cosecha de 2012-2013 en unas 822 377 latas, ocasionado esto fundamentalmente por el envejecimiento de las plantaciones, déficit de fertilizantes, ataque de plagas y enfermedades y las consecuencias del cambio climático acelerado, a todas estas deficiencias, se le suman, los estragos ocasionados a las plantaciones del cultivo en octubre del 2016 por el huracán Matthew que desbastó el 95 % de las áreas cultivadas, esto ocasionó que en la cosecha de 2017-2018 solo se recolectaran 22 000 latas en el municipio.

La obtención de altas producciones y rendimientos, con eficiencia económica y sin daños al medio ambiente, depende del trabajo mancomunado de investigadores, directivos, productores y técnicos, con la aplicación consecuente de las tecnologías del cultivo.

El Centro de Gestión Los Llanos se crea en el año 2008 con el propósito de brindar asesoramiento técnico a las bases productivas y productores, el mismo consta de unas 840.61 hectáreas para la producción del cultivo del café (*Coffea arabica* Lin.) distribuidas

en un total de 15 bases productivas, de ellas diez Unidades Básicas de Producción Cooperativa (UBPC), cuatro Cooperativas de Créditos y Servicios (CCS) y una Cooperativa de Producción Agropecuaria (CPA), que aglutinan un total de 324 productores, además posee un complejo productivo compuesto por un centro de beneficio húmedo, equipado con máquinas de la marca Penagos, tecnología ecológica, el Centro Municipal de Producción de Materia Orgánica, un Vivero Tradicional con capacidad para 250 000 posturas de cafeto, dos organopónicos, uno para flores y el otro para producción de hortalizas, una Finca de producción de Flores de Montaña, y una Casa de Cultivo Semiprotegido.

Al igual que el resto de las áreas cultivadas de café del municipio Maisí (*Coffea arábica* Lin.) a partir de las afectaciones del Huracán Matthew por la gran demanda de posturas de cafeto para el restablecimiento de las áreas de producción por indicación de la dirección del Ministerio de la Agricultura (MINAG) se introducen en este Centro de Gestión dos nuevas tecnologías, la producción de posturas de cafeto en tubetes y el Injerto Hipocotiledonar en patrón de café robusta (*Coffea canephora*), esto permitió incrementar la producción de posturas en 200 000, de las cuales solo el 50 % se producen con tecnología de injerto, pero aún esto es insuficiente para cubrir la gran demanda realizada por los productores perteneciente al Centro de Gestión.

El contenido de humedad de la cereza del café está entre el 50 y el 60 por ciento del peso total, dependiendo del tipo de fruto y sus condiciones. Las cerezas ya secas, bolas o capulines contienen de 15 a 25 por ciento de humedad. Para que el grano de café pueda ser embodegado, y posteriormente comercializado, se recomienda una humedad de alrededor del 12 %.

El principal factor que influye en la calidad del café almacenado es la humedad. Los granos húmedos constituyen un medio ideal para el desarrollo de microorganismos e insectos que dañan al producto y deterioran su aspecto. El secado es el método de acondicionar los granos por medio de la eliminación del agua hasta un nivel que permita su equilibrio con el aire del ambiente, de tal forma que preserve su aspecto, su calidad nutritiva y la viabilidad de la semilla. (MARCALA, 2010).

El secado consiste en retirar por evaporación el agua de la superficie del producto y traspasarla al ambiente. La rapidez de este proceso depende de la velocidad del aire, su

grado de sequedad y su temperatura, así como de las características del producto, su composición, su contenido de humedad y el tamaño. La cantidad de agua que el aire puede absorber depende, en gran medida, de su temperatura. A medida que el aire se calienta, su humedad relativa decae y puede absorber más humedad. El uso de secadores solares para el secado de café arábico responde a una tendencia en el desarrollo de tecnologías sustentables, que permitan proteger al grano de las condiciones climatológicas adversas, obtener un grano seco de calidad y lograr el secado en días con radiación solar difusa.

En la etapa del secado es cuando más daños pueden sufrir los granos, si no se realiza inmediatamente después de haberse lavado, se presentan granos negros, mohosos, fermentados, mal oliente, el pergamino se mancha y consecuentemente el rendimiento en peso es menor. Cuando el grano es secado adecuadamente, se hace fácilmente conservarlo por lo que se evita un posible desarrollo de mohos, al mismo tiempo que se garantiza su buen gusto y aroma.

Con el presente trabajo de investigación se buscó evaluar en fincas de pequeños y medianos productores un prototipo de secador solar de café de la clase arábico, realizando comparaciones con el secado tradicional, para conocer su efecto en los tiempos de secado, que en términos monetarios favorecen la economía del productor y como inciden estos en la calidad del café. Se tomó como referencia para realizar el experimento la comunidad de Los Llanos, por ser ésta una zona representativa del “café de altura” donde se cosechan los cafés de buena calidad de exportación.

El gobierno cubano, está consciente de la necesidad imperiosa de recuperar el espacio perdido en el cultivo de café en Maisí, territorio antes mayor productor en el país del rubro exportable, con un récord de un millón 470, logrado en 1982.

En los últimos años, al amparo de un programa de desarrollo cafetalero que pretende crear condiciones para alcanzar en 2020 el millón de latas. Para ello se realizan un grupo de acciones entre las cuales se destacan:

- La entrega de fincas en usufructo para el cultivo del café y el incremento del precio de acopio al productor, que favorecen el programa que se acomete en pos de la recuperación del preciado grano.

- La Resolución 237 del Ministerio de Finanzas y Precios establece un valor máximo de 161 pesos por una lata de café arábigo de primera calidad; 135,24 pesos por una lata de segunda calidad y 87,58 por una de tercera. Igualmente, tiene en cuenta significativos incrementos para la variedad robusta.
- La renovación y ampliación de áreas de cultivo, y la introducción de un sistema más intensivo y tecnificado.
- La sustitución de las plantas envejecidas por otras jóvenes, de mayor vigor y capacidad genética.
- Se realizan encuentros y visitas periódicas a las fincas para evaluar el avance en las siembras, la atención directa a las semillas y el cuidado de los sembradíos en fomento, aspectos que determinan el éxito de la cosecha.

Teniendo en cuenta los aspectos mencionados resulta oportuno el uso de las fuentes renovables de energía con la finalidad de emplear tecnologías amigables con el medioambiente, garantizando además una mayor calidad del producto final.

Por tal motivo se declara como **problemática de la investigación** la siguiente.

Problemática:

El proceso de secado tradicional al sol en patio, muchas veces es lento debido a la elevada humedad en el ambiente, además en el proceso de secado se tienen pérdidas en el grano, sobre todo cuando contienen un alto porcentaje de agua, este se pudre o se enmohece, también están expuestos al polvo, insectos y aves que pueden deteriorar el grano o generar pérdidas económicas. Además los productores del municipio Maisí están expuestos, es la inestabilidad en la gestión económica por parte de la empresa responsable de acopiar y transportar las cosechas, incidiendo de manera negativa en la calidad del producto debido a que tiene una limitación en tiempo de vida útil dada su rápido deterioro o pérdida de sus estándares de calidad su variabilidad del precio en el mercado nacional e internacional dependiente de la oferta y la calidad o uniformidad del producto cosechado.

Problema:

La Empresa Productora de Café del municipio Maisí, no cuenta con una tecnología apropiada para secar el café haciendo uso de la radiación solar como energía limpia, para

calentar el aire y que al mismo tiempo se encargue de reducir la humedad del grano; además para obtener café con un contenido de humedad final uniforme y reducir el tiempo de secado.

Objetivo General:

Diseñar un horno secador solar para el secado de granos de café bajo las condiciones ambientales del municipio de Maisí, considerando las propiedades de los productos seleccionados y con base en criterios de eficiencia.

Objetivos Específicos

- ✓ Determinar las propiedades de los granos de café para el diseño y dimensionamiento del horno solar.
- ✓ Realizar el estudio del recurso solar en el municipio Maisí para el diseño y dimensionamiento del horno solar.
- ✓ Establecer las dimensiones del horno solar para el secado de granos de Café.

Hipótesis

El prototipo de secador evaluado, reducirá significativamente el tiempo de secado en fincas, aprovechando la energía solar, además aumentara significativamente la calidad del producto final. Con costos asequibles y además que no afectará las características organolépticas del grano de café.

Tareas

- ✓ Establecer el estado del arte sobre los procesos de secado de granos y de los tipos de hornos solares más utilizados, características, ventajas y desventajas.
- ✓ Evaluación económica de la propuesta.
- ✓ Determinar las propiedades del café secado en el secador comparándolo con el café secado convencionalmente.
- ✓ Evaluar el desempeño del secador solar oreando café en fincas de pequeños productores del municipio.

ANTECEDENTES

El tema del secado de café es de suma importancia debido a que si no se reduce el porcentaje de humedad, se desarrollan microorganismos que afectarían su calidad. En Cuba el café es secado de manera convencional utilizando patios de secado. En otros países tales como Guatemala (Palacios, 2008), Bolivia, Perú (TAQUIRI, 2008) y Colombia (Oliveros C., Ramírez, C. Sanz, J.; Peñuela A, 2006) se han desarrollado investigaciones sobre este tema, logrando obtener resultados positivos en cuanto a tiempos de secado.

Experiencias en Bolivia, se realizó pruebas de secado de café en la región de los Yungas (2005 – 2006), utilizando sistemas solares e híbridos; estos últimos sistemas que combinan el uso de energía solar con biomasa para garantizar la continuidad del secado también bajo condiciones adversas del tiempo. Esta tecnología es también destinada al pequeño agricultor (Mayer Falk R., Falk Solar. 2004). En base a esta experiencia se decidió utilizar un modelo parecido al validado en Bolivia y se retomaron algunos factores en el diseño de este, realizándole algunas modificaciones para adaptarlo al contexto en que se realizarían las pruebas experimentales en el municipio de Maisí.

El secado de productos empleando la radiación solar tiene importantes antecedentes en Cuba, y entre ellos se destacan los exitosos trabajos experimentales del Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES), de Santiago de Cuba, entre 1984 y 1993, seguidos por el Grupo Solar del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), en La Habana, y más recientemente por el Grupo de Energía Solar de CUBAENERGÍA. (Delgado M., Leiva G., Perdigón Z., Bériz L., 2009).

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

1.1. Introducción

Los deshidratadores solares son dispositivos con los cuales se extrae gran porcentaje de agua de los productos por medio del flujo de aire caliente, de esta forma el agua que está en la superficie del producto se evapora y se traspassa al aire circundante y el calor del medio se transmite al interior del producto, con el objetivo de maximizar la calidad del producto y minimizar los costos, el tiempo de deshidratación debe de ser corto, este tiempo depende tanto de la fruta como del deshidratador. Cinco aspectos afectan la velocidad y el tiempo total de deshidratado:

- Tipo de producto (mayor contenido de agua, mayor tiempo).
- Cantidad de producto q se desea deshidratar.
- Temperatura del aire (más elevada, menor tiempo)
- Humedad relativa del aire (más elevada, mayor tiempo)
- Velocidad del aire (más elevada, menor tiempo)

A continuación se citan las clases de deshidratadores solares con cada una de sus características físicas.

1.2. Tipos de deshidratadores solares.

Deshidratador solar de gabinete:

Este tipo de deshidratadores no cuentan con un flujo apropiado del aire de secado, debido a que el diseño es como el de una caja (ver figura 1), la cual cuenta con dos aperturas, una en la parte inferior por donde ingresa el aire del ambiente, y otra en la parte superior por donde sale un aire más húmedo y con mayor temperatura. En este tipo de deshidratadores la circulación del aire es por convección natural. Es por esta razón que la eficacia no es muy alta. Estos sistemas son capaces de deshidratar pequeñas cantidades de material. Son principalmente usados para secar alimentos



Figura 1: Deshidratador solar de gabinete

Deshidratador solar de colector y armario:

Este deshidratador consta de un colector de aire en la parte baja y un armario de deshidratación en la parte superior (ver figura 2), la entrada del aire se sitúa en la parte baja del colector mientras que la extracción del mismo se sitúa en la parte alta del armario. El tipo de circulación del aire es natural por convección (3). Combinando varios equipos de este tipo de forma es posible deshidratar cantidades de producto a niveles industriales.



Figura 2. Deshidratador solar de colector y armario.

Deshidratador solar de colector y depósito:

Este sistema es similar al deshidratador de colector y armario pero en grandes dimensiones (ver figura 3). En vez de un armario dispondrá de un depósito para deshidratar cantidades mucho más grandes. También la dimensión del colector será mayor debido a que se requiere aportar mucho más calor. Este tipo de equipos trabaja con

convección forzada del aire debido a las dimensiones de este y a la cantidad del producto a deshidratar.

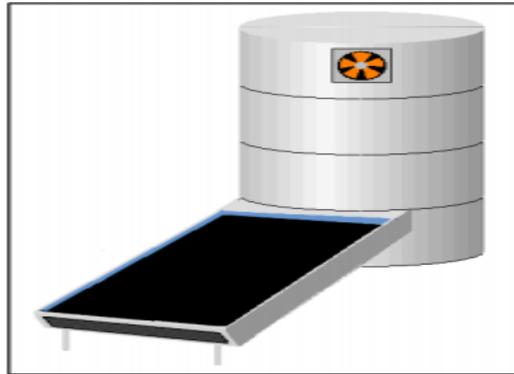


Figura 3. Deshidratador solar de colector y depósito.

Deshidratador de invernadero:

Este tipo de deshidratadores están basados en el principio de funcionamiento del deshidratador solar de gabinete pero en grandes dimensiones; este deshidratador se construye en base a los invernaderos utilizados en agricultura (ver figura 4). La circulación del aire es por convección forzada.



Figura 4. Deshidratador de invernadero.

Deshidratador con colectores indirectos:

Este tipo de deshidratador cuenta con colectores de aire separados de la cámara de secado (ver figura 5), el aire que se calienta en los colectores es transportado a la cámara

de secado por medio de conductos aislados térmicamente. La circulación del aire es por convección forzada. .

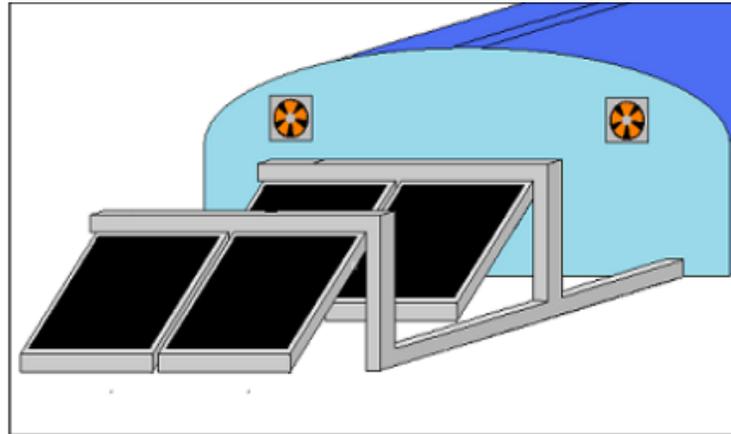


Figura 5. Deshidratador con colectores indirectos

En una innovación tecnológica no sólo las características técnicas son importantes, sino también el proceso por el cual una población se apropia de ella. Los secadores solares pueden parecer una tecnología muy simple, pero deben tomarse en cuenta las siguientes consideraciones; las temperaturas que alcance el secador, el tiempo de secado, la humedad relativa, la ubicación en la finca y la calidad del secado.

1.3. Ventajas de los deshidratadores solares

Entre las principales ventajas del secador solar de café frente al secado en patios se destacan:

- Reducción de hasta el 50 % del trabajo físico requerido, principalmente de mujeres y niños y niñas.
- El grano no está expuesto a la lluvia y se evita el re-humedecimiento en horas de la noche, que da lugar a manchas y deterioro del aspecto.
- Las variaciones de temperatura del aire en el interior son muy poco abruptas, igual que la variación de humedad, así el secado se realiza de forma más constante. Esto evita la formación de moho causante de cambios de sabor y agrietamiento del grano.
- Se evita el contacto con polvo, tierra, excrementos de animales y basura, consiguiendo un grano más limpio y sin contaminantes.
- Disminución del 40% en el tiempo de secado. Puede ser entre 5 y 7 días.
- Menor costo y tiempo de construcción. Alrededor de un 35% menor.

- Facilidad en el trabajo de escoger y separar el grano, porque hay una altura favorable.

1.4. Ventajas sobre los secadores mecánicos:

- Se evita el uso de combustibles o energía, eliminando la contaminación.
- No se transmite mal olor al grano por el uso de combustibles.
- Bajo coste de implementación y mantenimiento.
- Tecnología sencilla.
- Diversidad de usos. En épocas que no sean de cosecha se puede utilizar para otras actividades, dándole un valor añadido. Algunas actividades pueden ser: secado de otros granos, de madera, de ropa, maduración de la fruta, germinación de hortalizas, criar gallinas, bodega y hospedaje.

1.5. Desventajas de los deshidratadores solares

Entre los factores considerados desventajas del uso de secadores solares:

- El café debe moverse en el menor tiempo posible para evitar cambios bruscos de temperatura, debido a la temperatura tan alta alcanzada en el interior.
- La cubierta de plástico tiene una vida útil entre 2 y 3 años.
- Se puede obtener secado disparejo si no se realiza un movimiento constante de la masa del café.

1.6. Principios y parametros fisicos

Principios físicos que afectan al funcionamiento de un secador solar de café: – Efecto invernadero: aunque este efecto es el desarrollado por la Tierra para ser calentada, también se le llama a la confinación de aire caliente en el interior de un habitáculo por la acción de la radiación solar que atraviesa un plástico o vidrio, pero que éste es opaco a la radiación terrestre. De esta manera, parte de la radiación solar pasa a través del material transparente o semitransparente, denominada radiación de onda corta, llega al suelo, parte es absorbida y la otra reflejada. La radiación reflejada es la de onda larga o infrarroja y una parte no atraviesa el vidrio o plástico, siendo reflejada, quedándose en el interior y calentando el aire interno.

- Transferencia de calor por convección: transferencia de calor por las moléculas de una masa fluida, en este caso, aire. Esta transferencia de calor está asociada al movimiento de

las partículas, las más lentas son desplazadas por las más rápidas, debido a la diferencia de densidad entre ambas. Debe existir diferencia de temperaturas para que se dé la transferencia de calor. – Transferencia de masa por conducción: es el mecanismo de transferencia de masa entre la superficie de un sólido y un fluido en movimiento. Este movimiento favorece la transferencia de masa, al reemplazar el fluido en contacto ya con alta concentración, por fluido nuevo con baja concentración. Como en el caso anterior, debe existir diferencia de concentración de masa para que se produzca la transferencia.

1.7. Parámetros físicos que influyen en el proceso de secado:

- Humedad relativa del aire: es la relación entre la presión de vapor de agua en las condiciones actuales y la presión de saturación (máxima) de vapor de agua a la misma temperatura. A menor contenido de humedad en el aire, mayor será su capacidad de absorción de agua.
- Temperatura: a mayor temperatura la energía cinética de las moléculas de agua localizadas en la superficie del grano aumenta, y será suficiente para vencer las fuerzas intermoleculares de la fase líquida, y en consecuencia, evaporarse. La temperatura también afecta a la humedad relativa del aire, ya que a mayor temperatura aumenta la presión de saturación de vapor de agua, por lo tanto, mayor margen de captación de agua.
- Velocidad del aire: el movimiento del aire tiene como funciones, transmitir el calor al agua del grano para su evaporación, y transportar esta agua evaporada. A mayor velocidad, mayor renovación de aire y más rápido será el transporte del agua evaporada.

De esta manera, con todo lo comentado, el funcionamiento del secador solar tipo invernadero se puede explicar de la siguiente manera:

El aire del interior del secador es calentado por el sol, aumentado su punto de saturación y así poder absorber la humedad de los granos, y le provoca movimiento de convección al reducir su densidad. El aire con menor densidad, cargado de agua y más caliente, saldrá por la apertura del techo y entrará aire nuevo de menor temperatura, menor contenido de agua y más frío, por el espacio del suelo. Este funcionamiento de circulación del aire solo es posible en equipos pequeños donde la velocidad del aire puede llegar a valores entre 0,5 y 1 m/s. En equipos grandes, no llega a los 0,3 m/s, requiriendo así una circulación forzada.

1.8. El sol como fuente de energía

La energía solar, es una alternativa importante de abastecimiento de energía para la vida en la tierra, es preferida frente a otras fuentes de energía porque es abundante, inagotable, no contaminante, renovable y económica. En la actualidad, esta energía se aprovecha por medio de captadores como células fotovoltaicas, helióstatos o colectores térmicos, para generar energía eléctrica o térmica (Akpinar, 2010). La generación de electricidad mediante el sistema fotovoltaico creció en más de 130 veces a nivel mundial entre los años 1999 y 2010; pasando de 200 a unos 27 200 MW al año aproximadamente. Los mayores desarrollos se han dado en China, Alemania y en otros países europeos (Moya-González *et al.*, 2011).

En la deshidratación solar, se captura y almacena parte de la energía solar que está disponible en la superficie de la tierra, para realizar la correspondiente transferencia de calor al sistema de deshidratación, a través, del incremento de la temperatura del aire de secado.

La radiación electromagnética, energía utilizada en deshidratación solar, son ondas producidas a lo largo del Universo por el movimiento de electrones en un campo eléctrico; donde a su vez, el movimiento produce campos eléctricos y magnéticos oscilantes que forman haces de energía luminosa llamados fotones. Los fotones, viajan en ondas a la velocidad de la luz (299 792 458 m/s) en el vacío, que presentan ciertas características como frecuencia (número de ondas por ciclo), longitud de onda (distancia entre dos picos consecutivos) y energía (Fontal, 2005). Existen muchas formas de ondas electromagnéticas que se distinguen por sus frecuencias y longitudes de onda, que varían en un rango muy amplio, tal como se muestra en la Figura 6.

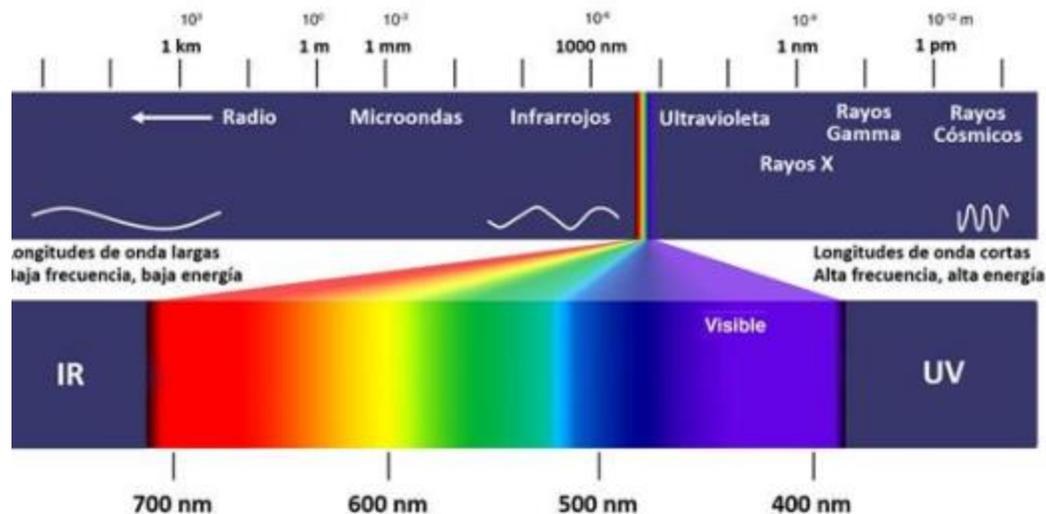


Figura 6. Espectro de radiación electromagnética. Tomado de Fontal (2005).

1.9. Transferencia de calor

El proceso de deshidratación solar, es el conjunto de operaciones y actividades sistemáticamente relacionadas para la remoción de la humedad de un producto, utilizando la radiación solar como fuente de calor y/o energía (Fundación Celestina Pérez de Almada, 2005) para transferir calor al aire que rodea el producto llevando a cabo los procesos de radiación, conducción y/o convección, gracias a los deltas de temperatura.

Transferencia de calor por radiación

En la radiación, el calor se transfiere por las ondas electromagnéticas, desde la fuente hacia el medio que lo rodea en todas las direcciones. Las ondas o partículas se transmiten, a través, de un fluido; desde un cuerpo a otro debido a la diferencia de temperatura. En este caso no existe contacto entre los cuerpos, ni fluidos intermedios que transporten el calor. (Domingo, 2011). La radiación es un fenómeno volumétrico, los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados.

Transferencia de calor por convección

La transferencia de calor por convección, se da a través de un fluido (gas o líquido) que está en continuo movimiento y que transporta la energía térmica entre dos zonas de diferente densidad; siendo las zonas más densas las más frías y las que se encuentran en la parte superior. Luego, éstas zonas más frías, se movilizan hacia las zonas de menor densidad que se encuentran en la parte inferior (más caliente) desplazando el fluido

(Domingo, 2011). Entre más rápido es el movimiento del fluido, mayor es la transferencia de calor por convección, aunque, simultáneamente complica la determinación de las razones de la transferencia de calor.

1.10. Proceso deshidratación solar:

En la deshidratación, la remoción de humedad es el proceso de interés porque relaciona la transferencia de masa y transferencia de calor, y determina las condiciones del producto final (Orrego, 2003). Los alimentos, particularmente frutas y hortalizas requieren aire caliente con rango de temperaturas entre 45 y 60 °C, para una deshidratación segura, es decir, que los productos conserven la mayoría de sus propiedades nutricionales y organolépticas (Kant *et al.*, 2016).

Respecto a lo beneficios, la deshidratación solar es un proceso que conserva alimentos altamente perecederos por más tiempo, especialmente frutas y hortalizas (Ceballos-Ortiz *et al.* 2012). Como el objetivo de la deshidratación es reducir el contenido de agua de los alimentos, disminuye la actividad enzimática y la capacidad de desarrollar microorganismos sobre éstos (Procolombia, 2014). A nivel mundial, la deshidratación constituye una de las alternativas más utilizadas para la reducción de las pérdidas en pos cosecha, especialmente en países en desarrollo, que aportan entre el 60 y 80% de la producción mundial de alimentos agrícolas (FAO, 2014; Valdés *et al.*, 2015).

Adicionalmente, la tecnología de deshidratación solar, tiene bajo costo de operación al utilizar energía solar para su funcionamiento; la cual es abundante, inagotable y no contaminante (Akpınar, 2010). Está fuertemente divulgada en el área agrícola debido a la fluctuación del precio de los combustibles fósiles y a las preocupaciones ambientales (Kant *et al.*, 2016), es considerada la técnica de mayor conservación de energía, no solo por el ahorro de consumo de energías convencionales, sino que también ahorra mucho tiempo, ocupa Contenido 37 menor área, conserva la calidad del producto y mejora el estilo de vida de las personas que manipulan ésta tecnología (M. Kumar *et al.*, 2016).

En relación al proceso propiamente, la velocidad de remoción de agua en el proceso de deshidratación presenta un comportamiento como el que se ilustra en la Figura 7.

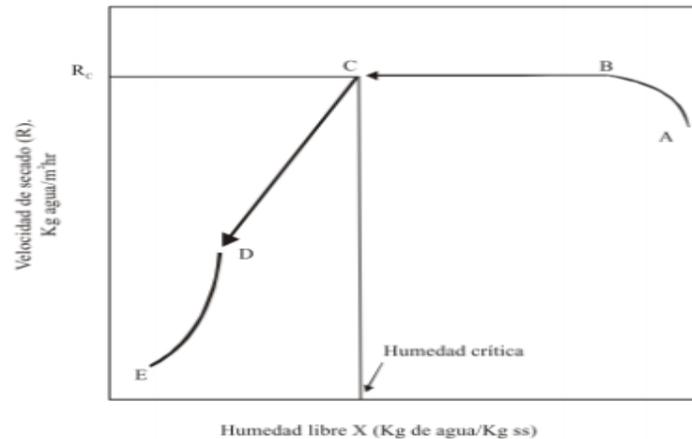


Figura 7: Relación entre humedad libre y velocidad en el proceso de deshidratación. Tomado de Orrego (2003).

En la Figura 7 se identifican cinco periodos esenciales del proceso de deshidratación, que conforman la curva típica de secado. Respecto al producto que se está sometiendo a las condiciones del proceso de deshidratación, durante estas etapas, sufre una serie de degradaciones físicas y bioquímicas, en el transcurso del tiempo. En la Tabla 1, se describen los periodos del proceso.

Tabla 1: Periodos del proceso de deshidratación con aire caliente.

Periodo	Nombre	Descripción
I Entre AB	Periodo de acoplamiento	Es un tiempo muy corto en el que se evapora parte del agua superficial libre, y la temperatura de la superficie incrementa desde T_o hasta la temperatura del aire de secado T_{wb} .
II Entre BC	Periodo de deshidratación a velocidad constante	El secado se lleva aún por la evaporación del agua superficial a temperatura constante y por lo tanto la velocidad de secado es constante. La velocidad depende de la temperatura, humedad relativa y velocidad del flujo de aire.
Punto C	Punto crítico	Corresponde al punto en el que se determina la humedad crítica del producto, es decir que la superficie del alimento ya no está saturada de agua. Además, separa las dos etapas de transferencia de masa del proceso de deshidratación; es decir. es el momento en el que se

		ha retirado toda el agua superficial e inicia la difusión desde el interior. A partir de este punto la velocidad de secado reduce con el tiempo.
III Entre CD	Periodo de deshidratación a velocidad decreciente – Fase 1	El agua libre restante (intersticial), debe difundirse desde del interior del alimento hasta la superficie para ser evaporada. El factor limitante en esta etapa es la disponibilidad de agua en la superficie del alimento, bien sea por las características del alimento o por las condiciones del proceso. Según lo anterior, la velocidad de secado disminuye a medida que el contenido de agua disminuye y la temperatura del producto se hace más uniforme hasta el interior.
IV	Periodo de deshidratación a velocidad decreciente – Fase 2	La velocidad de secado es totalmente independiente de las condiciones externas. La transferencia de masa puede ocurrir por combinación entre difusión del agua, movimiento capilar y difusión de vapor. La temperatura en toda la estructura del producto, se acerca a la temperatura del aire y la humedad se acerca a la humedad de equilibrio.
Punto E	Punto de contenido humedad de equilibrio	Corresponde al momento en el que la diferencia de peso en el tiempo no es significativa, y se dice, que es el momento en el que el producto está en equilibrio con las condiciones del aire de secado.

1.11. Usos del café

La parte principal que se consume del café es su semilla, tostada y molida, en forma de infusión por disolución en agua caliente. En algunos países del Extremo Oriente también se consumen bebidas elaboradas con las hojas ligeramente tostadas, con un contenido de cafeína mayor. En la industria alimentaria, no solo se consume en infusión, sino que se utiliza para dar sabor y aroma a muchos alimentos. En el caso de los usos curativos del café, éste ha sido utilizado como remedio natural al Oriente Medio desde la antigüedad, principalmente como estimulante y analgésico. También la industria farmacéutica utiliza café en la composición de algunos medicamentos, o también se utiliza como medicamento único para prevenir la somnolencia. Los restos del café pueden ser un buen abono de las plantas, gracias a que contienen muchos minerales, especialmente nitrógeno, fósforo y potasio. También favorecen la composición del compost.

1.12. Beneficios del café

Son muchos los estudios científicos que intentan descubrir los efectos del café, y más concretamente, de su componente principal, la cafeína. Es difícil encontrar acuerdos en este aspecto entre la comunidad científica, pero sí parecen existir algunos: El café es una bebida antioxidante, principalmente por la presencia de polifenoles, que ayuda a reducir y eliminar los radicales libres. Esta misma característica protege al cuerpo humano de enfermedades que generan estrés oxidativo de las células, como son las enfermedades

neurodegenerativas (Parkinson y Alzheimer) y las cardiovasculares. A largo plazo, también se cree que gracias a los antioxidantes se puede reducir el riesgo a desarrollar diabetes mellitus, debido a que evitan la resistencia a la insulina y mejoran el control metabólico de la glucosa. La presencia de cafeína estimula el sistema nervioso central, aumentando la capacidad de alerta, mejorar la concentración y disminuir la somnolencia. La cafeína convierte el café en broncodilatador ayudando al alivio muy parcial de asma y alergias, porque ayudan a la respiración relajando los músculos bronquiales y los tubos bronquiales se ensanchan. También se ha comprobado que el café ejerce un efecto ergogénico, aumentando la capacidad muscular. El café puede ayudar en las dietas, ya que ayuda en la digestión y atenúa la sensación de hambre, y sus componentes con propiedades diuréticas favorecen el tratamiento de retención de líquidos. El contenido de metionina del café acidifica la orina, permitiendo ayudar al cuerpo a prevenir infecciones urinarias. También se considera que la infusión de las hojas del café puede ayudar a reducir la fiebre, debido a la presencia de beta-sisosterol.

1.13. Proceso de transformación del café

Todas las operaciones que sufre el café tras su recolección son tan importantes o más que su cultivo, así que hay que tener cuidado en todas estas fases: 1. Recolección de la semilla: este proceso debe hacerse solo cuando los frutos sean maduros, identificándose su punto de maduración con el color rojo. Si el punto de maduración no es el correcto, su procesamiento es dificultoso y el producto obtenido es de baja calidad. Se puede notar en el sabor del café en taza, aumentando el sabor amargo si el grano está verde, y sabor fuerte y áspero, cuando el fruto es demasiado maduro.

Durante este proceso hay que evitar que junto con los granos vayan hojas, palos o cualquier objeto extraño. También evitar dañar las plantas de café y usar siempre recipientes limpios y en buen estado.

Existen dos tipos de recolección, aquella que permite elegir y coger solo los granos maduros, denominada grano a grano o picking; y aquella que se cogen tanto granos maduros como verdes del exterior al interior de la planta, denominada stripping.

2. Recibo del café: es importante tener un control estricto en esta fase para obtener una calidad uniforme. Por tanto, es importante que el fruto esté maduro y no mezclarlo con el

verde, ni con el seco, ni con impurezas. El café verde se puede procesar en una línea distinta. Después, no dejarlo expuesto al sol.

3. Beneficiado: con este proceso se separa del fruto, las semillas, y se consiguen grados de humedad alrededor del 12 %. Normalmente se considera que con este tipo de beneficiado la calidad del café es más baja, pero su precio inferior. Esto es debido a que la semilla es impregnada por los azúcares y otros compuestos presentes en mucílago del café. Existen dos métodos para este mismo proceso:

a. Beneficiado seco: también llamado natural, es el más antiguo, sencillo y requiere poca maquinaria. Sus fases son:

i. Su primera fase es el lavado del fruto que permite limpiarlos y además se pueden distinguir los granos defectuosos porque flotan en el agua.

ii. Posteriormente se secan reduciendo la humedad del 70 % al 12 %, ya sea en el suelo, con máquinas de secado u otros métodos. Esta etapa puede prolongarse hasta cuatro semanas. Es también la más importante, afectando a la calidad, ya que un fruto demasiado seco puede ser más quebradizo, y un fruto demasiado húmedo se deteriorará por hongos y bacterias. Llegados a este punto, el color del fruto ha cambiado a marrón oscuro y se pueden oír las semillas liberadas en su interior.

iii. Finalmente, se realiza la etapa del descascarillado, eliminando la cubierta seca del fruto, golpeándolo o trillándolo, obteniendo el grano o semilla.

b. Beneficiado húmedo: consiste en diferentes etapas que hay que realizar cuidadosamente para garantizar la calidad.

i. La primera etapa es la clasificación del fruto que se realiza en diferentes canales de agua. En un primer momento se eliminan las impurezas y los frutos poco o demasiado maduros, por flotación. Posteriormente, se clasifican por su tamaño pasando por una serie de cribas y compuertas. Esta clasificación es necesaria para un mejor rendimiento en el despulpado.

ii. Despulpado: consiste en desprender la pulpa (epicarpio) y parte del mucílago de las semillas con la utilización de agua, beneficiándose de la cualidad lubricante del mucílago, para soltar los granos con presión.

Este proceso debe hacerse dentro de las 10 horas posteriores a su recolección, sino el fruto iniciaría un proceso de fermentación. Para evitar contaminación hay que reservar la pulpa y el agua de despulpado para un tratamiento posterior. Al final del proceso es necesaria la utilización de un tamizador para separar los granos que no han sido despulpados.

iii. Desmucilaginado: el objetivo es desprender el mucílago de las semillas. Se puede realizar con la fermentación o de forma mecánica. El primer caso, se deja fermentar entre 12 y 20 horas para que los fragmentos de pulpa todavía presentes y el mucílago se descompongan por las enzimas naturales del mucílago, dejando el grano sólo con la capa de pergamino. Es necesario lavarlo posteriormente.

iv. Lavado del café fermentado: este proceso sirve para quitar la capa de miel que queda adherida al pergamino. Este lavado puede ser manual, por medio de la inmersión y paso de una corriente de agua; o bien, mecánico, mediante la acción de bombas que impulsan agua en un flujo laminar constante por canales de clasificación con una pendiente del 0,75 %. En este proceso es importante el ahorro de agua, por eso está previsto un circuito de recirculación.

v. Clasificación: con la acción del canal clasificador se separa, tamizándolo, café de mínimo dos calidades diferentes.

vi. Secado: es importante secar el café inmediatamente después del lavado, ya que su contenido de humedad es muy elevado y puede ser afectado por sobrefermentación, hongos o microorganismos que dañan irremediablemente la calidad del café. Consiste en secar de forma natural o artificial los granos de café para obtener una humedad adecuada para su correcto almacenamiento, sin riesgo para la calidad. Más adelante se concretará más este proceso.

vii. Almacenamiento: debido al desfase temporal entre producción estacionaria y comercialización, se requiere almacenar los granos de café hasta su venta. Es imprescindible mantener la calidad y la cantidad de café en el almacenamiento, ya sea en silos, bodegas o sacos. Para esto es necesario protegerlo del ambiente y del clima, de los cambios bruscos de temperatura (siempre alrededor de 20 OC) y de altas temperaturas que pueden ser destructivas, de los insectos, de los malos olores, de la contaminación y

de los robos; evitar, también, el desarrollo de hongos y microorganismos por demasiada humedad (humedad relativa del ambiente de 65 %).

1.14. Secado del café

Uno de los principales procesos en la obtención del café es el secado, ya que la humedad influye notablemente en el almacenado del grano de café. Muchos microorganismos atacan el grano si éste está excesivamente húmedo, lo dañan y deterioran su aspecto. El secado rápido del café recién recolectado evita el crecimiento de hongos y la producción de Ocratoxina A. Consiste básicamente en disminuir la humedad de valores alrededor del 55 %, a valores próximos al 12%. Un buen secado dará características a los granos que afectan a la calidad del café, como pueden ser: apariencia en oro, uniformidad de color, peso justo y sabor.

1.14.1. También se clasifica el proceso de secado en diferentes fases:

– Oreado: secado de la humedad superficial entre los granos y la superficie del pergamino. Se pasa del 55 % de humedad a valores de 48 %. – Presecado: se evapora el agua que se encuentra entre el pergamino y el grano, y en los poros del grano, reduciendo la humedad hasta un 32 %.

-Secado: se elimina el agua ligada al grano. Se llega a los valores de 12,5 %. Esta fase a diferencia de las anteriores, no depende de las condiciones exteriores, como son la temperatura, el caudal de aire y la humedad relativa, sino que está determinada por el movimiento de humedad dentro del grano.

Hay que tener en cuenta que los granos son seres vivos y la temperatura de secado podría afectarles notablemente, sobre todo si se trata de altas temperaturas. En este caso, se puede provocar daños irreversibles como el llamado springer. Las altas temperaturas dañan el embrión y el grano muere. Se distingue por la aparición de un punto negro en el embrión y el grano empieza a adquirir un color grisáceo. Esto ocurre cuando se trabaja con temperaturas superiores a los 65 OC en el oreado y el pre secado, y temperaturas superiores a los 60 OC, en el secado. Otro factor importante es la necesidad de remover el grano en el secado, así se logra un secado parejo y uniforme. Existen también algunos factores que según la tipología de secado se cumplirán y que pueden ser considerados, como son la contaminación y el posible ataque de depredadores.

1.14.2. Tipos de secados del café.

Existen, básicamente, dos alternativas para secar el café: de forma natural al sol, o de forma mecánica. Se puede realizar también de forma combinada, unas etapas del secado con una alternativa y las otras, con la otra. Si el secado es totalmente solar, se obtiene el denominado, café secado al sol; y si por el contrario, es totalmente secado mecánicamente, se obtiene café convencional. Si los procesos son parciales, se obtendrán calidades similares a las anteriores, pero ninguna será como el café secado al sol.

1. Secado en forma natural: es el proceso tradicional, ya que le atribuye al café cualidades importantes, sobre todo de sabor. En el sistema habitual, el café es esparcido en un patio de cemento con una inclinación del 1 %, expuesto a la radiación solar, con espesores de menos de 10 cm (al principio solo de 3 o 4 cm) y removido cada cierto tiempo, hasta que el grano haya perdido entre un 43 y 48 % del agua en relación a su peso. De esta forma tienen que pasar entre 8 y 15 días para llegar al nivel óptimo de humedad (12,5 % de humedad según la Organización Mundial del Café). Aunque este procedimiento es simple y barato tiene varios inconvenientes notables, a destacar: requiere características específicas del aire (alta temperatura y baja humedad), alto trabajo operativo (guardar en caso de lluvias y por la noche) y el grano está expuesto a contaminantes y la lluvia. Existen alternativas al secado en patios para aprovechar mejor la radiación solar: el uso de bandejas o camas africanas dan practicidad al sistema, o mucho mejor, el secado en secadores solares elimina todos los inconvenientes del secado en patios.



Figura 8. Secado tradicional en patio

2. Secado artificial o mecánico: se utilizan corrientes de aire generadas con un ventilador, es decir, con ventilación forzada. Puede también, calentarse dicho aire para secar más rápidamente. Se debe tener en cuenta, como se ha comentado anteriormente, no superar nunca los 60 °C.

Conclusiones parciales

En este capítulo se realizó una breve reseña histórica sobre la llegada del café a nuestro país. Se estableció el estado del arte sobre los procesos de secado de granos así como los beneficios de este para la sociedad y de los tipos de hornos solares más utilizados, características, ventajas y desventajas. Se planteó gran información sobre el beneficio húmedo del producto como los procesos de transformación que se le aplican hasta llegar a la instalación a diseñar. Quedaron explicados factores claves de la investigación relacionados con la transferencia de calor, el sol como principal fuente de energía, los procesos relacionados con la deshidratación solar.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

En una innovación tecnológica no sólo las características técnicas son importantes, sino también el proceso por el cual una población se apropia de ella. Los secadores solares pueden parecer una tecnología muy simple, pero deben tomarse en cuenta las siguientes consideraciones; las temperaturas que alcance el secador, el tiempo de secado, la humedad relativa, la ubicación y la calidad del secado. Los fenómenos de transferencia de energía y de humedad en el secado solar son complejos ya que en éstos influyen variables como la intensidad de la radiación solar (un día soleado tiene una intensidad en la superficie terrestre de $1\text{kJ/s}\cdot\text{m}^2$, y en 10 horas de sol se tendrían disponibles 36.000kJ/m^2), la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del aire, el contenido de humedad y el espesor de la capa de granos, caso en el cual interviene la frecuencia utilizada para revolver la masa de granos. (Martínez D. & Álvarez J., 2006)

2.2. Selección del deshidratador solar teniendo en cuenta el diseño y su influencia en las variables a utilizar.

Las variables utilizadas durante el proceso de secado son temperatura y humedad relativa, con base en estas variables se seleccionó el deshidratador solar de invernadero (ver figura 5), con el cual se tiene una mayor área de contacto del aire con la radiación solar, aumentando la temperatura del aire de secado, este tipo de deshidratador garantiza un mayor flujo de aire dentro del armario de secado, es decir que el aire que circula por el deshidratador solar tendrá una alta temperatura y estará poco saturado (baja humedad relativa). Teniendo en cuenta que la transferencia de calor ocurre desde una región de temperatura más alta hasta otra de temperatura más baja, existen tres modos de transmitir calor, estas son: conducción, convección y radiación. En este caso el modo que más influye es la convección, la cual supone la transferencia de calor por movimiento de masa. En la convección natural (por ejemplo, cuando el aire caliente sube desde la superficie de la tierra para ser reemplazado por aire más frío), el movimiento de la masa se debe a fenómenos naturales. En la convección forzada (por ejemplo, cuando se enfría una habitación al inyectarle aire más frío con un ventilador), el movimiento de la masa se induce de manera artificial. El deshidratador solar de invernadero facilita la convección natural, al aumentar la temperatura del aire, se genera una disminución en la densidad,

este aire tenderá a fluir de forma ascendente transfiriendo de esta forma el calor que ha adquirido el producto que se encuentra en las bandejas, al ascender el aire que se encuentra en el interior se forma en este lugar un vacío el cual será ocupado por aire nuevo del ambiente, este efecto es el mismo que ocurre en las termas que forman las nubes.

2.3. Partes de un deshidratador solar o horno solar tipo invernadero.

Con los principios y parámetros de funcionamiento se pueden definir algunas de las diferentes partes de un secador solar de café. Las otras sirven de complemento para un mejor funcionamiento:

1. Estructura: se necesita un espacio para ser calentado, limitado por la estructura, que a la vez, soporta el material semitransparente y las bandejas donde irá el café a secar. Debe ser resistente y de unas dimensiones apropiadas, ya que si es demasiado grande, se pierde poder de secado.
2. Material semitransparente: para que la radiación solar entre en el habitáculo y se produzca el efecto invernadero. Se necesita que sea resistente a la intemperie y los rayos del sol.
3. Bandejas: donde irán colocados los granos de café a secar. Se requiere que sean lo menos pesadas posible y que tengan el fondo agujereado para el correcto paso del agua y el aire. Normalmente constituidas por un marco y una malla como fondo.
4. Puerta: es indispensable tener acceso al interior del secador y a la vez no permitir el acceso excesivo de aire en los momentos de funcionamiento. La puerta permite ambos procesos.
5. Ventanas: en ausencia de ventilación forzada, se necesita generar una corriente de aire por convección natural. Las aperturas inferiores, espacio entre el material semitransparente y el suelo, permiten la entrada de aire frío, y las aperturas superiores, ventanas, la salida del aire caliente y cargado de humedad.
6. Suelo: debe permitir el correcto drenaje en caso de caer agua condensada o directa del producto. Debe permanecer siempre seco para no proporcionar humedad no deseada.
7. Protección: puede ser un muro o un agujero alrededor del secador que permita proteger el interior del secador del agua de lluvia y posibles intrusos.

En la figura 9 se representan los componentes del deshidratador solar tipo invernadero y su ubicación en el mismo.

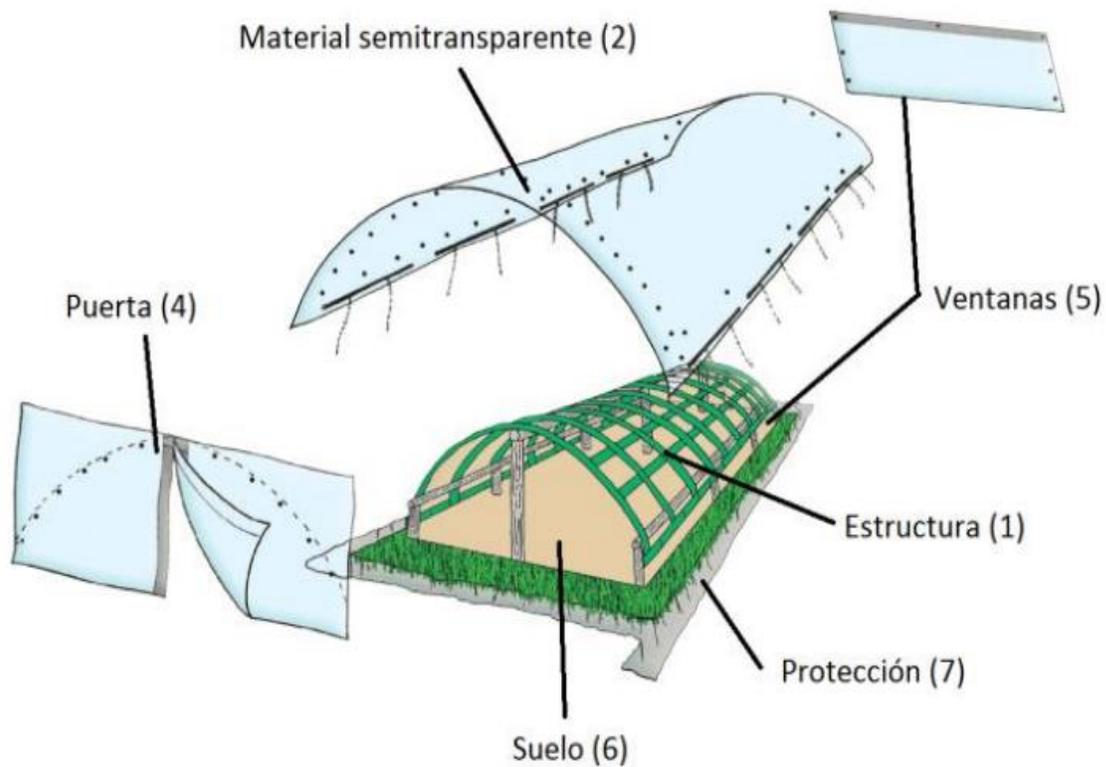


Figura 9: Esquema de las partes de un secador solar tipo invernadero.



Figura 11: Bandeja para secador solar.

2.4. Diseño

El diseño se realizara bajo el marco de las ecuaciones que describen el comportamiento térmico del secador y las propiedades del café. Sépase que el café recibido debe comenzar el proceso de chancado el mismo día que llego, según la experiencia de los productores, por lo que este diseño se basa en un promedio diario obtenido a partir de los datos históricos facilitados por el Centro de Gestión de Los Llanos, asi que la cámara de secado se deberá cargar con el producto que se procese en una jornada de trabajo. Esto se debe a que se diseñara para el caso crítico, que corresponde al primer día de secado que es cuando se extrae la mayor cantidad de agua del grano y por ende donde se requiere mayor energía.

Teniendo en cuenta la tabla que se muestra a continuación que representa la producción de café del Centro de Gestión del poblado de Los Llanos que es el lugar en el cual se realizó la investigación, se decidió realizar el diseño del deshidratador solar.

Tabla 2: Análisis de los resultados históricos de la cantidad de latas café (*Coffea arabica* Lin.) acopiadas en Centro de Gestión Los Llanos en las últimas 25 cosechas, así como el comportamiento de las variables climáticas temperatura media y precipitación máxima.

Cosecha	Latas acopiadas	Área (ha)	Rendimiento (L/ha)	Temperatura media °C	Precipitación máxima mm.
1993-94	313712	1123.61	279	25.4	972.6
1994-95	205875	1123.61	183	25.8	1384.6
1995-96	258750	1123.61	230	25.7	949.1
1996-97	275001	1123.61	244	25.3	1003.3
1997-98	273193	1123.61	243	26.0	932.2
1998-99	129549	1123.61	115	26.2	1014.1
1999-00	260586	1123.61	232	25.4	983.6
2000-01	255024	1123.61	227	25.6	812.8
2001-02	286793	1123.61	255	25.8	1175.4
2002-03	219882	1123.61	195	25.9	989.9
2003-04	218747	1123.61	194	26.1	1060.2
2004-05	172049	1123.61	153	25.9	687.6
2005-06	183333	1123.61	163	25.6	1283.1
2006-07	111420	1123.61	99	25.6	1506.0
2007-08	92852	1123.61	82	25.7	1701.1
2008-09	131784	1123.61	117	25.7	948.4
2009-10	78349	1123.61	69	25.9	834.2
2010-11	80635	1123.61	71	25.8	1273.9

2011-12	148969	1123.61	132	26.0	1037.4
2012-13	112269	1123.61	99	26.2	920.5
2013-14	95823	1123.61	85	26.3	851.1
2014-15	63783	1123.61	56	26.3	870.0
2015-16	45081	1123.61	40	26.7	706.3
2016-17	22007	840.61	26	26.3	938.0
2017-18	6000	840.61	7	25.8	1268.1

En los siguientes gráficos se observa comparación del promedio de café acopiado y la comparación entre el rendimiento promedio alcanzado en el Centro de Gestión en los últimos 5 lustros y la temperatura media.

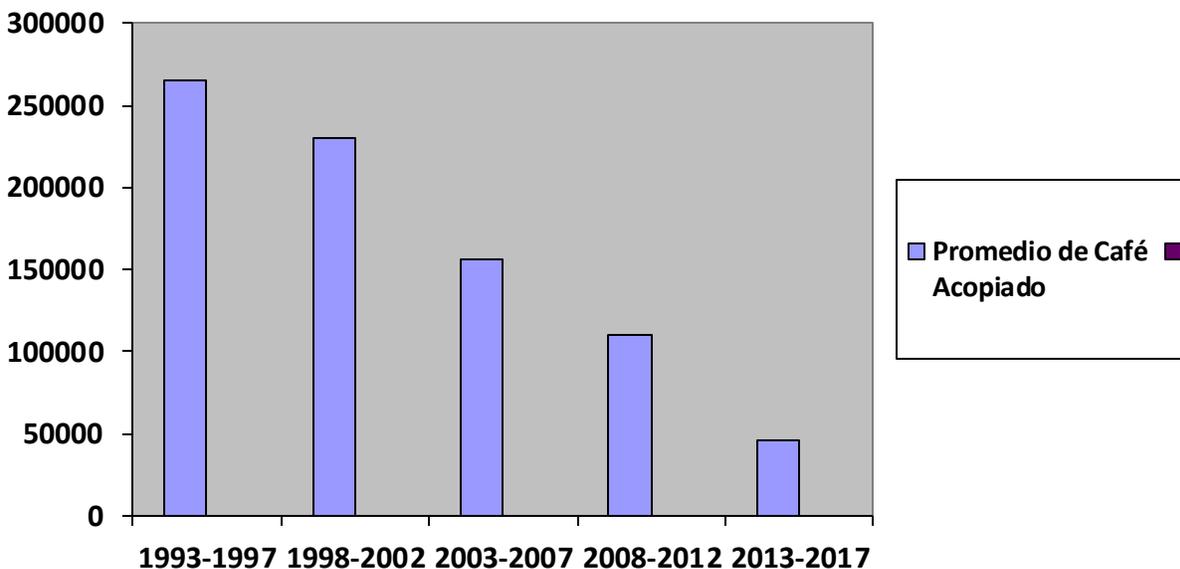


Gráfico No. 1: Comparación del promedio de café acopiado en el Centro de Gestión en los últimos 5 lustros.

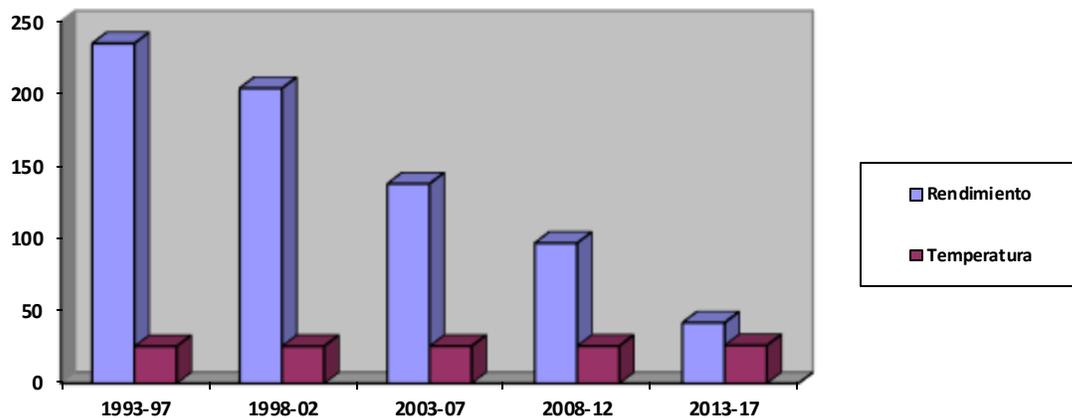


Gráfico No. 2: Comparación entre el rendimiento promedio alcanzado en el Centro de Gestión en los últimos 5 lustros y la temperatura media.

Con las comparaciones realizadas, el autor determinó, que la disminución en los rendimientos del cultivo del café (*Coffea arabica* Lin.) en el Centro de Gestión Los Llanos, ha estado acompañado de un aumento de la temperatura media, que en los últimos 25 años ha aumentado en $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, y determinar las condiciones de diseño del deshidratador solar.

Según las necesidades de café a secar, es decir, las cantidades de café producido, el tamaño del secador solar será diferente. Cumpliendo con los datos ofrecidos por la tabla anterior, se diseñará un secador que tiene 192 m de longitud, con 2 niveles de tarimas y seca hasta 24 000 kg de café de 5 a 7 días.

Para el diseño se decidió separar el sistema en dos componentes principales: un colector solar de para aumentar la temperatura del aire y reducir su humedad relativa y una cámara de secado donde se distribuye el café en bandejas y funciona bajo el concepto de invernadero.

La selección de los materiales d los materiales para estos elementos se vuelve sencillo al estar limitada la selección de los materiales, ya que se utilizan los acostumbrados para los invernaderos.

Estructura:

- 1- Tuvos cuadrados de acero galvanizado para los pilares
- 2- Tuvos redondos de acero galvanizado para los marcos.

Lugar de construcción:

El terreno destinado para la construcción debe ser un espacio libre de sombras (árboles o edificaciones), plano y con un buen sistema de drenaje para la canalización de agua tanto de lluvia como de lavado y limpieza.

Cubierta del hogar de secado:

El material que más facilita la construcción de este hogar y que se utiliza mayormente en obras similares es el polietileno por razones de disponibilidad, costo y facilidad de colocación y mantenimiento (cambio de cubierta). Según Corvalan, Horn, Roman y Saravia (1992) expone que en la mayor parte de los casos se utiliza polietileno con protección anti-UV y tratamiento térmico, lo que permite un periodo de uso entre dos y tres años y mejora el comportamiento térmico del sistema. Particularmente, se utilizara plástico térmico tricapa de 200 micras los cuales cumplen con las características necesarias para el uso deseado.

La estructura básica está constituida por marcos verticales y horizontales de acero galvanizado Habrá 4 filas de 6 vigas verticales de 9 x 9 cm de sección y separadas entre ellas 2 m, de derecha a izquierda, distribuidas de esta forma: primera fila con altura de 1,40 m y separada de la segunda 0,90 m; la segunda con altura de 1,20 m y separada de la tercera 1,20 m; la tercera con altura de 1,20 m y separada de la cuarta 0,90 m; y la última con altura de 1,40 m. Entre todas estas existen excepciones: los dos postes centrales de la primera, tercera y última fila, serán de 2 m de longitud.

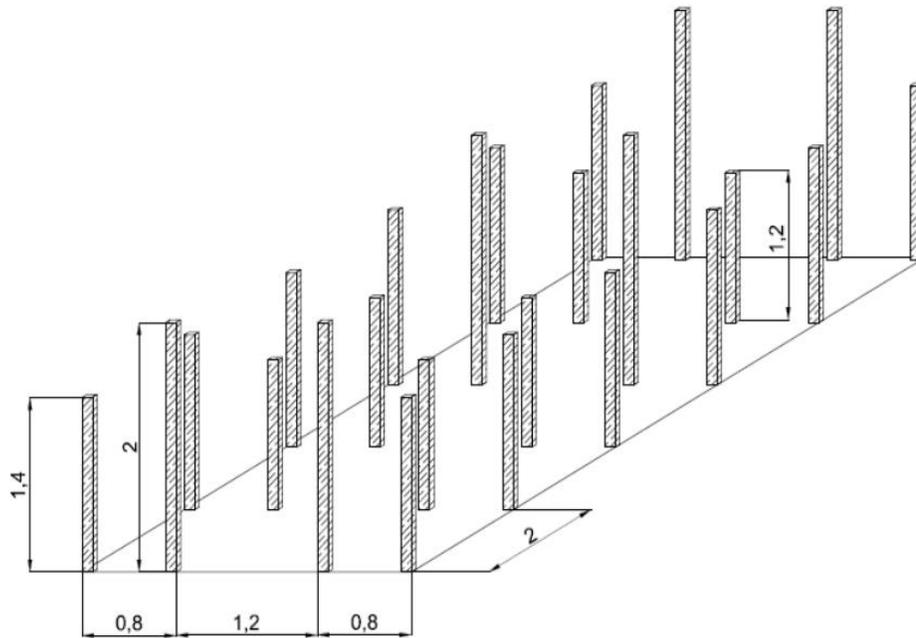


Figura 12. Distribución de los marcos verticales.

Para los marcos horizontales se colocaran 8 de 134 m de largo y 7 cm x 5 cm de sección. Se juntaran dos horizontales por cada fila de marcos verticales, a una altura superior de 0,70 y 1,20 m, respectivamente.

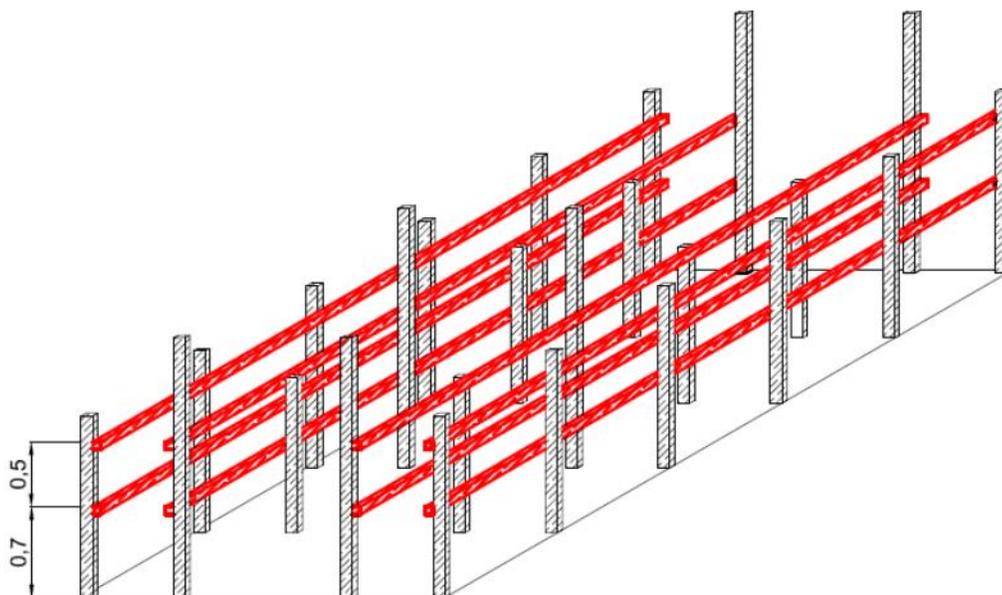


Figura 13. Distribución marcos horizontales

Para poder soportar mejor los travesaños del techo, se colocan tres marcos de soporte, uno al principio, otro en el centro y otro al final. Estos marcos constan de dos maderas horizontales de 7 cm x 5 cm de sección que se apoyan sobre las maderas verticales ya existentes de las filas interiores de 2 m de altura. El marco de la primera fila servirá de contramarco para la puerta. También se colocan marcos cuadrados en las filas primera y última para mantener las distancias de las maderas verticales. Son dos estructuras para cada fila que unen los postes exteriores con los interiores, a una altura de 1,40 m.

Estos marcos reforzaran la estructura y propiciarán una gran estabilidad al deshidratador al igual que le proporcionara resistencia a las condiciones climáticas del lugar.

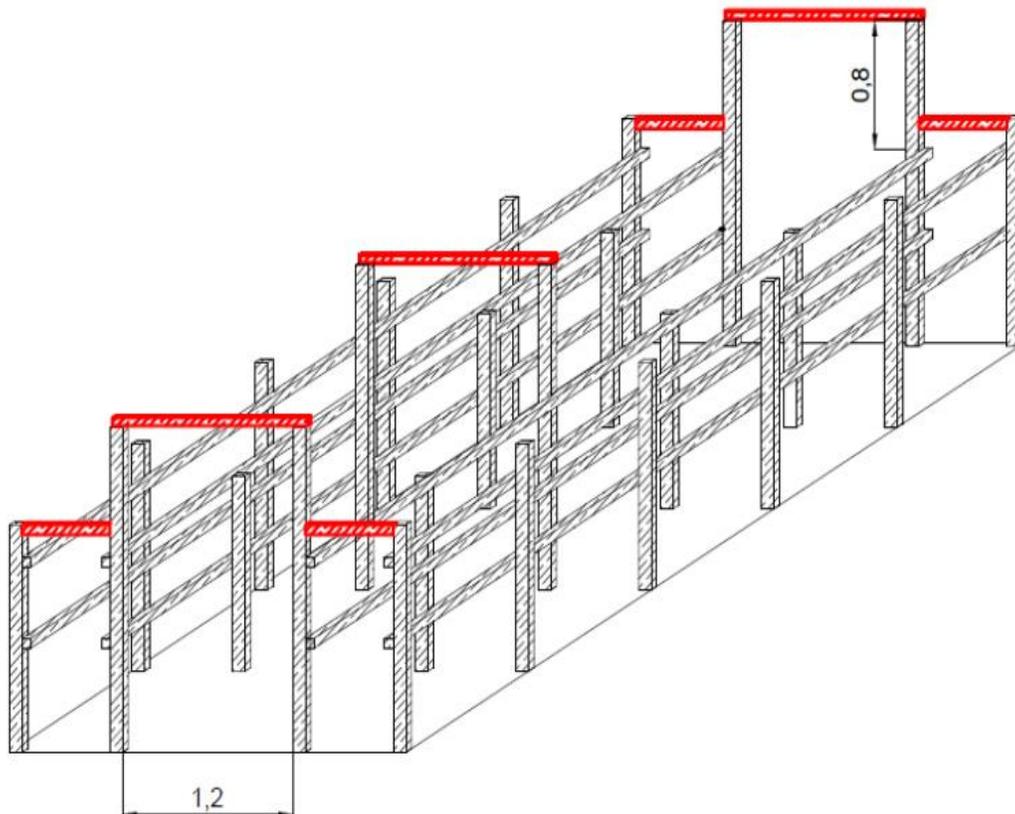


Figura 14. Marcos de soporte para los travesaños

Para terminar la estructura, se colocarán unos travesaños de acero galvanizado, que le darán forma de domo de unos 4 m de longitud. Éstos irán de cada palo vertical exterior de un lado al mismo del otro lado. Como hay 6 marcos verticales en cada lado, habrá que colocar 6 travesaños delgados de 2 cm de diámetro. Se apoyarán sobre una viga de 2 cm x 2 cm de sección y 132 m de longitud que se coloca sobre los marcos interiores y la

puerta de forma longitudinal. Encima de la puerta y los marcos se coloca una tablilla de madera para sujetar mejor los travesaños.

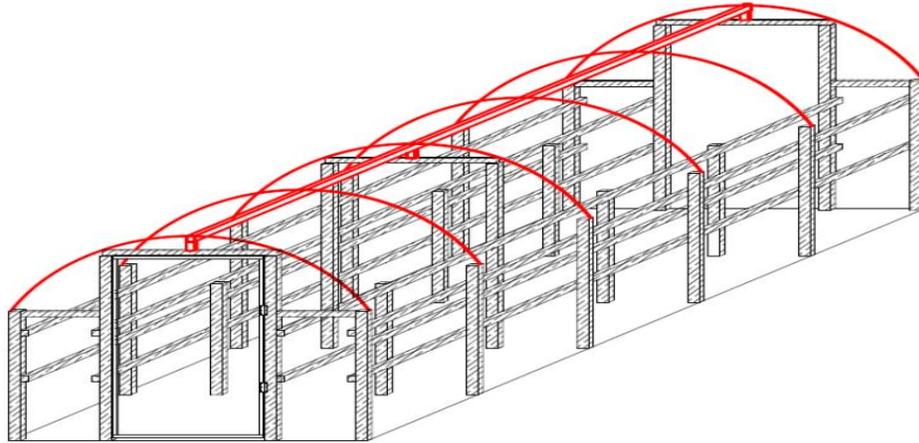


Figura 15: Distribución arcos travesaños

La construcción de la puerta constará de dos marcos, uno exterior y otro interior unidos por dos bisagras. Los postes de madera para el marco exterior serán los construidos como marcos en la primera fila. La misma puerta hace de soporte para los travesaños. El marco interior está hecho de maderas con sección 3 cm x 3 cm, separado 1 cm del marco exterior. Las medidas son: 1,18 m para las dos maderas horizontales y 1,19 m para las dos horizontales.

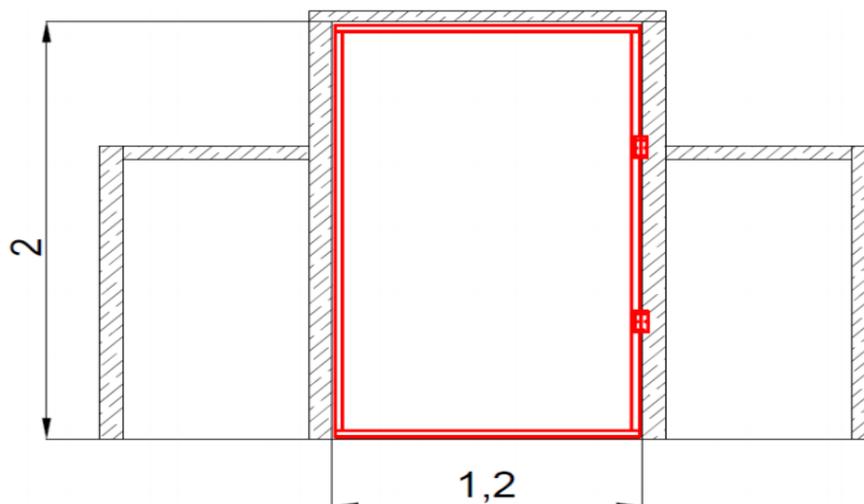


Figura 16. Puerta del secador solar.

En este momento ya está todo dispuesto para poner el plástico. Con tres trozos es suficiente: uno que cubra toda la parte central, uno para la entrada y otro para la parte de atrás. El primero tiene unas medidas de 6 m x 190 m, y los otros dos de 3 m x 2,2 m.

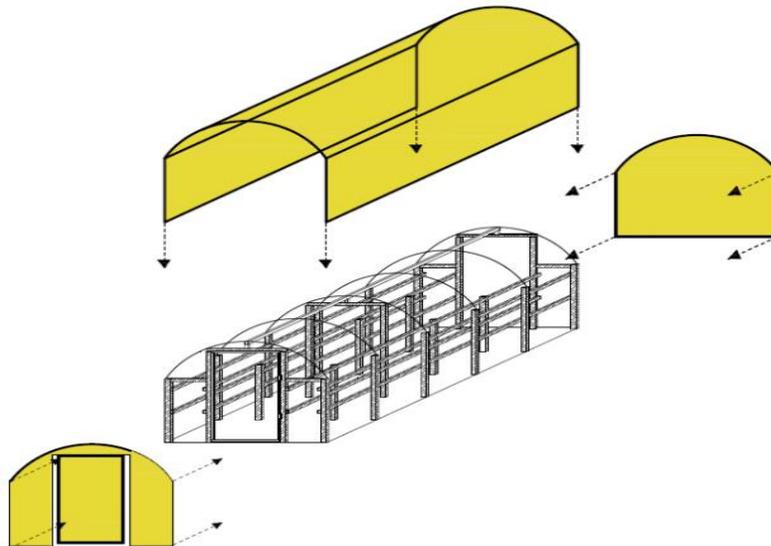


Figura 17. Colocación del plástico

Lo único que falta es la disposición de la ventilación. Para calcular la apertura de entrada necesaria se emplea la ecuación 2.1.

$$r_1 = \frac{V_{\text{secador}}}{A_{\text{entrada}}} \cdot 32 \quad (2.1)$$

En este caso el volumen del secador es de 54 m³ aproximadamente:

$$A_{\text{entrada}} = \frac{V_{\text{secador}}}{r_1} = \frac{54}{32} = 1,6875 \cdot 1,7m^2 \quad (2.2)$$

En este caso, con un espacio de unos 7 cm de entrada por la parte baja de la carpa será suficiente.

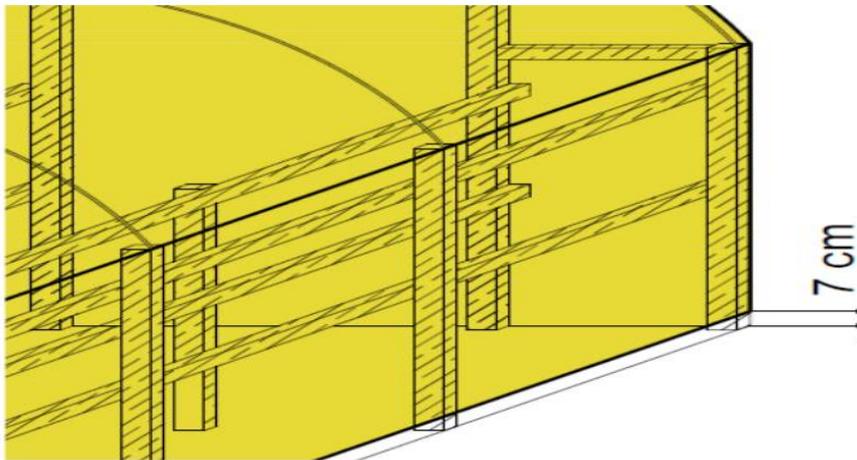


Figura 18. Espacio inferior para ventilación

Para la superficie de salida de aire:

$$r_2 = \frac{A_{entrada}}{A_{salida}} \cdot 8 \quad (2.3)$$

$$A_{salida} = \frac{A_{entrada}}{r_2} = \frac{1,7}{8} = 0,2125m^2 \quad (2.4)$$

Si se quiere una ventana con esta área de ventilación y teniendo en cuenta que el ancho está dado y que es de 1,20 m, la ventana tendrá que ser de 0,2 m de alto. Se puede hacer, por lo tanto, una ventana de 1,20 m x 0,3 m y abrirla o cerrarla en función de si sopla o no sopla viento.

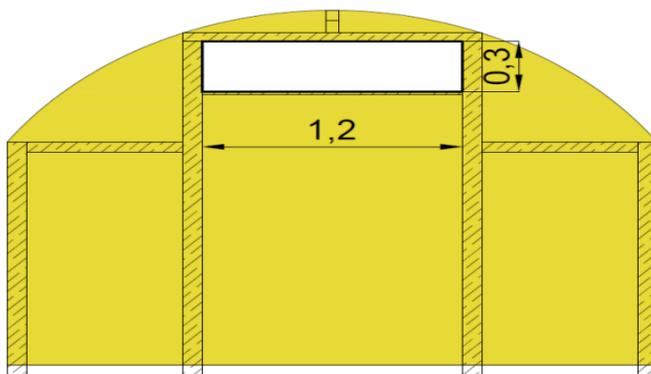
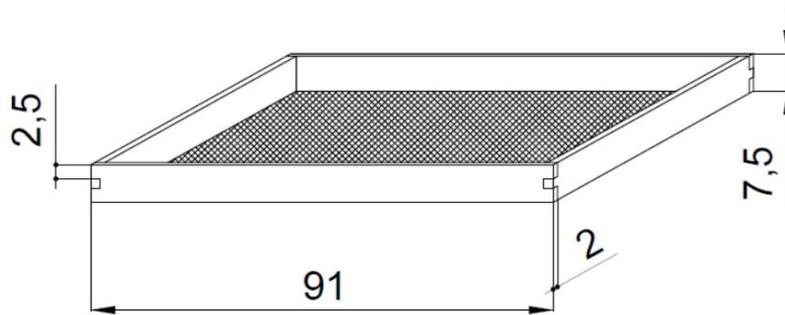


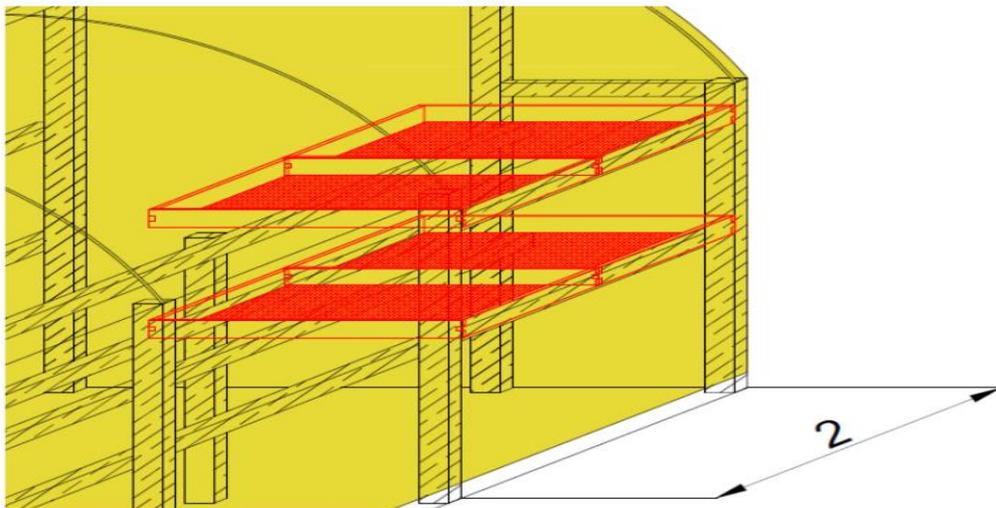
Figura 19. Ventana para la salida del aire caliente

Bandejas:

Las bandejas están constituidas por un marco de madera y una malla de $\frac{1}{4}$ " de paso. Sus dimensiones son: 89 cm x 89 cm interiores, para poder colocar una en cada metro de largo del secador y para cada nivel. El marco está compuesto por tablas de 91 cm de largo, 7,5 cm de ancho y 2 cm de espesor, unidas entre sí con unión machihembrado.

**Figura 20.** Bandeja para el secado

De esta manera por cada metro de largo del secador, se colocaran dos bandejas, una para cada nivel.

**Figura 21.** Bandeja colocada en el secador

Así pues, según las producciones de café a secar se determinará el tamaño del secador solar. Se recomienda la utilización de 2 niveles de bandejas porque para la misma estructura es mayor la capacidad de café a secar. Si la producción es muy baja, se puede utilizar un secador de 6 m con un nivel de bandeja

2.5. Determinación del área de la cámara de secado.

Para llevar a cabo el dimensionamiento de la cámara de secado es necesario determinar las siguientes variables de diseño global:

A_s : Superficie de la cámara (m^2).

G : Flujo másico del aire (kg/s).

G_u : Flujo másico del aire unitario ($kg/(s \cdot m^2)$).

A_c : Área de la cubierta de la cámara (m^2).

El área de la cubierta A_c se determina a partir del área de la cámara A_s utilizando un factor según la geometría constructiva que se utilice.

$$A_c = F_c \cdot A_s \quad (2.5)$$

Además son necesarios determinar los valores de G_u : flujo masico del aire unitario y de M_a : masa de agua a secar. Estos parámetros se calculan por las siguientes ecuaciones:

$$G_u = G/A_s. \quad (2.6)$$

$$M_a = M_p \cdot 0.43 \cdot P_{ag} \quad (2.7)$$

Donde:

M_p : Masa de café lavado a secar.

P_{ag} : Porcentaje de agua en producto fresco.

Otra ecuación clave para el diseño dentro de la cámara es la determinación del porcentaje de agua evaporado en el primer día, que se determina por la siguiente ecuación:

$$P_{pr} = M_{pr}/M_a \quad (2.8)$$

Donde:

M_a : Masa total de agua a extraer.

M_{pr} : Masa de agua a secar el primer día.

De la masa total de agua a extraer M_a , una parte muy importante se elimina el primer día M_{pr} . Y es con base en esta cantidad de agua evaporada en el primer día con el que se diseña el sistema de secado de café; en este día es cuando se requiere mayor cantidad de energía (pico de consumo), ya que en los días posteriores el grano estará más seco.

Estos parámetros aparecen en la Tabla 4 con sus respectivos valores.

2.6. Colector solar de aire

Existen gran cantidad de colectores solares con el mismo fin: aumentar la temperatura de un fluido. Es imprescindible que para este sistema de secado solar para café, el colector utilizado sea un equilibrio ente eficiencia y costo. Es importante destacar que la finalidad de usar un colector solar de aire para este sistema de secado es reducir la humedad relativa del aire mediante un calentamiento sensible del fluido como resultado de aumentar la temperatura un 10 °C. Y con esto tener mayor disponibilidad energética (que la entalpia del aire dentro de la cámara de secado sea mayor que la del aire ambiente) sin alcanzar valores altos de temperatura a los que no pueda estar expuesto el producto por mucho tiempo.

Para este caso se decidió luego de un análisis extenso, que la mejor opción es un colector solar de placas planas con superficie absorbente metálica ondulada para que haya un mayor contacto entre el aire y la placa, generando una mayor transferencia de energía en forma de calor y que el aire pase simultáneamente por encima y por debajo de ella para aprovechar la convección en ambas caras.

El colector solar de Placas Planas (FCP), es un intercambiador de calor que usa la radiación solar incidente (directo o difuso) en su superficie, esta energía después de atravesar una serie de cubiertas (1 a 3), que pueden ser de vidrio o plástico, es absorbido por la placa la cual puede tener un recubrimiento selectivo, una vez almacenada en forma de calor es transferido a los tubos unidos a la placa absorbidora que contiene el fluido de trabajo, el cual puede ser en su mayoría agua, refrigerante o aire . En la siguiente figura aparece representado un ejemplo de dicho colector.

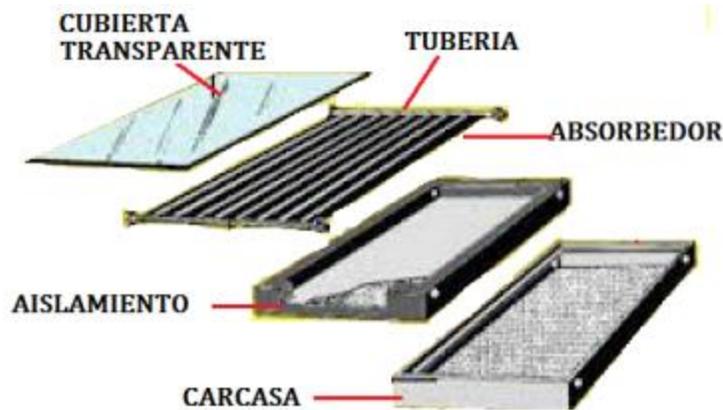


Figura 22: Partes componentes del colector solar de Placas Planas.

En su investigación, El Sawi et al (2010) indican la ecuación fundamental que define a los colectores solares de la siguiente manera:

$$n = Q_u / A \cdot I \quad (2.9)$$

Donde:

n : Eficiencia del colector.

Q_u : Calor útil ganado por el colector.

I : Radiación incidente que se aproxima 800 W/m^2 para la zona.

A : Area del colector.

Sin embargo, según Cengel (2007) define como el calor ganado de un colector solar de una manera más sencilla y con variables operativas de un sistema:

$$Q_u = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{sal} - T_{ent}) \quad (2.10)$$

Donde:

\dot{m} : Flujo másico.

C_p : Calor específico del aire.

T_{ent} : Temperatura ambiente.

T_{sal} : Temperatura del aire a la salida del colector.

De esta manera se establece la fórmula para calcular el área del colector para este sistema de secado:

$$A = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{sal} - T_{ent})}{n \cdot I} \quad (2.11)$$

En su investigación el Sawi et al (2010) determinaron la eficiencia teórica para este tipo de colector solar, convergiendo en que la eficiencia teórica promedio para un colector de placas planas es de 70 % y se determinó que el flujo másico necesario es de 2 kg/s y con un calor específico de 1005 J/kg al sustituir estos valores se obtiene un área igual a $A = 35,5 \text{ m}^2$.

Con base a lo anterior se define que el colector debe ser de $6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ y seccionados en paños de un metro por un metro para reducir la posibilidad de dañar la cubierta.

2.7. Orientación del deshidratador solar.

Este es un factor de suma importancia para la hora del diseño del deshidratador solar, por la ubicación del lugar en donde se va a diseñar el mismo y teniendo en cuenta la ubicación geográfica del municipio se decidió orientar el diseño en una posición Norte-Sur la cual favorece en las horas de radiación solar que recibirá el deshidratador y en una mayor área del mismo.



Figura 23: Orientación del deshidratador solar teniendo en cuenta la ubicación geográfica del municipio Maisí.

2.8. Cálculos para determinar los parámetros esenciales para la efectividad del deshidratador solar.

Para determinar estos parámetros se tuvo en cuenta dos factores claves incidentes en el proceso de secado que son la convección la cual se explicó anteriormente siguiendo lo

planteado por Cengel y Boles (2003) y la radiación térmica la cual se abordara a continuación.

2.9. Radiación térmica:

El efecto invernadero producido dentro de la cámara de secado y que da paso a la transferencia de calor por convección, es producido por el fenómeno de transferencia de calor llamado radiación térmica, la cual, según Cengel (2007), es el tipo de radiación electromagnética que resulta pertinente en el estudio de la transferencia de calor, ya que es emitida como resultado de las transiciones energéticas de las moléculas, átomos y los electrones de una sustancia o cuerpo y es emitida de forma continua por toda materia cuya temperatura este por encima del cero absoluto.

En la tabla que se muestra a continuación se representan un promedio por mes de los valores de la incidencia de la radiación solar en el municipio Maisí durante los años 1983 hasta el 2017.

Primera mente hay que mencionar que el municipio se encuentra a una latitud de $20,20^{\circ} N$ a $-74^{\circ} W$ y a una altura sobre el nivel del mar de $8 m$.

Tabla 3: Incidencia de la radiación solar en Maisí. Fuente: Base de datos de la NASA.

Mes	Glob Hor kwh/m ² · mes	Diff Hor kwh/m ² · mes	T amb °C
Enero	130,5	40,92	24,50
Febrero	140,0	42,00	24,40
Marzo	175,8	55,49	24,60
Abril	186,3	60,60	24,80
Mayo	185,7	70,99	25,60
Junio	186,6	67,80	26,40
Julio	197,8	68,20	26,60
Agosto	188,8	65,72	26,80
Septiembre	165,3	58,50	26,70
Octubre	151,6	51,77	26,50
Noviembre	128,4	42,00	26,000

Diciembre	120,3	39,68	25,10
-----------	-------	-------	-------

Donde.

Tamb: Temperatura ambiente.

Glob Hor: Radiación solar.

Diff Hor: Radiación solar difusa

De suma importancia mencionar que entre los factores que intervienen en la radiación térmica, están la radiación incidente producida por la emisividad de diferentes cuerpos, donde dicha radiación incidente se ve afectada por tres factores: absorptividad, reflectividad y transmisibilidad. Para el caso de la radiación incidente se define, según Cengel (2007), como: La intensidad de la radiación incidente $I_i(\theta, \delta)$ es la razón a la cual la energía de radiación dG incide desde la dirección (θ, δ) por unidad de área de la superficie receptora normal a esta dirección y por unidad de ángulo sólido alrededor de esta última.

De ahí se establece la siguiente ecuación:

$$G = \int dG = \int_{\delta=0}^{2\pi} I_i(\theta, \delta) \cos(\Theta) \cdot \sin(\delta) \, d\theta \, d\delta \quad (2.12)$$

Donde:

$$G = \left[\frac{W}{m^2} \right]: \text{Radiación incidente} \quad (2.13)$$

θ : Ángulo entre la dirección de la radiación incidente y la normal a la superficie.

En la siguiente figura se reflejan dichos componentes de manera gráfica según lo planteado por Cengel (2007)

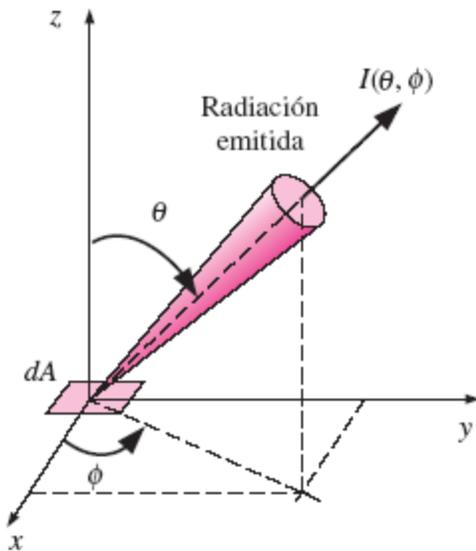


Figura 24: Se usa la intensidad de radiación para describir la variación de la energía de radiación con respecto a la dirección.

A continuación se representan las ecuaciones de los factores que afectan la radiación incidente.

α : Absorvitividad.

$$\alpha = \frac{G_{abs}}{G}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (2.14)$$

ρ : Reflectividad.

$$\rho = G_{ref}/G, \quad 0 \leq \rho \leq 1 \quad (2.15)$$

τ : Transmisitividad.

$$\tau = \frac{G_{tr}}{G}, \quad 0 \leq \tau \leq 1 \quad (2.16)$$

G_{abs} : Radiación absorbida.

G_{ref} : Radiación reflejada.

G_{tr} : Radiación transmitida.

En la siguiente figura se ilustran estos componentes gráficamente.

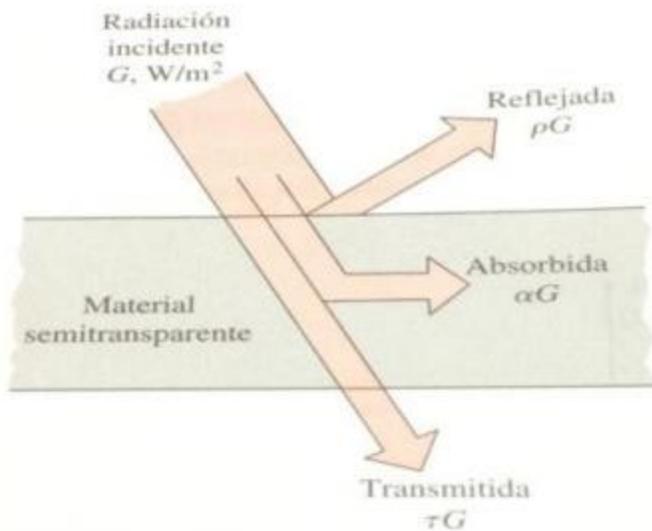


Figura 25: Representación de los factores de radiación incidente, absorptividad, reflectividad y transmitividad.

2.10. Balance de energía

Para simplificar el análisis para el diseño del horno solar fue necesario establecer un balance de energía que se fundamenta en la primera ley de la termodinámica (Ley de conservación de la energía): la energía no se crea ni se destruye se transforma. Es así como a partir de este principio se fundamenta un balance de energía: el cambio en la energía total de un sistema es igual a la energía que entra al sistema menos la energía que sale de este y como ecuación se define como:

$$\Delta E = E_{entra} - E_{sale} \quad (2.17)$$

En este sistema de secado de café, la energía que se recibe proviene únicamente de la radiación solar, la cual se debe descomponer en los diferentes tipos de energía que se tienen en los elementos: conducción, convección y energía de vaporización.

A pesar de lo complicado que puede ser interpretar como se descompone la energía y las formas en las que se presentara, Cengel y Boles (2003) la han definido como tres mecanismos de transferencia.

1: Transferencia de calor (ganancia de calor): incrementa la energía de las moléculas y por lo tanto la energía del sistema y la pérdida de calor desde un sistema hacia el medio la disminuyen.

2: Trabajo: es toda aquella interacción energética que no es causada por una diferencia de temperatura entre un sistema y sus alrededores.

3: Flujo másico: sirve como un mecanismo adicional de transferencia de energía en un sistema, ya que cuando de algo de masa sale del sistema, la energía contenida dentro del sistema disminuye, ya que la masa q sale expulsa energía del medio.

2.11. Transferencia de masa

Esta se corresponde con la cantidad de agua que posee el café y que se debe disminuir alrededor de un 12% en base húmeda. Esta agua se traslada al aire del sistema por medio de la convección de masa producto a una diferencia entre las concentraciones de agua del aire y del grano.

2.11.1. Transferencia de calor y masa en el secado de café

El fenómeno principal que se da en el secado del café es la vaporización de agua que se encuentra en la superficie y en el interior del grano, y la difusión de ese vapor hacia el aire de secado. Por lo que es evidente que este proceso se convierte en una transferencia simultánea de calor y masa, ya que se da un cambio de fase (de líquido a gas).

A continuación se muestran algunos factores que evidencian el papel del aire en el proceso de secado:

1: Psicrometría: estudia mediante las propiedades termodinámicas, el análisis de las condiciones y procesos que involucran aire húmedo.

2: Aire saturado: condición que presenta el aire cuando contiene todo el vapor de agua que es capaz de contener, sin que haya precipitación.

3: Humedad absoluta ω : masa de vapor de agua por unidad de volumen de aire seco.

4: Humedad relativa HR : es el cociente entre la humedad absoluta ω y la que tendría si estuviera completamente lleno de agua.

$$HR = \frac{\omega}{m_s} \quad (2.18)$$

5: Temperatura de rocío: se define como la temperatura a la que inicia la condensación del agua contenida en el aire.

6: Temperatura del bulbo húmedo: esta se mide con un termómetro.

7: Temperatura del bulbo seco: temperatura ordinaria del aire.

8: Carta psicométrica: es una gráfica que presenta todos los cálculos necesarios para determinar las propiedades del aire a una determinada presión atmosférica o altitud con respecto al nivel del mar.

2.12. Altura sobre el nivel del mar y presión atmosférica

Doria y Cruz de Andrés (1992) explican que la presión atmosférica disminuye con la altura. Para determinar esta presión en función de la altura se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$\frac{P}{P_0} = \left[\frac{288 - 0,065z}{288} \right]^{5,256} \quad (2.19)$$

Pero en el caso de estudio estos valores se obtuvieron en la oficina municipal del CITMA de Maisí.

En la tabla que se muestra a continuación se evidencian estos valores brindados por el CITMA necesarios para utilizar en el diseño del deshidratador solar.

Tabla 4: Condiciones ambientales a utilizar en el diseño. (Fuente: Polaina, 1987)

Variable	Valor
Elevación sobre el nivel del mar	8,0 m.s. n. mar
Presión atmosférica	34,5 kpa
Humedad absoluta	16,02 g. agua/kg. aireseco
Temperatura del bulbo seco	35,5°C
Humedad relativa	60 %
Temperatura del bulbo húmedo	27,5 °C
Variación diurna de temperatura	12,0 °C
Velocidad de los vientos	8 ENE

H: Elevación sobre el nivel del mar (m)

Φ : Humedad Relativa (%)

Tbs: Temperatura de bulbo seco (°C)

Tbh: Temperatura de bulbo húmedo (°C)

Dt: Variación diurna de temperatura (°C)

VDV - Velocidad y dirección de los Vientos (km/h)

Fuente: POLAINO DE LOS SANTOS. LAZARA: Instalaciones de climatización, Roberto Fuente. Ciudad de la Habana, ISPJAE, 1987.

2.13. Ecuaciones para el balance de energía

La ecuación que gobierna el balance de energía es la descomposición de la radiación solar (MJ/dia) en sus componentes referidos al efecto sobre la cámara de secado:

$$Q_{rad} = Q_{cub} + Q_{suelo} + Q_{sen} + Q_{ev} \quad (2.20)$$

Donde:

Q_{rad} : Radiación solar diaria captada por el deshidratador.

Q_{cub} : Energía que se pierde a través de la cubierta del deshidratador.

Q_{suelo} : Energía que se pierde a través del suelo.

Q_{sen} : Energía utilizada para el calentamiento de aire dentro del deshidratador (calor sensible).

Q_{ev} : Energía utilizada en la evaporación del agua.

De la radiación solar que llega a la cámara de secado (H_h) medida sobre la superficie horizontal del horno solar, una parte es reflejada y el resto es absorbido por la cubierta, el suelo, el aire en el interior y la parte útil por el café.

Esta distribución de la radiación depende en mucho del tipo de cubierta que se utilice, ya que según su composición química y características físicas así será el impacto que tenga sobre el diseño, por lo tanto, siguiendo la recomendación de Corvalán, R. et al (1992) se ara el desarrollo bajo la premisa que el plástico a utilizar será *polietileno con protección anti-UV* y tratamiento térmico, del cual se conoce la distribución que genera la radiación.

La distribución de porcentaje fue recopilada por Corvalán, Horn, Roman y Saravia (1992) y se muestra en la tabla 7.

Tabla 5: Distribución de la radiación incidente en fracción.

Coeficiente	Significado	Valor Típico
Sr	Radiación reflejada	0,25
Sc	Radiación absorbida en la cubierta	0,17
Sp	Radiación absorbida por el producto	0,50
Ss	Radiación absorbida por el suelo	0,08
rc	Recuperación de radiación de la cubierta	0,40
rs	Recuperación de radiación del suelo	0,30

Debido a lo anterior, la expresión que define a la radiación total absorbida por la cámara de secado es la siguiente:

$$Q_{rad} = (S_p + r_c \cdot S_c + r_s \cdot S_s) \cdot A_s \cdot H_h \quad (2.21)$$

$$Q_{rad} = C_{apr} \cdot A_s \cdot H_h \quad (2.22)$$

$$C_{apr} = \text{Coeficiente de aprovechamiento} = (S_p + r_c \cdot S_c + r_s \cdot S_s) \quad (2.23)$$

Sobre la cubierta de la cámara se tiene una pérdida por convección en donde se transfiere calor al aire circundante, correspondiente a un coeficiente h_c .

Si T_{cam} es la temperatura del aire que entra a la cámara, se tiene entonces:

$$Q_{cub} = h_c \cdot A_c \cdot (T_{cam} - T_a) \cdot N_h \cdot 3600. \quad (2.24)$$

$$Q_{cub} = h_c \cdot F_c \cdot A_s \cdot (T_{cam} - T_a) \cdot N_h \cdot 3600 \quad (2.25)$$

Donde:

h_c : Coeficiente de convección de la cubierta $[W/m^2 \cdot ^\circ C]$.

Tcam: Temperatura del aire dentro de la cámara °C.

Nh: Numero de horas de funcionamiento por día .

3600: Factor de conversión de horas a segundos

Fc: Factor de relación del área de la cubierta respecto al área de secado.

Así mismo en el suelo se da una pérdida por convección correspondiente al aire que circula dentro de la cámara que se considera como h_s con lo que se tiene que:

$$Q_{\text{suelo}} = \tau_s \cdot h_s \cdot A_s \cdot (T_{\text{cam}} - T_a) \cdot N_h \cdot 3600 \quad (2.26)$$

Por otro lado, el aire que está dentro de la cámara también sufre un cambio psicométrico, ya que aumenta la temperatura debido al calentamiento generado por el horno, esto se convierte en una pérdida de energía para el sistema y la expresión que cuantifica esta carga es la siguiente:

$$Q_{\text{sens}} = G \cdot N_h \cdot 3600 \cdot C_p \cdot (T_{\text{cam}} - T_a) \quad (2.27)$$

C_p : Calor específico del aire = $1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$

El aire que ingresa a la cámara tiene una humedad absoluta inicial (ω_a) y luego de pasar por la cámara lo abandona con una humedad final mayor a la inicial (ω_{cam}). Considerando el calor de cambio de fase del agua de líquido a vapor (q_f) la energía consumida en la vaporización del agua que se encuentra en el café se describe como sigue, convirtiéndose en la parte útil de toda la energía captada:

$$Q_{\text{ev}} = q_f \cdot G \cdot N_h \cdot 3600 \cdot (\omega_{\text{cam}} - \omega_a) \quad (2.28)$$

Donde:

ω_a : Humedad absoluta del aire que entra a la cámara.

ω_{cam} : Humedad absoluta del aire a la salida de la cámara.

q_f : Calor latente de vaporización de agua = $2400 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$.

Al reemplazar las diferentes expresiones equivalentes en la ecuación de Q_{rad} y reorganizando, se obtiene la relación de energía para el sistema analizado:

$$\text{Capr} \cdot \text{As} \cdot \text{Hh} = (\tau_s \cdot h_s + h_c \cdot \text{Fc} + \text{Gu} \cdot \text{Cp}) \cdot \text{Nh} \cdot 3600 \cdot (\text{Tcam} - \text{Ta}) + \text{Gu} \cdot \text{Nh} \cdot 3600 \cdot q_f (\omega_{\text{cam}} - \omega_a). \quad (2.29)$$

En este caso se define la relación lineal entre dos variables psicométricas a determinar para evaluar el sistema de secado solar: $\text{Tcam} \wedge \omega_a$.

A partir de la psicometría en análisis, se determina que al limitar la humedad relativa del aire de trabajo (HR), se crea directamente una relación entre: $\text{Tcam} \wedge \omega_a$ sobre la curva de HR y las condiciones necesarias para secar el café.

Debido a esta relación y al fijarse la humedad relativa máxima admisible, se obtiene la relación definitiva entre $\text{Tsec} \wedge \omega_{\text{sec}}$. Por lo cual se escribe la ecuación 2.29 de la siguiente manera:

$$\frac{(\text{Tsec} - \text{Ta})}{\text{Dt}} + \frac{(\omega_{\text{sec}} - \omega_a)}{D\omega} = 1 \quad (2.30)$$

Donde:

$$\text{Dt} = \frac{\text{Capr} \cdot \text{Hh}}{[(\tau_s \cdot h_s + h_c \cdot \text{Fc} + \text{Gu} \cdot \text{Cp}) \cdot \text{Nh} \cdot 3600]} \quad (2.31)$$

$$D\omega = \frac{\text{Capr} \cdot \text{Hh}}{(\text{Gu} \cdot \text{Nh} \cdot 3600 \cdot q_f)} \quad (2.32)$$

El resultado de estas dos ecuaciones se traza en la carta psicométrica tomando como condiciones iniciales a la que ingresa el aire a la cámara de secado y a partir de este punto se aumenta la temperatura en una magnitud Dt y lo mismo se hace con la humedad absoluta; se aumenta en una cantidad igual a $D\omega$ a partir de su punto inicial (de manera ortogonal a partir del punto inicial).

Luego se traza una línea que una estos dos puntos y donde se interseque con la humedad relativa máxima definida para el secado de café, corresponde a la humedad y la temperatura de la cámara ($\omega_{\text{cam}} \wedge \text{Tcam}$).

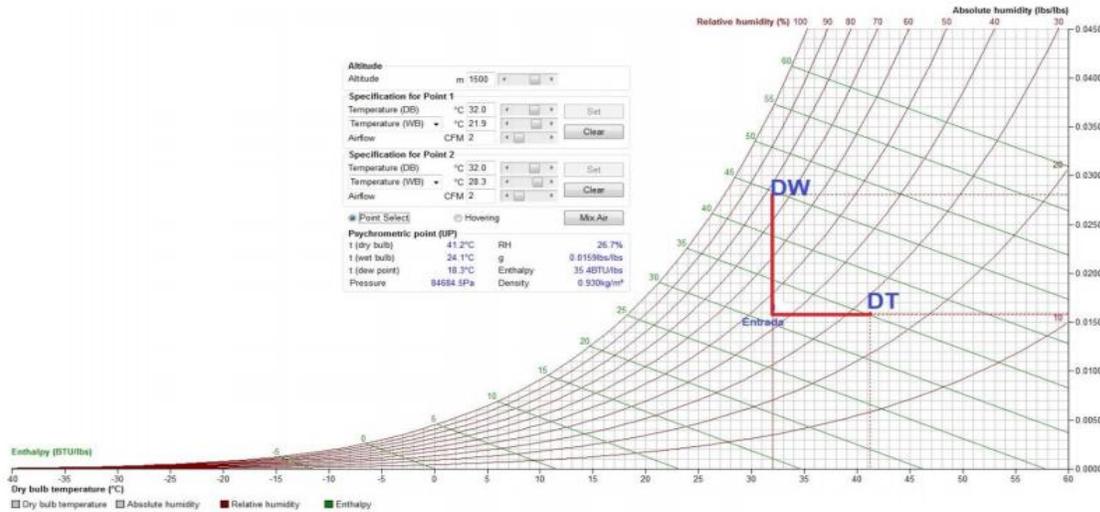


Figura 26: Representación gráfica DW y DT.

Así mismo, la diferencia de humedad absoluta que se da en proceso determina la cantidad de agua evaporada durante el primer día de secado, y que se representa físicamente de la siguiente manera:

$$M_{pr} = G \cdot N_h \cdot 3600 \cdot (\omega_{cam} - \omega_a) \tag{2.33}$$

Y por tanto, una vez conocida ω_{cam} a partir del diagrama psicrométrico se determina la masa de agua eliminada el primer día al sustituir ω_{cam} en la ecuación anterior.

Así mismo, determinar ω_{cam} da pie a conocer la masa total de agua evaporada en el proceso de secado del café al incorporar el área de la cámara de secado (A_s); se obtiene una descripción total del sistema definiendo la masa total de agua a secar (M_a) como:

$$M_a = \frac{f_{cam} \cdot G_u \cdot A_s \cdot N_h \cdot 3600 \cdot (\omega_{cam} - \omega_a)}{P_{pr}} \tag{2.34}$$

f_{cam} : Aumento en la disponibilidad energética de la cámara = 1,68.

Con esta información y al seguir el análisis matemático que se presenta a continuación a partir de las relaciones que se generan entre todas las ecuaciones expuestas anteriormente se logra obtener las variables de dimensionamiento que se presentaron al inicio de este capítulo: $A \wedge G$.

Para resolver el sistema de ecuaciones se comienza las ecuaciones:

$$Ma = Pag \cdot Mp \cdot 0,43 \quad (2.35)$$

$$Ma = \frac{f_{cam} \cdot Gu \cdot As \cdot Nh \cdot 3600 \cdot (\omega_{cam} - \omega_a)}{Ppr} \quad (2.36)$$

Que combinándolas generan la siguiente relación:

$$\frac{f_{cam} \cdot Gu \cdot As \cdot Nh \cdot 3600 \cdot (\omega_{cam} - \omega_a)}{Ppr} = Ma = Pag \cdot Mp \cdot 0,43 \quad (2.37)$$

$$f_{cam} \cdot Gu \cdot As \cdot Nh \cdot 3600 \cdot (\omega_{cam} - \omega_a) = Pag \cdot Mp \cdot 0,43 \cdot Ppr \quad (2.38)$$

De esta forma para conocer el flujo másico de aire necesario para este sistema, se debe multiplicar a Gu por el área de la cámara. Ahora procederemos al cálculo de As a través de un despeje:

$$As = \frac{Pag \cdot Mp \cdot 0,43 \cdot Ppr}{f_{cam} \cdot Gu \cdot Nh \cdot 3600 \cdot (\omega_{cam} - \omega_a)} \quad (2.39)$$

Luego:

$$G = As \cdot Gu \quad (2.40)$$

En su libro, Corvalan, Horn, Roman y Saravia (1992) se refiere a un valor eficiente de flujo de aire unitario para secadores solares tipo invernadero como: (...) las experiencias realizadas han mostrado que valores de flujo por unidad de área del secador, en el orden de $0,01 \frac{kg}{s} \cdot m^2$ son necesarias para permitir un buen funcionamiento del secador.

2.14. Secuencia de diseño:

- Datos del producto.
- Selección del horno solar en función de los aseguramientos requeridos.
- Definir las estructuras para el secador así como proponer las cuestiones esenciales, como materiales a utilizar, componentes y representación gráfica de estos.
- Determinar los factores psicométricos según las ecuaciones planteadas.
- Determinación de variables.

Conclusiones parciales

Con base en la experiencia de los productores del municipio, son necesarios de 5 a 7 días para el secado del grano y la época de recepción de café es de tres meses al año. Con

base en los datos históricos de cosecha se obtiene un promedio diario de 90 fanegas de café recibiendo café de lunes a sábado. Sin embargo el diseño se ara para 95 fanegas lo que equivale aproximadamente a 24 000 kg. (1 fanega =254 kg).

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

3.1. Introducción

Con base en la experiencia de los productores del poblado de Los Llanos , que es el lugar donde se implementara el deshidratador son necesarios cinco días para el secado del grano (jornada) y la época de recepción de café es de tres meses al año. Con base en los datos históricos de cosecha, se obtiene un promedio diario de 90 fanegas (reciben café de lunes a sábado). Sin embargo el diseño se ara para un total de 95 fanegas, lo que equivale aproximadamente a 24 000 kg (1 fanega = 254 kg).

Así mismo con base en la curva del secado de café durante el primer día se evaporan el 20 % del agua contenida en el grano, indicando que el porcentaje de agua en producto fresco corresponde al 53 %. De igual forma la FAO establece que la humedad relativa máxima a la que se debe exponer el café en condiciones óptimas es de 60 %.

Con estos datos y los recopilados en los capítulos anteriores se obtienen los siguientes valores sobre los datos del producto y los parámetros del diseño.

Tabla 6: Datos del café.

Variable	Valor	Significado
Mp	2 400 kg	Masa de café húmedo a secar
Pag	34 %	Porcentaje de agua en producto fresco
Hh	$18 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{dia})$	Radiación diaria sobre el hogar
Ta	34 °C	Temperatura suministro a la cámara
Wa	0,01602 kg	Humedad absoluta del ambiente
Nds	5 d	Días para secar el café
Nh	10 d	Número de horas de secado por día
Ppr	20 %	Porcentaje de secado del primer día
Gu	$0,01 \text{ kg}/\text{s} \cdot \text{m}^2$	Flujo másico unitario de aire
HRmax	60 %	Humedad relativa máxima permitida

Tabla 7: Parámetros de diseño para la cámara de secado.

Parámetro	Significado	Valor
Sr	Radiación reflejada	0,25
Sc	Radiación absorbida en la cubierta transparente	0,17
Sp	Radiación absorbida por el producto	0,50
Ss	Radiación absorbida por el suelo	0,08
r _c	Recuperación de radiación de la cubierta	0,40
r _s	Recuperación de radiación del suelo	0,30
F _c	Factor de relación del área de la cubierta y el suelo	2
h _c	Coefficiente de convección en la cubierta	10 W/m ² · °C
h _s	Coefficiente de convección en el suelo	8 W/m ² · °C
C _p	Calor específico del aire	1,005 kJ/kg · °C
q _f	Calor latente de agua	2400 kJ/kg

Sustituyendo los valores respectivos en las diferentes ecuaciones, se obtiene:

$$\text{Capr} = (\text{Sp} + r_c \cdot \text{Sc} + r_s \cdot \text{Ss}) = 0,592$$

$$\text{Dt} = \frac{\text{Capr} \cdot \text{Hh}}{[(r_s \cdot h_s + h_c \cdot \text{Fc} + \text{Gu} \cdot \text{Cp}) \cdot \text{Nh} \cdot 3600]} = 9,12$$

$$D\omega = \frac{\text{Capr} \cdot \text{Hh}}{(\text{Gu} \cdot \text{Nh} \cdot 3600 \cdot q_f)} = 0,01233$$

Ahora trasladamos estos valores al diagrama psicrométrico y al trazar la línea que las une, se puede descubrir en el punto de intersección con la línea de Hr = 60 %, los valores correspondientes para ($\omega_{\text{cam}} \wedge T_{\text{cam}}$) según como se aprecia a continuación:

$$\omega_{\text{cam}} = 0,02496 \text{ kg.}$$

$$T_{\text{cam}} = 34,31 \text{ }^\circ\text{C.}$$

En la Figura 27 se aprecia la nueva representación en la carta psicrométrica con los valores obtenidos.

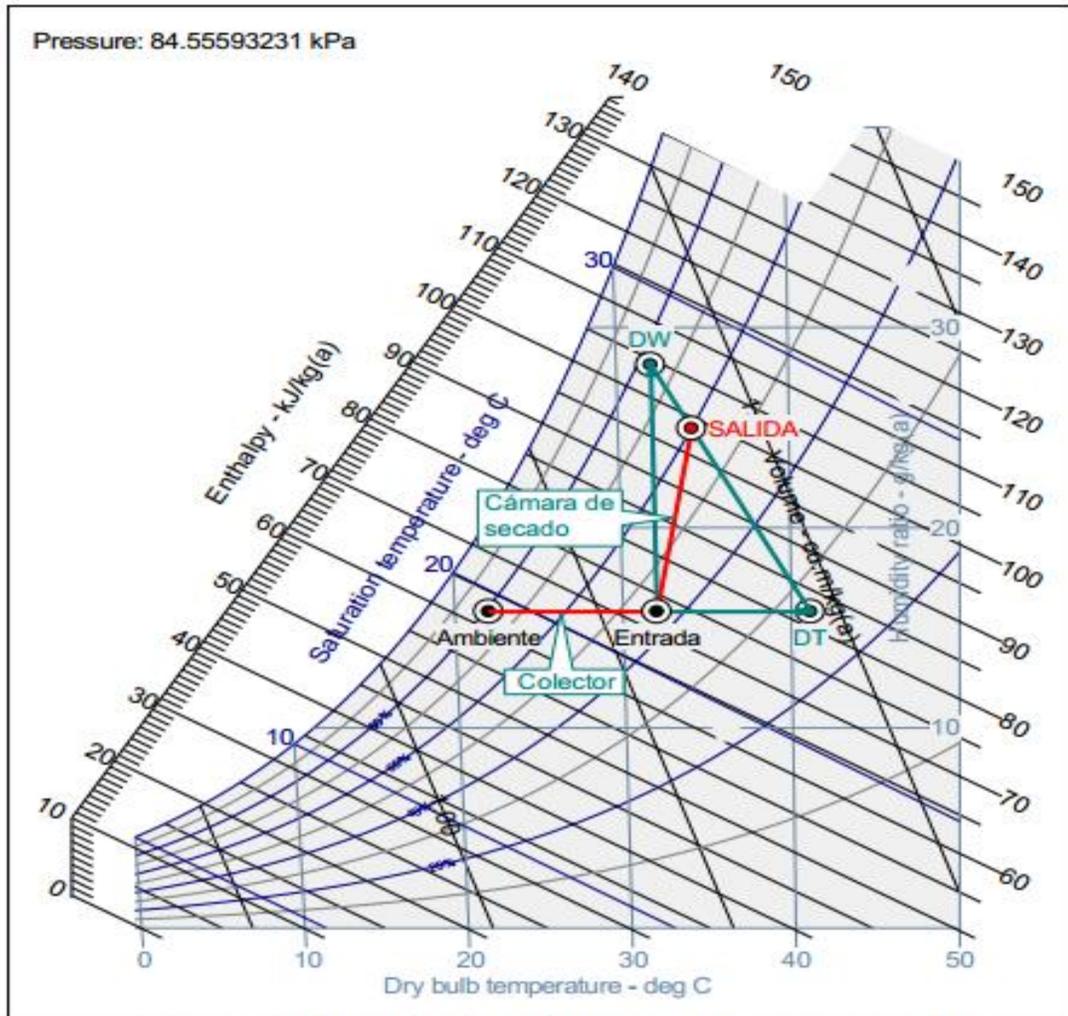


Figura 12. Psicrometría del sistema de secado solar para café.

Fuente: (Los Autores)

Figura 27: Representación gráfica de la carta psicométrica.

Luego de estos valores se procede a sustituir ω_{cam} en la ecuación 2.39 para determinar el área de secado:

$$As = \frac{Pag \cdot Mp \cdot 0,43 \cdot Ppr}{f_{cam} \cdot Gu \cdot Nh \cdot 3600 \cdot (\omega_{cam} - \omega_a)}$$

$$As = \frac{0,53 \cdot 24\,00\text{ kg} \cdot 0,43 \cdot 0,20}{1,68 \cdot 0,01\text{ kg/s} \cdot \text{m}^2 \cdot 10 \cdot 3600\text{ s/h} \cdot (0,0248 - 0,01581)\text{kg}}$$

$$As = 198\text{m}^2$$

Con este valor se determina la otra variable de dimensionamiento: el flujo másico del aire Gu con base en la ecuación 2.40:

$$G = A_s \cdot G_u = 198 \text{ m}^2 \cdot 0,01 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$$

$$G = 1,98 \text{ kg/s}$$

$$G = 2 \text{ kg/s.}$$

El espacio que requiere un beneficio para 24 000 kg de café en un tiempo de secado promedio de cinco días, depende del espesor de cama. Según se la experiencia y los estudios hechos, se determinó que la cantidad de café lavado que se debe extender sobre un metro cuadrado de suelo es de 34 kg. Así mismo el 43 % de este total corresponde a la cantidad de café lavado que se extenderá en los patios. A partir de esto, el espacio demandado para extender 10 320 kg de café (en grano) es de 322 m².

Una vez definidas estas macro variables se proseguirá a distribuir el café sobre las bandejas, que por sus dimensiones esta área de secado se convierte en 90 bandejas, para lo cual, se ha decidido construir tres niveles separados 60 cm uno del otro y cada uno con 30 bandejas, distribuidas en un arreglo de 5 filas por 6 columnas por 3 niveles. Además se debe considerar los espacios libres que se debe dejar para la manipulación y recolección del café que en este caso convierte el área de la cámara de secado en 130 m² (10 m de ancho por 13 m de largo).

3.2. Análisis económico

Una vez determinada el área requerida y según el arreglo a utilizar en la cámara de secado, se produce a definir ciertas variables que nos permitan realizar un análisis económico que a la vez permita demostrar la rentabilidad del diseño propuesto para el deshidratador solar de café, entre estas variables se tiene la inversión inicial, los beneficios propios del proyecto y los costos en los que se implicara a lo largo de su vida útil.

3.3. Inversión inicial

De acuerdo con los costos aproximados de los materiales a utilizar, el costo promedio de la mano de obra para este tipo de construcciones, se tiene el siguiente valor de inversión inicial que se representan en la siguiente tabla.

Tabla 8: Inversión inicial.

Materiales	Costo aproximado
Preparación del lugar de construcción	\$ 300
Cámara de secado	\$ 2 000
Estructura para cubierta	\$ 7 000
Cubierta	\$ 4 000
Bandejas	\$ 900
Colector solar	\$ 10 500
Estructura	\$ 3 500
Vidrio	\$ 700
Mano de obra	\$ 4 250
Imprevistos	\$ 2 000
Total	\$ 35 150

3.4. Beneficio

En cuanto a los beneficios o flujos positivos para el proyecto como tal se tiene el ahorro que se hace en compra de madera debido a que ya no abra necesidad de utilizar dicha madera como combustible para producir gases de combustión que se utilizan en el secado, este ahorro está estimado, según representantes del Centro de Gestión en aproximadamente \$ 66 anuales (aproximadamente el 15 % del consumo total. Debido a que el espacio para secar el grano se disminuye en un 60 % con respecto al secado en patios, se puede utilizar el mismo espacio de secado y a la vez incrementar la producción en un porcentaje igual, es decir en un 60 %, con esto se tendrá que de acuerdo a un precio de mercado promedio de venta del quintal de café de \$ 225 00. Además es importante aclarar que de los 10 320 kg de café que se ponen a secar (con contenido de agua y cascarilla) al final se obtienen 4 370 kg para vender; esta es la masa que queda al final del proceso de ya cuando se ha tostado el café y separado la cascarilla. Esto a partir del entendido que de los 10 320 kg al final queda alrededor de un 42,34 %.

Además de una utilidad neta promedio de 25 % sobre las ventas finales del quintal de café, con un incremento aproximadamente de \$ 51 366 por año a lo largo de la vida útil. Este sería el caso más crítico en donde el precio de venta del quintal de café se mantenga constante a lo largo de este periodo.

Otro beneficio o flujo positivo es la reducción de la mano de obra debido a la implementación del secador solar por etapas no se tiene en cuenta ya que no se puede

estimar su valor para el análisis, sin embargo sigue siendo beneficio el cual puede cuantificarse e inclusive dan un valor agregado tanto al producto final como al diseño del deshidratador solar.

3.5. Costos.

Para este caso se define como costo o flujo negativo la sustitución de la cubierta al menos 3 veces durante la vida útil, luego se tiene el costo de reparación de bandejas el cual va incrementando a una tasa del 10 % según los aumentos propios del mercado en materiales de construcción y por último se tiene la mano de obra de operación que también aumenta, a una tasa de 3,5 %, que correspondería a aumentos salariales promedio salariales (2 por año) en el país.

3.6. Tasa interna de retorno y valor actual neto.

La inversión inicial tiene un periodo de recuperación de 1 año, con una tasa interna de retorno (TIR) de 86,8 % y un valor actual neto (VAN) de \$ 131 377,10 descontando una tasa del 15 %, que es la tasa promedio que manejan las entidades financieras en su línea de crédito pymes, para pequeñas y medianas empresas.

En el anexo 1 se representan los valores por los cuales se calcularon el VAN y el TIR así como los otros factores requeridos para este cálculo.

3.7. Conclusiones parciales

En el análisis económico para la viabilidad del proyecto se consideró un aumento del 60 % de la producción con un precio de venta de \$ 225 00/quintal de café y una utilidad de un 25 %, una inversión de \$ 35 150 y un periodo de depreciación lineal de 10 años sin valor de rescate, dando como resultado una tasa interna de retorno (TIR) de 86,8% y un valor actual neto (VAN) de \$ 131 337. Los principales resultados fueron una disminución del 60 % del espacio requerido para secar el café en comparación con el secado tradicional en patios, pasando de 322 m² a 132 m², y un aumento del 58 % del aumento de la disponibilidad energética para el secado (entalpía del aire), que aumento de 62,4 kg/kj a 98,5 kg/kj. Además se evidencia una disminución del tiempo de secado a través de los resultados obtenidos realizados en la investigación.

CONCLUSIONES GENERALES

Es posible diseñar un deshidratador solar para café, que aproveche una energía alternativa sin perjudicar la calidad final del producto mediante el control preciso de la razón de deshumidificación y temperatura de secado. Este control evita exponer el grano a condiciones que le puedan restar propiedades deseables o hacer mal uso de la energía o el espacio físico destinado al proceso de secado.

La energía térmica solar disponible ($18 \text{ MJ/m}^2 \text{ día}$) se usa muy bien en el diseño propuesto dado que aprovecha un 58 % más de esa energía que en un proceso de secado en patios. Esta innovación incorpora un colector solar de placa, que realiza un proceso de calentamiento sensible, aumentando la temperatura del bulbo seco del aire ambiente 10°C aproximadamente (cambio de temperatura de diseño) y disminuyendo la humedad relativa en casi un 50 %, lo que se traduce directamente en un aumento de la capacidad del aire para extraer agua desde el grano hacia el ambiente.

Las variables de entrada para el diseño del colector, como la temperatura del bulbo seco $35,5^\circ\text{C}$ y la humedad relativa 60 %, se determinan con rigurosidad debido a que influyen directamente en la energía que puede entregar el colector al aire para calentarlo. Interpretado de otra manera, mientras más baja sea la temperatura y más alta la humedad relativa, más área de colector solar se necesita para lograr un buen rendimiento. En su defecto, si se mantiene el área de superficie colectora, menos temperatura y disminución de la humedad relativa se va a disponer para el secado en la cámara.

Como el proceso de secado es un factor limitante en la producción de café se determinó que para desarrollar un proyecto atractivo se debe construir un sistema de secado capaz de procesar al menos 24 000 kg de café lavado. Según el balance de energía y masa, se necesita un área de 320 m^2 si se secura en patios, pero al utilizar este sistema el área se reduce a 132 m^2 (60 %), lo que se refleja un aumento de producción.

Para contabilizar la ganancia en la disponibilidad energética, se comprobó la entalpía del aire en condiciones ambientales ($62,4 \text{ kJ/kg}$) contra la del sistema propuesto de dos etapas ($98,5 \text{ kJ/kg}$) dando como resultado un aumento del 58 %. Esto podría reducir el tiempo de secado lo que implica la posibilidad de recibir más café y aumentar la producción anual.

Estos puntos clave (reducción del espacio de secado en 60 % y aumento de 58 % de la disponibilidad energética) se asocian directamente a un mayor potencial de producción asociado a mayores ingresos monetarios.

El colector solar requerido para aumentar en 10 °C la temperatura de un flujo de aire de 2 kg/s, se determinó a partir de un balance de energía que indicó un área de 36 m² y para reducir la pérdida de calor se determinó que por facilidad en el mercado, se utilizara fibra de vidrio como aislante. Aquí los materiales más importantes son la lámina de captación de energía que debe ser de aluminio y la cubierta, que se recomienda que sea de vidrio claro de 6 mm de espesor, ya que sus características son beneficiosas por reflejar poco calor y evitar que se transfiera calor desde el colector hacia el ambiente a través de él.

Según el análisis económico y contemplando este diseño como un proyecto de inversión, se tiene un rendimiento de recuperación de la inversión inicial de menos de 2 años, convirtiéndolo en un proyecto altamente rentable, esto sin considerar el aumento del precio de la venta del quintal de café el cual incide positivamente en la rentabilidad del proyecto.

Al ser este proyecto un desarrollo con sello cubano, es importante que la fabricación y la puesta en marcha sean a partir de los recursos del país y no con tecnología extranjera, con la finalidad de que el conocimiento se quede en Cuba y desarrollar un nuevo producto con sello nacional.

RECOMENDACIONES

El secador solar para funcionar correctamente debe ser colocado en un lugar idóneo (que este no tenga sombra de árboles). Este debe ser colocado en contra del viento para que exista una mayor circulación de aire.

Para iniciar el secado deben ser cerradas las compuertas del secador y dejar así por una hora, para que este acumule calor y se cree un ambiente caliente. El grano de café debe moverse cada $\frac{1}{2}$ hora para que este seque uniformemente.

Al entrar al secador no exceder los 20 minutos en un día soleado, se recomienda abrir todas las compuertas del secador antes de entrar. No apto para personas hipertensas.

BIBLIOGRAFÍAS

(MARCALA, 2010). Denominacion de origen de café MARCALA, Secadoras solares, recuperado el 09 de mayo del 201 1 de: <http://www.cafedecolombia.com>.

A.Restrepo. J. Burbano. (2005). Disponibilidad térmica solar y su aplicación en el secado de granos. Scientia et Technica No 27, 127 -132.

Abdala J., Fonseca S., Pantoja J. y Gen A., 2003, Secado de café pergamino en secadores solares, recuperado de:

AMCA, Internacional. (2007). Fans and systems. Publicado 2006-2007. Arlington Heights, IL 60004-1893.

ANACAFE. (2005).Manual de Beneficio Humedo de Café. Guatemala.

Artículo # 5: Energía solar en Cuba. Oficina municipal del CITMA. Maisi,

Barrios O, A. O. (1998). En ANACAFE, Beneficiado Húmedo y su Control de Calidad. In Manual de Caficultura (págs. 229 -259). Ciudad de Guatemala.

Berruta, V. (2003). Aprovechamiento de la energia solar para el secado de café.

Cengel, Y. (2007). Transferencia de Calor y Masa. Reno: McGraw-Hill.

Cengel, Y., & Boles, M. (2003). Termodinámica. México: McGraw-Hill Interamericana.

CICAFE. (2011). Guía Técnica para el Cultivo de Café. Heredia: ICAFE –CICAFE.

Collares. P., M (1992). Radiación Solar. En R. Covalan, M. Horn, R. Roman, & L. Saravia, Ingeniería del Secado Solar (pág. 11). CYTE-D.

CUBAENERGÍA: (Delgado M., Leiva G., Perdigón Z., Bériz L., 2009).

El-Sawi, Younan, Elsayed, & Basily. (Enero 2010). Application of folded sheet metal in flat bed solar air collector.

<http://www.uo.edu.cu/ojs/index.php/tq/article/viewFile/2014/1652>.

ICAFE. (2012). La tecnología en el café: el beneficiado. Recuperado el 10 de mayo 2018, de Sitio Oficial ICAFE: <http://www.icafe.go.cr>.

MINAG municipal. Centro de Gestión Los Llanos. Maisi, Guantánamo, Cuba.

Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, Santiago, Chile 1993, Manual de manejo poscosecha de granos a nivel rural.

Oliveros C.; Ramírez, C. Sanz, J.; Peñuela A. (2006). Secador solar de túnel para café pergamino. Chinchiná, Caldas, Colombia.

Paulo Cesar & Alfonso Junior, Delgada capa de secado natural de las ecuaciones de café y café pergamino, Universidad Federal, Depto. EngenhariaAgrícola, de Vicosá, 36571-000 Vicosá MG, Brazi, 2001 ASAE Annual International Meeting Sponsoredby ASAE ,de : <http://www.asea.frimul.com>.

POLAINO DE LOS SANTOS. LAZARA: Instalaciones de climatización, Roberto Fuente. Ciudad de la Habana, ISPJAE, 1987.

Tesis de Deshidratador Solar. Universidad de Costa Rica. Oscar Ramírez Hernández.

Yunus, C. (2007). Transferencia de calor y masa.

ANEXOS**Anexo 1: Flujo de efectivo para el secado de café.**

Inversión inicial: \$ 35 150.

Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A-M \$	66 \$	66 \$	66 \$	66 \$	66 \$	66 \$	66 \$	66 \$	66 \$	66 \$
Calidad	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Espa.dis p (+60%)	\$ 51 300	\$ 513 00	\$ 51 300	\$ 51 300	\$ 51 300	\$ 51 300	\$ 51 300	\$ 51 300	\$ 51 300	\$ 51 300
Beneficio	\$ 51 366	\$ 51 366	\$ 51 366	\$ 51 366	\$ 51 366	\$ 51 366	\$ 51 366	\$ 51 366	\$ 51 366	\$ 51 366
Costos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sust. Cub	-	-	\$ 4 000	-	-	\$ 4 500	-	-	\$ 5 000	-
Rep.ban	\$ 600	\$ 660	\$ 726	\$ 799	\$ 878	\$ 966	\$ 1 063	\$ 1 169	\$ 1 286	\$ 1 415
Mano de obra	\$ 2000	\$ 2 070	\$ 2 142	\$ 2 217	\$ 2 295	\$ 2 375	\$ 2 459	\$ 2 545	\$ 2 634	\$ 2 726
Costos	\$ 2 600	\$ 2 730	\$ 6 868	\$ 3 016	\$ 3 174	\$ 7 842	\$ 3 521	\$ 3 714	\$ 8 920	\$ 4 141
B - C	\$ 48 766	\$ 48 636	\$ 44 498	\$ 48 350	\$ 48 193	\$ 43 524	\$47 845	\$ 47 652	\$ 44 446	\$ 47 225
Valor resi	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F.O.N	\$ 35 150	\$ 40 000	\$ 48 766	\$ 48 636	\$ 44 498	\$ 48 350	\$ 48 193	\$ 43 524	\$ 47 845	\$ 47 625
E - F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Deprecia.	\$ 4000	\$ 4000	\$ 4000	\$ 4000	\$ 4000	\$ 4000	\$ 4000	\$ 4000	\$ 4000	\$ 4000
U-A-I	\$ 44 776	\$ 44 636	\$ 40 498	\$ 44 350	\$ 44 193	\$ 39 524	\$ 43 845	\$ 43 652	\$ 38 446	\$ 43 225
Impuesto	\$ 13 430	\$ 13 391	\$ 12 149	\$ 13 305	\$ 13 258	\$ 11 857	\$ 13 153	\$ 13 096	\$ 11 534	\$ 12 968
U - N	\$ 31 336	\$ 31 245	\$ 28 348	\$ 31 045	\$ 30 935	\$ 27 677	\$ 30 691	\$30 557	\$ 26 912	\$ 30 258
Depre.	\$ 4 000	\$ 4 000	\$ 4 000	\$ 4 000	\$ 4 000	\$ 4 000	\$ 4 000	\$ 4 000	\$ 4 000	\$ 4 000
F-N-E	\$ 35 336	\$ 35 245	\$ 32 348	\$ 35 045	\$ 34 945	\$ 31 667	\$34 691	\$ 34 557	\$ 30 912	\$ 34 258

TIR proyecto: 86,8 %.

VAN proyecto: \$ 131 337,10.

Anexo 2: Etapas del secado del café.

Cambios de aspecto del grano a través del secamiento



Etapas del proceso de secado



La pérdida de peso en porcentaje, en virtud del secado se puede calcular de la siguiente forma:



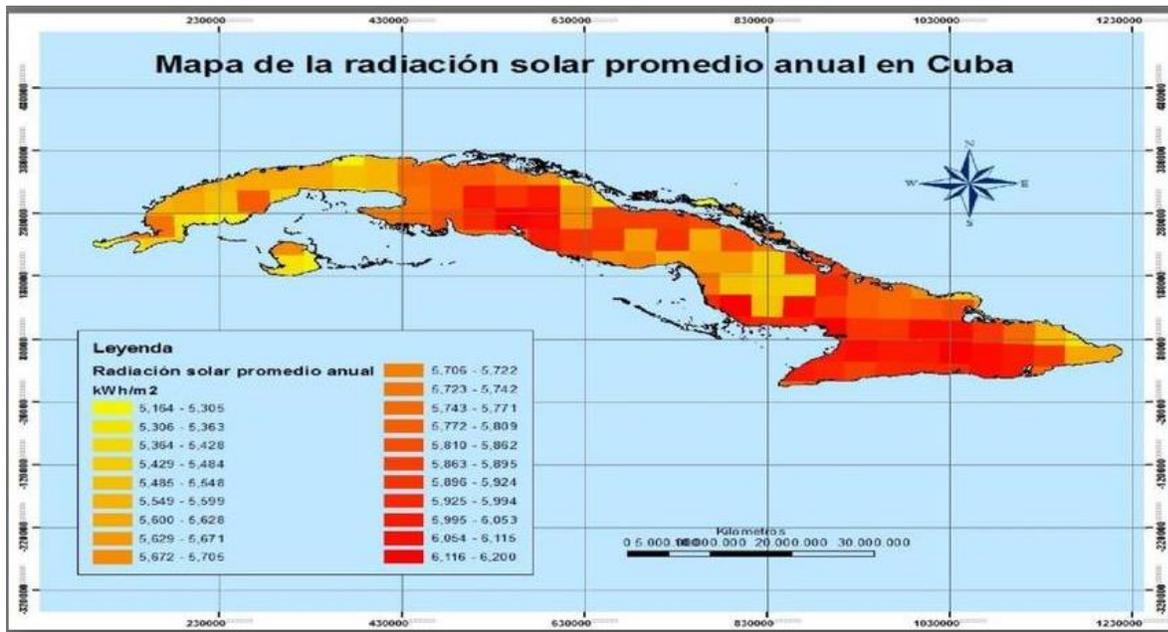
Limite seguro de temperatura

Es muy difícil, por no decir imposible especificar niveles seguros de temperatura del café o aún combinaciones seguras de tiempo y temperatura; como una guía aproximada podemos establecer los siguientes rangos de temperatura que es apto para el café:

40°C	<ul style="list-style-type: none"> • PERÍODO MÁXIMO • 1 o 2 DÍAS
50°C	<ul style="list-style-type: none"> • DURANTE ALGUNAS HORAS • 4 a 10 HORAS
60°C	<ul style="list-style-type: none"> • PERÍODO PARA DETERIORO DE CALIDAD DE TAZA • MENOS DE 1 HORA

- El café tolerará 40°C por un día o dos
- El café tolerará 50°C por pocas horas: 4 a 10 horas
- La tolerancia a 60°C es por un período menor a 1 hora.

Anexo 3: Radiación solar en Cuba.



Anexo 4. Resumen de los coeficientes de pérdida por fricción.

Resumen de coeficientes de coeficientes de pérdida por fricción:

Sección de ducto	Accesorio No.	Tipo de accesorio	No. accesorio ASHRAE	Parámetro	Coefficiente de pérdida (adimensional)
1	1	Codo 90° Area de entrada/salida variables	ER3-1	$W_1/W_0 = 750/500 = 0,00133$, $H/W_0 = 500/500 = 1$	1,7
2	2	Codo de radio suave sin álabes	CR3-1	$H/W = 750/500 = 1,5$, $r/W = 750/750 = 1$, $K = 1 @ \theta = 90^\circ$, $C0 = K \cdot Cp = 1 \cdot 0,17 = 0,17$	0,17
	3	Entrada de Ventilador Centrifugo	ER7-1	---	0
Suma de Coeficientes de Pérdida.....					0,17
3	4	Difusor en Pirámide con ductería	SR7-17	$A_0 = 750 \cdot 500 = 375000 \text{ mm}^2$, $A_1 = 254 \cdot 280,67 = 71290,18 \text{ mm}^2$, $A_0/A_1 = 5,26$, $C_0 = C_1 \cdot (A_0/A_1)^2$, $C0 = 0,69 \cdot (5,26)^2 = 19,09$	19,09
4 a 13	5 a 7, 9 a11, 13 a 16	Transición Rectangular	SR4-1	$A_0 = H_0 \cdot W = 325000 \text{ mm}^2$, $A_1 = H_1 \cdot W = 375000 \text{ mm}^2$, $\theta = 15^\circ$, $A_0/A_1 = 0,866$	0,04
7	8	Codo de radio suave sin álabes	CR3-1	$H/W = 500/500 = 1$, $r/W = 750/500 = 1,5$, $K = 1 @ \theta = 90^\circ$, $C0 = K \cdot Cp = 1 \cdot 0,17 = 0,17$	0,17
	9	Transición Rectangular	SR4-1	$A_0 = H_0 \cdot W = 325000 \text{ mm}^2$, $A_1 = H_1 \cdot W = 375000 \text{ mm}^2$, $\theta = 15^\circ$, $A_0/A_1 = 0,866$	0,02
Suma de Coeficientes de Pérdida.....					0,19
10	11	Transición Rectangular	SR4-1	$A_0 = H_0 \cdot W = 325000 \text{ mm}^2$, $A_1 = H_1 \cdot W = 375000 \text{ mm}^2$, $\theta = 15^\circ$, $A_0/A_1 = 0,866$	0,04
	12	Codo de radio suave sin álabes	CR3-1	$H/W = 430/380 = 1,13$, $r/W = 570/380 = 1,5$, $K = 1 @ \theta = 90^\circ$, $C0 = K \cdot Cp = 1 \cdot 0,16 = 0,16$	0,16
Suma de Coeficientes de Pérdida.....					0,2

Anexo 5: Representación del efecto invernadero.