

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA MECÁNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de: INGENIERO  
MECÁNICO**

**TEMA:  
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR PARA GRANOS DE MAÍZ  
DURO (MOROCHILLO), EMPLEANDO ENERGÍA SOLAR PARA SU  
FUNCIONAMIENTO.**

**AUTOR:  
MARCELA BELÉN CEVALLOS ERAZO  
JHONY LENIN ULLOA MOSCOSO**

**TUTOR:  
WILLIAM GIOVANNY QUITIAQUEZ SARZOSA**

**Quito, julio del 2016**

### Cesión de derechos del autor

Nosotros, Marcela Belén Cevallos Erazo con documento de identificación N° 1002706503 y Jhony Lenin Ulloa Moscoso con documento de identificación N° 1723555676, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de grado/titulación intitulado: “Diseño y construcción de un secador para granos de maíz duro (morochillo), empleando energía solar para su funcionamiento”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado por en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada.

En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....  
**Nombre:** Marcela Cevallos Erazo  
**Cédula:** 1002706503



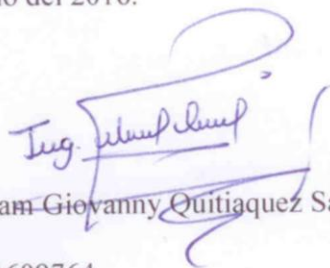
.....  
**Nombre:** Jhony Lenin Ulloa Moscoso  
**Cédula:** 1723555676

Fecha: 08 de julio del 2016

### Declaratoria de coautoría del docente tutor

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo en titulación, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR PARA GRANOS DE MAÍZ DURO (MOROCHILLO), EMPLEANDO ENERGÍA SOLAR PARA SU FUNCIONAMIENTO realizado por Marcela Belén Cevallos Erazo y Jhony Lenin Ulloa Moscoso, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, julio del 2016.



Ing. William Giovanni Quitiaquez Sarzosa MSc.

C.C. 1721609764

## RESUMEN

El presente proyecto de titulación tiene como objetivo el diseño y la construcción de un secador solar mixto para maíz duro – morochillo mediante un panel solar térmico indirecto, el cual genera energía térmica en un colector y este se transfiere al grano mediante aire que circula hacia el secador, también se aplicará un panel solar térmico directo este genera energía térmica directa hacia el grano y es un soporte secundario en la generación de calor, se incrementa la eficiencia del secador.

Para el diseño y la construcción se ha establecido 4 capítulos, se detalla en cada uno de ellos la información sobresaliente del secador solar. Los capítulos han sido distribuidos de la siguiente forma:

- Capítulo 1, detalla toda la información del marco teórico y el análisis de alternativas, el marco teórico brinda al lector los conceptos fundamentales, complementarios y específicos que servirán como punto de partida y orientación en el trabajo a realizar. El análisis de alternativas realiza un estudio de diferentes opciones que existen para el desarrollo del secador solar y así obtener la mejor alternativa que cumpla con las necesidades.
- Capítulo 2, diseño del secador solar, detalla toda la información técnica para el diseño del secador.
- Capítulo 3, cálculos del secador, contiene los cálculos correspondientes para cada elemento que conforma el secador que serán empleados en la construcción. Se detallan los costos incurridos, información financiera mostrando el costo total del secador solar.

**Palabras clave:** Secador térmico, morochillo, panel solar, colector térmico.

## ABSTRACT

This titling project aims to design and construction of a mixed solar dryer for yellow hard corn by an indirect solar panel heat, which generates thermal energy in a collector and this is transferred to grain by air flowing into the dryer, a direct thermal solar panel will also apply this generated towards the grain thermal energy and is a secondary support in heat generation, the efficiency of the dryer increases.

For the design and construction has been established 4 chapters, detailed in each outstanding information solar dryer. The chapters have been distributed as followed:

- Chapter 1, all detailed information of the theoretical framework and analysis of alternatives, the theoretical framework provides the reader with the basic, complementary and specific concepts that will serve as a starting point and guidance in the work to be done. The analysis of alternatives is conducting a study of different options for the development of solar dryer; with these options, we can obtain the best alternative to fulfill the needs.
- Chapter 2, solar dryer design, detailing all the technical information for the design of the dryer.
- Chapter 3, calculations of the dryer, shows the calculations for each element that makes up the dryer to be employed in construction. Costs incurred, detailed financial information showing the total cost of the solar dryer.

**Keywords:** thermal dryer, yellow hard corn, solar panel, thermal collector.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Construir un secador para granos de maíz duro (morochillo), empleando energía solar para su funcionamiento, para la empresa Agrocometxport S.A., ubicada en el cantón Mejía, en el año 2015.

### **Objetivos Específicos:**

- Analizar el estado del arte de los diferentes tipos de secadores utilizados a nivel mundial.
- Diseñar un secador de granos maíz duro (morochillo), empleando como fuente principal de energía la energía solar.
- Seleccionar los materiales adecuados para la construcción del secador solar para granos de maíz duro (morochillo).
- Analizar los resultados obtenidos en el proceso de secado de granos.

## Contenido

1. Introducción .....	1
1.1 Marco teórico y análisis de alternativas del secador solar .....	2
1.2 Antecedentes de Estudio .....	2
1.3 Planteamiento del problema.....	4
1.4 Metodología / propuesta de desarrollo.....	5
1.5 Conceptos y definiciones básicas.....	6
1.5.1 Maíz duro - morochillo .....	6
1.5.2 Factores climáticos.....	8
1.5.3 Secado.....	13
1.6 Tipos de secadores solares .....	16
1.7 Paneles solares .....	18
1.8 Tiempo de secado .....	20
1.9 Propiedades termodinámicas fundamentales .....	22
2. Diseño del prototipo de un secador solar para granos de maíz duro – morochillo. ....	24
2.1 Análisis de la radiación solar en Quito .....	24
2.1.1 Ángulos de la radiación directa.....	26
2.1.2 Heliofanía.....	30
2.1.3 Radiación extraterrestre diaria sobre una superficie horizontal ( $H_o$ ) .....	30
2.1.4 Radiación diaria solar promedio terrestre sobre una superficie horizontal ( $H_{ab}$ ) ..	30
2.1.5 Estimación de la radiación solar en una superficie inclinada ( $H_T$ ).....	31
2.1.6 Radiación solar difusa horaria en una superficie horizontal ( $H_d$ ) .....	31
2.1.7 Índice de claridad (KT).....	32
2.1.8 Radiación solar directa en una superficie horizontal ( $H_b$ ).....	32
2.1.9 Factor de cambio de ángulo de incidencia en el transcurso del día ( $R_b$ ).....	32
2.1.10 Ángulo de incidencia con respecto a la horizontal para la cubierta de un secador solar $\theta$ .....	33
2.1.11 Radiación directa sobre una superficie inclinada ( $H_{bT}$ ).....	34
2.1.12 Radiación difusa sobre una superficie inclinada ( $H_{dT}$ ).....	34
2.1.13 Radiación reflejada por el suelo ( $H_{rT}$ ) .....	35
2.2 Energía solar disponible para la transferencia de calor y masa.....	35
2.2.1 Transferencia de calor por conducción ( $q_c$ ) .....	36
2.2.2 Coeficiente de calor convectivo ( $h_{ct}$ ) .....	37
2.2.3 Resistencia térmica del aislante ( $k_b$ ) .....	37
2.2.4 Transferencia de calor por radiación en el vidrio ( $q_{rg}$ ).....	38
2.2.5 Temperatura del cielo.....	38

2.2.6 Calor perdido por convección del vidrio ( $q_{cg}$ ).....	39
2.2.7 Calor perdido por radiación del grano ( $q_{rc}$ ).....	40
2.3 Balance global de energía del sistema .....	40
2.4 Cálculo del calor absorbido por el grano .....	42
2.5 Cálculo del calor absorbido por el sistema .....	42
2.6 Cantidad de calor necesario para calentar y evaporar .....	43
2.7 Calor necesario para calentar el grano .....	44
2.8 Calor necesario para evaporar $x$ porcentaje de humedad del grano .....	45
2.9 Consideraciones en el diseño de la carcasa.....	47
2.10 Cubierta transparente .....	47
2.11 Aislamiento .....	48
2.12 Placa absorbente.....	49
2.12.1 Entrada de aire al colector solar .....	49
2.12.2 Dinámica del aire al calentarse .....	50
2.12.3 Colector solar principal .....	51
2.12.4 Colector solar secundario.....	53
2.13 Bandejas.....	54
2.14 Secador.....	58
2.15 Innovaciones .....	65
3.1 Pruebas en días nublados .....	70
3.2 Pruebas en días parcialmente nublados.....	72
3.3 Pruebas en días soleados .....	74
3.4 Análisis Económico .....	76
3.4.1 Materiales.....	76
3.4.2 Costos de servicios.....	77
3.4.3 Accesorios.....	78
3.4.4 Conclusiones .....	79
3.4.5 Recomendaciones.....	80
Lista de referencias .....	82



## Índice de tablas

Tabla 1. Componentes estructurales del grano de maíz (% en base seca) .....	7
Tabla 2. Composición química general de distintos tipos de maíz (%) .....	8
Tabla 3. Día promedio para cada mes y valor de (n) por meses .....	24
Tabla 4. Constantes de Ångström-Prescott .....	25
Tabla 5. Coordenadas geográficas de la ubicación ciudad de Quito.....	26
Tabla 6. Comparación de diversos tipos de cubiertas .....	47
Tabla 7. Tabla de características de los componentes del secador.....	52
Tabla 8. Características de los componentes del colector solar secundario.....	53
Tabla 9. Tabla de características de los componentes de las bandejas .....	55
Tabla 10. Características de los componentes del secador .....	59
Tabla 11. Pruebas días nublados – Peso/Porcentaje de humedad absorbida del grano.....	70
Tabla 12. Temperaturas respecto al tiempo nublado .....	71
Tabla 13. Pruebas de días parcialmente nublados – Peso/Porcentaje de humedad absorbida del grano. ....	72
Tabla 14. Temperaturas respecto al tiempo .....	73
Tabla 15. Pruebas día soleado – Peso/Porcentaje de humedad absorbida del grano. ....	74
Tabla 16. Temperaturas respecto al tiempo .....	75
Tabla 17. Costos Directos e Indirectos involucrados en el secador solar .....	76
Tabla 18. Costos de materiales .....	77
Tabla 19. Costos de servicios.....	77
Tabla 20. Costos de accesorios .....	78

## Índice de Figuras

Figura 1. Árbol de problemas. ....	4
Figura 2. Método Científico.....	5
Figura 3. Componentes del maíz.....	7
Figura 4. Insolación directa.....	9
Figura 5. Insolación difusa.....	9
Figura 6. Flujos de aire .....	13
Figura 7. Secador Indirecto.....	14
Figura 8. Secador directo .....	15
Figura 9. Secador mixto.....	16
Figura 10. Carta Psicrométrica a 2800 metros sobre el nivel del mar .....	21
Figura 11. Declinación del sol .....	27
Figura 12. Posiciones de los ángulos solares .....	28
Figura 13. Ángulo de incidencia de la radiación directa.....	29
Figura 14. Inclinación de captadores solares .....	33
Figura 15. Balance de energías .....	41
Figura 16. Entradas de aire .....	50
Figura 17. Colector solar.....	51
Figura 18. Colector solar – sección.....	53
Figura 19. Bandejas. ....	54
Figura 20. Reacciones.....	56
Figura 21. Diagrama de Fuerza cortante - bandeja. ....	57
Figura 22. Momento Flector máximo. ....	57
Figura 23. Estructura del secador solar.....	58
Figura 24. Área colaborante.....	60
Figura 25. Tipo de columna. ....	65
Figura 26. Estadísticas de uso de energía solar.....	66
Figura 27. Estructura de generación eléctrica. ....	67

Figura 28. Fluctuación de la temperatura.....	69
Figura 29. Pruebas días nublados (% de humedad vs días) .....	70
Figura 30. Temperatura con respecto al tiempo en día nublado. ....	71
Figura 31. Pruebas días parcialmente nublados (% de humedad vs días).....	72
Figura 32. Temperatura con respecto al tiempo en día parcialmente nublado.....	73
Figura 33. Pruebas días soleados (% de humedad vs días).....	74
Figura 34. Temperatura con respecto al tiempo en día soleado. ....	75

## Índice de Ecuaciones

[Ecuación 1] .....	27
[Ecuación 2] .....	29
[Ecuación 3] .....	29
[Ecuación 4] .....	30
[Ecuación 5] .....	30
[Ecuación 6] .....	31
[Ecuación 7] .....	31
[Ecuación 8] .....	32
[Ecuación 9] .....	32
[Ecuación 10] .....	32
[Ecuación 11] .....	34
[Ecuación 12] .....	34
[Ecuación 13] .....	34
[Ecuación 14] .....	34
[Ecuación 15] .....	35
[Ecuación 16] .....	35
[Ecuación 17] .....	36
[Ecuación 18] .....	36
[Ecuación 19] .....	36
[Ecuación 20] .....	37
[Ecuación 21] .....	37
[Ecuación 22] .....	38
[Ecuación 23] .....	39
[Ecuación 24] .....	39
[Ecuación 25] .....	39
[Ecuación 26] .....	40
[Ecuación 27] .....	41

[Ecuación 28] .....	42
[Ecuación 29] .....	42
[Ecuación 30] .....	43
[Ecuación 31] .....	43
[Ecuación 32] .....	44
[Ecuación 33] .....	44
[Ecuación 34] .....	45
[Ecuación 35] .....	46
[Ecuación 36] .....	46
[Ecuación 37] .....	46
[Ecuación 38] .....	46
[Ecuación 39] .....	56
[Ecuación 40] .....	56
[Ecuación 41] .....	57
[Ecuación 42] .....	61
[Ecuación 43] .....	61
[Ecuación 44] .....	61
[Ecuación 45] .....	62
[Ecuación 46] .....	63
[Ecuación 47] .....	63
[Ecuación 48] .....	63
[Ecuación 49] .....	64
[Ecuación 50] .....	64

## **1. Introducción**

La producción de maíz duro en el Ecuador se encuentra en crecimiento, desde el año 2000 hasta el 2012 existió un incremento del 188% de acuerdo al Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca, esto quiere decir que más agricultores se encuentran sembrando este cereal, los granos contienen una humedad del 28% de acuerdo con la norma INEN, para su conservación y almacenamiento se requiere de un adecuado secado, tradicionalmente en Ecuador los pequeños productores realizan procesos artesanales de secado empleando mayor tiempo en la producción, y estos a su vez podrían ser propicios para la proliferación de insectos o el deterioro del grano, haciéndolos menos competitivos.

A nivel mundial se han desarrollado secadores que para su funcionamiento emplean energía solar, el aprovechamiento de la energía solar, un recurso gratuito y generalmente abundante la mayor parte del año en Ecuador, es una alternativa económicamente favorable para el secado de diferentes productos. Pérez (2001), indica que existen diferentes tipos de paneles solares, fotovoltaicos, térmicos y termodinámicos entre los más destacados, en el presente proyecto se detallan las diferentes variables y aplicabilidad de los paneles térmicos en el diseño y construcción de un prototipo de secador solar mixto, las ventajas del uso de la energía solar en el secado de maíz duro, su aplicabilidad a sectores rurales con limitados recursos.

De acuerdo con las pruebas que se realizaron en tres días con climas distintos se llega a obtener un rango de humedad en el grano entre 15 y 13% dicho porcentaje se corrobora con las pruebas de humedad realizadas en la universidad politécnica nacional.

## **1.1 Marco teórico y análisis de alternativas del secador solar**

El sol es la fuente de energía primaria con la que cuenta el planeta tierra. La incidencia de la radiación solar se puede observar en múltiples efectos como, calentamiento de los componentes de la atmósfera, fotosíntesis de las plantas, iluminación donde llega su espectro visible. La energía que proporciona el sol puede ser aprovechada de forma, térmica, fotovoltaica, en aplicaciones de biomasa, mareomotriz entre otras.

La energía solar térmica se obtiene de una fuente natural, como su nombre lo indica proviene directamente de la radiación solar. Tiene diferentes usos, los cuales se pueden aprovechar dependiendo de las aplicaciones requeridas como por ejemplo: el secado de alimento, calentar agua, calefacción, operación de equipos, desalinización de agua, riego entre otros.

Los secadores o deshidratadores han sido empleados para la conservación de alimentos en épocas de escases, a través del tiempo ésta práctica ha ido evolucionando.

## **1.2 Antecedentes de Estudio**

En las últimas décadas el problema creciente de la contaminación, la falta de abastecimiento de energía eléctrica en sectores rurales entre otros, ha llevado a buscar el uso de tecnologías para el aprovechamiento de energías renovables como la energía solar. En el ámbito alimenticio la energía solar ha sido utilizada para preservar los alimentos, construyéndose así varios tipos de secadores o deshidratadores.

Agusto (2005), indica la descripción del secado de la guadua, para una adecuada aplicación en usos y comercialización. Las tecnologías que se han probado

son las del secador solar tipo invernadero, secado convencional en cámaras y en proyecto de desarrollo de investigación futuro el secado con ventilación por tiro forzado. Esta investigación es fundamental para desarrollar un producto a escala industrial. Como resultado principal, se construyeron dos prototipos solares.

Bergues (2008), describe los prototipos más representativos de secadores solares directos construidos en la parte oriental de Cuba, Estos son secadores solares diversos con cubierta de vidrio y de polietileno, secando productos de alta importancia social y gran valor agregado como madera, semillas, plantas medicinales. En su concepción se aplicaron criterios de extensión y generalización que permitirán su escalado a capacidades semi-industriales. Se hace un breve análisis del impacto energético y medioambiental de los mismos, y de sus posibilidades futuras para la gestión medioambiental en Cuba, al evitar emisiones de CO<sub>2</sub>.

El autor hace recomendaciones sobre qué conducta deberá seguirse en el futuro inmediato a fin de lograr mejores resultados en la diversificación y desarrollo de mejores aplicaciones de impacto económico, social y medioambiental.

Escamilla (2009), indica que el secador solar elimina la humedad de los alimentos por medio de absorción de la humedad al circular un flujo de aire caliente a través de los alimentos.

El modelo ha sido desarrollado para el estudio de la influencia de los parámetros como dimensiones, flujo de aire en el rendimiento de un colector solar directo indica (Blanco Cano, Soria Verdugo, Gracia Gutiérrez, & Ruiz Rivas, 2013). El objetivo del trabajo es cubrir un rango de configuraciones y medidas con un modelo sencillo. El modelo cubre el calentamiento de aire en el colector y la

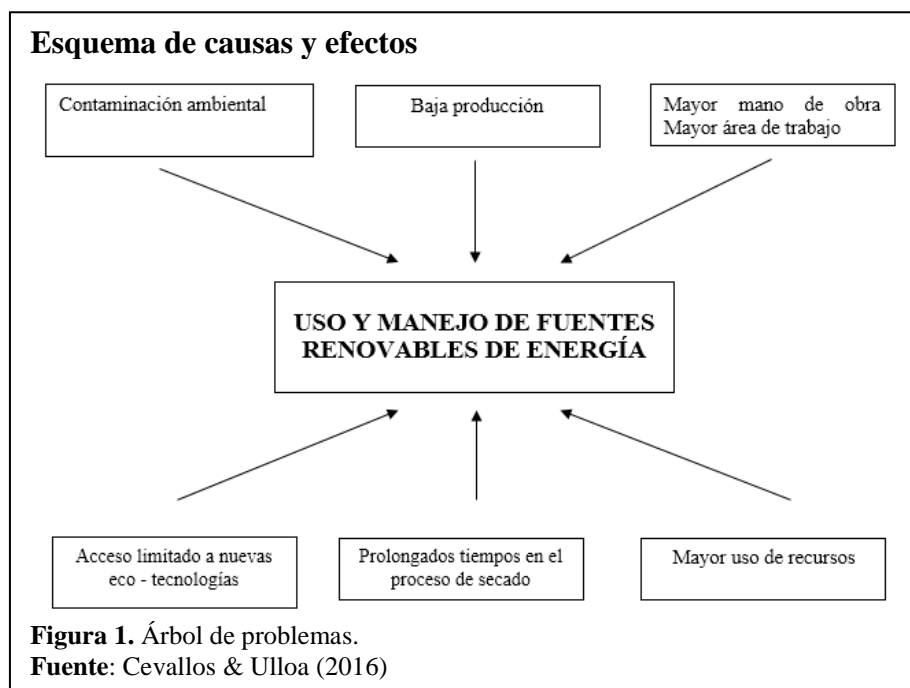


transferencia de masa de vapor en la cámara de secado. El resultado preliminar muestra la importancia en el uso de colectores solares y la evolución en el proceso de secado en la cámara de secado. Las mejoras en los parámetros de temperatura durante el proceso y la eficiencia de la cámara de secado también son analizados.

### 1.3 Planteamiento del problema

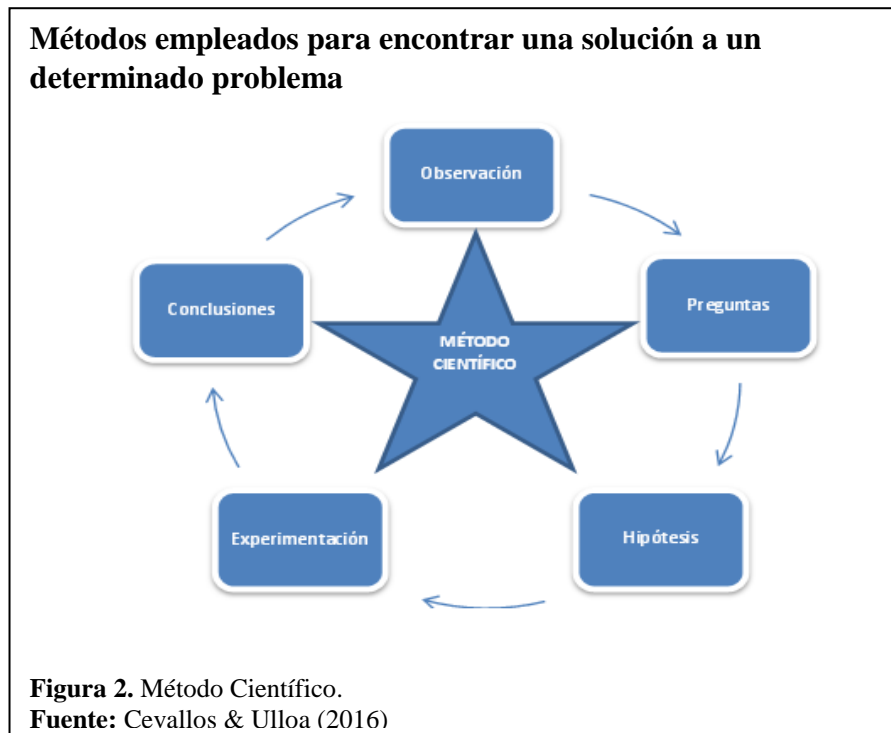
En la actualidad el desarrollo tecnológico avanza a grandes pasos, marcando una brecha en el desarrollo de quienes tienen acceso a nueva tecnología sustentable. En sectores rurales de Ecuador la falta de equipos técnicos ha frenado el crecimiento industrial de micro empresas agrícolas productoras de maíz duro (morochillo), ya que mantienen vigentes procesos de secado que involucran largos tiempos, mayor uso de recursos como mano de obra y áreas de trabajo.

En la Figura 1 se observa el diagrama causa efecto, el planteamiento del problema es: “Como incide el acceso limitado a nuevas eco-tecnologías de secado solar de granos en la contaminación ambiental en la empresas Agrocometxport S.A., ubicada en el cantón Mejía, en el año 2015”.



## 1.4 Metodología / propuesta de desarrollo

Se define como el conjunto sistemático de criterios de acción y de normas que orientan el proceso de investigación. Se puede concebir al método científico como una estructura y principios coherentes conectados. En la Figura 2 se detalla el ciclo del método científico.



El método científico se utiliza en la presente investigación para la solución de un problema mediante la determinación de las causas y efectos principales, de igual manera mediante la comprobación de la hipótesis y posteriormente el análisis del resultado en el proceso de secado solar.

Como primer paso se determinará los principales efectos de la deficiencia o inexistencia de secado, se analizará las posibles alternativas para realizar el secado mediante el uso de energía solar, una vez determinada la cantidad de calor necesaria para el secado se procede a construir un secador solar que consta entre sus componentes principales un colector solar térmico indirecto, una cámara de secado y

un colector solar térmico directo, para finalizar se realizan pruebas para evaluar el tiempo de secado, la temperatura, la humedad y el paso, se llega a determinar un porcentaje de humedad de secado.

## **1.5 Conceptos y definiciones básicas**

A continuación se detallan los componentes que influyen en el secado del maíz duro, como son factores climáticos, métodos de secado, contenido de humedad, radiación solar.

### **1.5.1 Maíz duro - morochillo**

El maíz es un cereal, su nombre científico *Zea mays*, gramínea de ciclo anual, de acuerdo a su descripción taxonómica el maíz es una especie monocotiledónea. (Tovar, 2012).

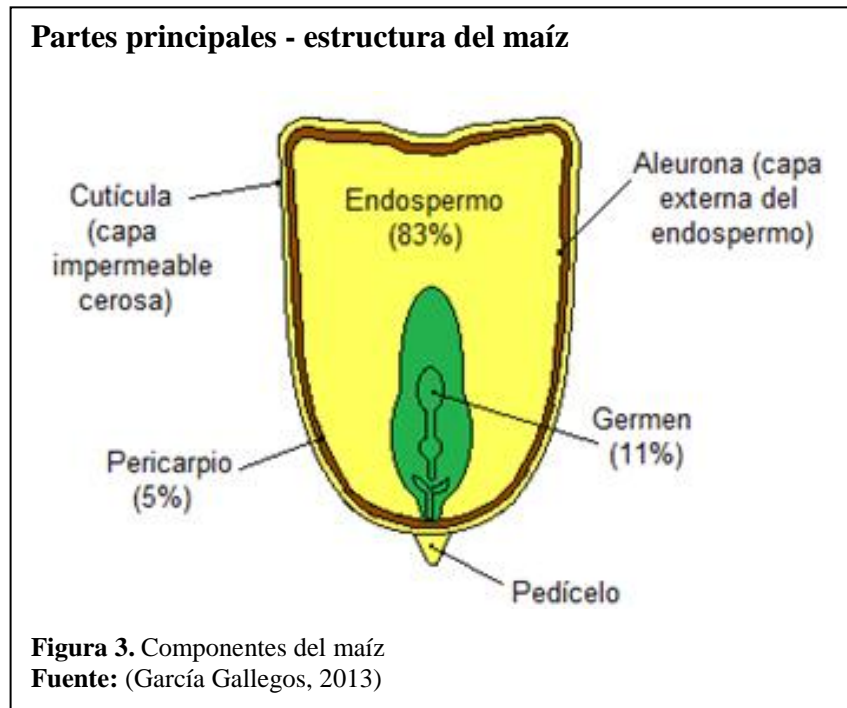
#### **Clasificación taxonómica**

González (2012), indica la siguiente clasificación taxonómica para el maíz

Dominio:	Plantae
División:	Magnoliophyta (Angiospermae)
Clase:	Liliopsida
Orden:	Poales
Familia:	Poaceae
Especie:	mays
Nombre científico:	<i>Zea mays</i> L.

### Componentes o partes principales del maíz:

En la Figura 3 se puede observar los componentes del maíz



**Endospermo:** Conformado por almidón y gluten.

**Germen:** Es el embrión del maíz, se encuentra en la parte inferior media del grano, contiene altos niveles de aceite.

**Pericarpio:** Conocido como cascarilla, recubre el grano.

En la Tabla 1 se detallan los componentes del grano de maíz duro, expresado en porcentaje.

**Tabla 1.** Componentes estructurales del grano de maíz (% en base seca)

Parámetro	A	B
Endospermo	82.9	70
Germen	11.1	7
Pericarpio	5.3	23
Punta	0.8	

**Nota:** En la tabla se define las estructuras de cada tipo de grano. **Fuente:** Adaptado de (Tovar, 2012)

Como se muestra en la Tabla 2, las partes principales del grano de maíz difieren en su composición química.

**Tabla 2.** Composición química general de distintos tipos de maíz (%)

Tipo	Humedad	Cenizas	Proteínas	Fibra cruda	Extracto etéreo	Carbohidratos
Cristalino	10.5	1.7	10.3	2.2	5.0	70.3
Harinoso	9.6	1.7	10.7	2.2	5.4	70.4
Amiláceo	11.2	2.9	9.1	1.8	2.2	72.8
Dulce	9.5	1.5	12.9	2.9	3.9	69.3
Palomero	10.4	1.7	13.7	2.5	5.7	66.0

**Nota:** Se observa la composición química de los distintos tipos de granos. **Fuente:** Adaptado de (Tovar, 2012)

### Calidad del grano de maíz

La calidad del grano se define en las operaciones de cultivo, influye en gran medida el clima, los suelos y manejo de la cosecha. Entre las características cualitativas más relevantes están:

**Humedad:** El grano de maíz cosechado registra porcentaje de humedad entre el 20% y 30%, denominado como humedad inicial del grano.

**Dureza:** Factor muy importante en el proceso de molienda.

**Inocuidad:** Esta característica es fundamental, mantener las condiciones adecuadas de limpieza, control, desinfección e inspección, para evitar la propagación de microorganismos patógenos como los hongos. (Tovar, 2012)

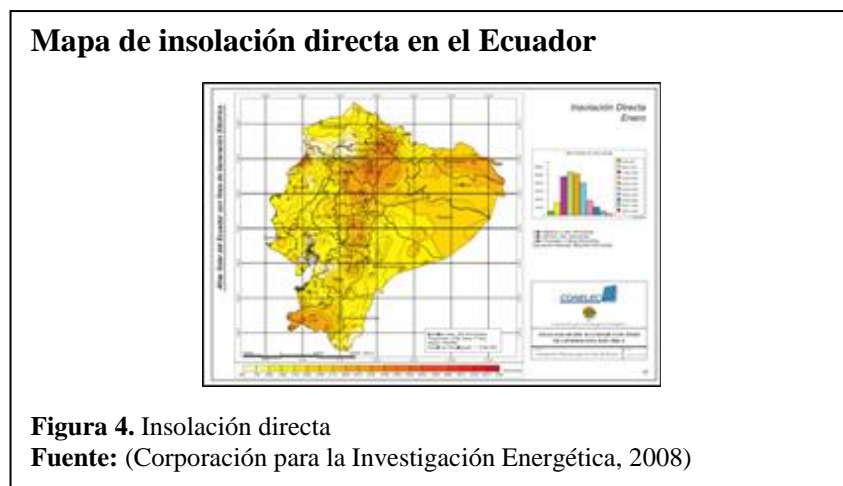
### 1.5.2 Factores climáticos

El maíz se cultiva en la mayoría de los países del mundo y regiones agrícolas, además, crece desde el nivel del mar hasta elevaciones cercanas a los 4000 metro sobre el nivel del mar (msnm).

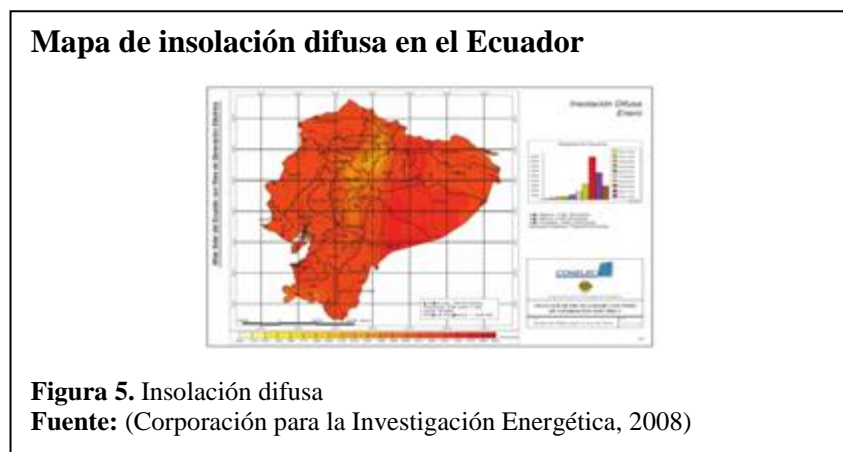
## Temperatura

La temperatura óptima durante el ciclo vegetativo del maíz es de 25 a 30°C. Los días soleados y las noches frescas, son los más beneficiosos para el crecimiento rápido del maíz. La demanda del circuito comercial de la agroindustria ecuatoriana del maíz está dada por las provincias de Los Ríos, Guayas y Manabí ya que son las provincias con mayor participación de cultivo en el Ecuador.

En la Figura 4 se puede observar la insolación directa, esta es la acumulación de la energía que se tiene en las distintas regiones del Ecuador.



La insolación difusa es la radiación que se desprende de agentes atmosféricos, a continuación se indica la insolación difusa en el Ecuador.



## **Precipitación & Humedad**

El cultivo del maíz exige niveles óptimos de humedad. Bajo condiciones de cultivo en secado, y con variedades adaptadas, es posible obtener buenos rendimientos con 500mm de lluvia bien distribuidos durante el ciclo vegetativo. En general los mejores suelos para el cultivo del maíz son los de textura media, fértiles, profundos y con elevada capacidad de retención de humedad. (CULTIVO DE MAIZ, 1998, pág. 9)

## **Almacenamiento**

Grande Tovar & Orozco Colonia (2013, como se citó en FAO - Food and agriculture organization, 1993), indica que la humedad influye de manera importante en los procesos de almacenamiento y comercialización del grano y sobre todo en sus costos. Si el maíz se encuentra muy húmedo generará problemas en el almacenamiento por contaminación y su textura se tornará blanda provocando con ello su deterioro.

Por el contrario, si el maíz se encuentra muy seco tenderá a romperse o a quebrarse. El valor de humedad más aceptado para la comercialización del grano se sitúa alrededor del 15.5 % (pág. 5).

Se debe contar con silos de almacenamiento, con una ventilación adecuada y un control de temperatura, que permitan mantener por cortos periodos, los granos suficientemente frescos y ventilados para reducir los riesgos de calentamiento, ataque de hongos, entre otros.

## **Humedad relativa**

La humedad relativa es la cantidad de vapor que se encuentra en el ambiente, dicha humedad depende de la temperatura y la presión en el volumen del aire que será analizado.

El primer parámetro es el contenido de humedad la cual se encuentra definida, la humedad del ambiente (humedad relativa) y la temperatura, afectan el contenido de humedad. El grano viene del campo con contenidos de humedad altos (20% o más) impidiendo su almacenamiento directo "seguro" (10% a 15%). Para calcular el porcentaje de humedad en los granos, se suele utilizar la siguiente ecuación. (Strumillo & Kudra, 1986, págs. 8,16)

$$\%Humedad = \frac{100 \times \text{peso del grano seco}}{\text{peso del grano húmedo}}$$

### **Contenido de Humedad**

A un alimento se debe someter a 104 °C, para dimensionar la masa que se ha secado hasta que obtiene un peso constante. Éste proceso se realiza mediante una estufa de vacío a 60 °C y una presión de 700 Pa, para alimentos que sufren descomposición a altas temperaturas. (Cerón, 2011, pág. 16)

### **Contenido de Humedad de Equilibrio**

La humedad del aire en el secado de materiales es una variable significativa al encontrarse en el ambiente de secado. Si a un objeto húmedo se introduce en una cámara y se hace pasar a través de ella aire húmedo en condiciones constantes. Transcurrido un período de tiempo se puede alcanzar un equilibrio entre el objeto y el aire circundante, es decir, el objeto y el aire contarán con el mismo contenido de humedad.

De acuerdo con Cerón (2011), si el objeto tiene mayor concentración de humedad que el aire, el objeto perderá humedad hasta el punto de equilibrio. En el caso opuesto, si el objeto se encuentra más seco que el aire, éste absorberá humedad hasta llegar al punto de equilibrio.



## **Humedad Inicial Óptima**

La humedad inicial óptima es la que genera beneficios del medio ambiente para el secado, esto quiere decir que no importa el tipo de ambiente en el que se encuentre para un secado óptimo.

Es de particular interés el efecto que ejerce el ambiente sobre el producto a secar durante el almacenamiento previo al secado; si el producto es almacenado en un ambiente húmedo, se recomienda acomodarlo de tal manera que se propicie un secado natural, para que favorezca un nivel óptimo de humedad inicial. Existen diferentes métodos de secado alternativos, los que pueden disminuir el contenido de humedad de un producto, antes de introducirlo a un secador de convección. (Cerón, 2011)

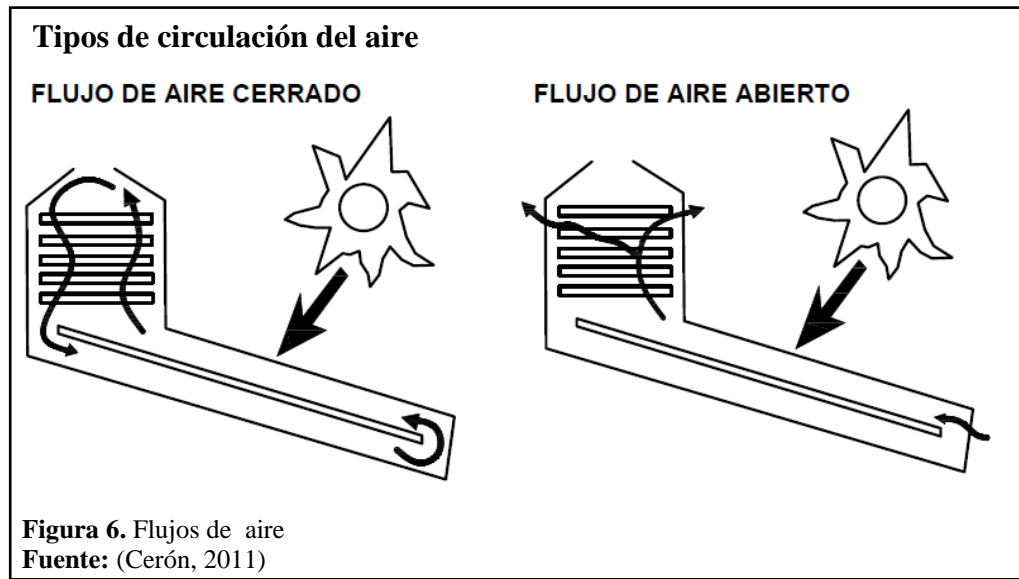
Para que favorezca un nivel óptimo de humedad inicial se debe acomodar de la mejor manera, siempre debe existir circulación de aire.

## **Flujo de aire**

Es importante conocer el flujo de aire, ya que está en contacto con el producto y se encarga de extraer la humedad. La temperatura del flujo de aire va descendiendo de acuerdo como avanza en el secador, mientras avanza el aire por el secador su humedad relativa aumenta. Para llegar al secado ideal la humedad relativa debe ser cercana a la humedad de saturación, obteniendo un secado ideal.

Cuando se conocen las temperaturas en varios puntos del secador, se procede a determinar una aproximación de que tan eficiente es la entrada del aire. Para saber que la entrada del flujo de aire es la correcta se debe tener en cuenta la temperatura del aire en la salida, ésta debe ser igual a la temperatura del bulbo húmedo acorde a la temperatura de aire y de humedad inicial en la entrada del colector. (Cerón, 2011)

En la Figura 6 se observa la clase de flujo de aire que existe en los secadores.



En el proyecto se utilizará el flujo de aire abierto ya que es el más efectivo para el proceso, en el flujo abierto existe renovación de aire, dicho aire está en continua circulación esto quiere decir que el flujo se renueva.

### 1.5.3 Secado

El proceso de secado es un tratamiento térmico, las técnicas que se utilizan sirven para mejorar las características físicas y químicas, disminuir la humedad y así incrementar el tiempo de almacenamiento.

El proceso de secado depende de varios factores que deben ser tomados en cuenta:

- Humedad del grano
- Temperatura de secado
- Temperatura ambiente

En el secado existirán tres tipos de secadores, indirecto, directo y mixto:

## Secador indirecto

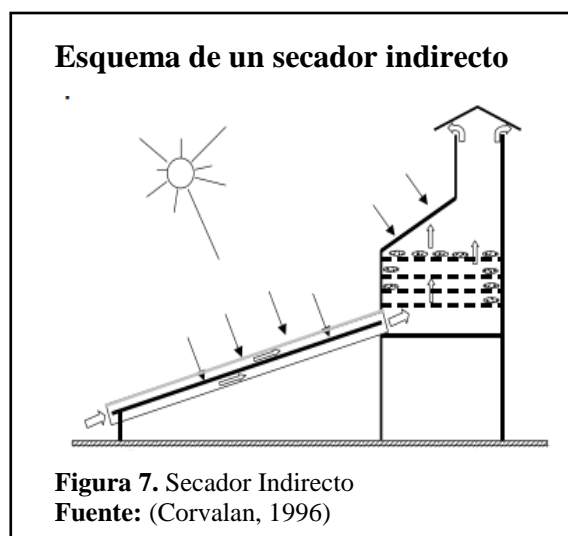
Se llama secador indirecto porque el colector se ubica a cierta distancia de la cámara. El aire en el ingreso se calienta en el colector, de esta forma el producto no es afectado por la radiación de forma directa ya que este se encuentra en la cámara del secado.

Cerón (2011), manifiesta que, el calor pasa al producto húmedo por medio de la conducción a través de una pared de retención de sólidos, la pared es de naturaleza metálica.

Para caracterizar el método de funcionamientos de agitación se aumenta el contacto entre el material húmedo y la superficie caliente, con este método se logra un cambio continuo entre el material húmedo y la superficie caliente. (Cerón, 2011)

La velocidad de secado se determina mediante los tipos de secadores ya sea directo, indirecto o mixto. Para que exista mayor eficiencia en el secado los materiales deben ser granulares pesado porque en estos existe mayor coeficiente de transferencia de calor.

En la Figura 7 se puede observar el flujo de aire caliente en el secador indirecto:



## Secador directo

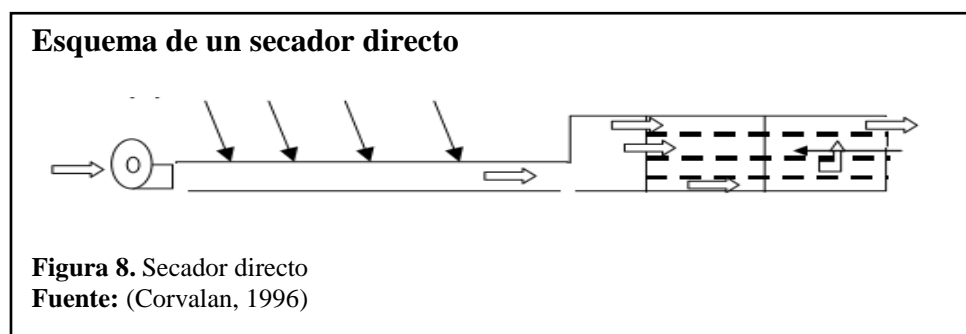
En este modelo de secador se tiene que el colector y la cámara se encuentran en el mismo lugar.

En este secador la cámara y el colector cumplen la misma función la cual es recibir la radiación solar.

En este tipo de secadores el producto absorbe la radiación solar directa, esto quiere decir que no existe ninguna resistencia u obstáculo entre los rayos del sol y el producto.

De acuerdo con Cerón (2011), las características generales de operación de los secadores directos son:

- El agente de secado puede ser aire calentado por vapor, gases de combustión, gas inerte calentado (nitrógeno por ejemplo), o vapor de agua sobrecalentado.
- El secado se efectúa por transferencia de calor por convección entre los gases calientes y el sólido mojado, en donde el flujo de gases extrae el líquido vaporizado y separa el vapor.
- Un secador directo consume más combustible por kilogramo de agua evaporada, mientras más bajo sea el contenido de humedad.
- La eficiencia mejora al aumentarse la temperatura del gas de entrada a una temperatura de salida constante.

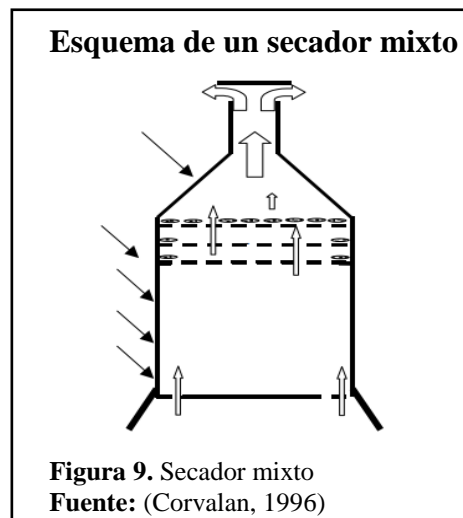


## Secador mixto

El modelo de secador es mixto porque el colector y la cámara realizan la recolección de radiación.

De acuerdo con Cerón (2011), indica que en el Secador solar mixto se observan varias ventajas; una de ellas es que el proceso es más simple (sobre todo en el caso de secadores con circulación forzada de aire).

El secador mixto permite el ingreso de la radiación solar, para que el secado del producto sea de forma conveniente. Para ahorrar tiempo en el proceso de secado. (Cerón, 2011)



## 1.6 Tipos de secadores solares

Los secadores pueden tener diferentes tipos de clasificaciones, lo más importante es que a la hora de la selección se debe considerar el rendimiento y la economía de cada uno de ellos.

De acuerdo al método de operación se pueden clasificar en secadores continuos y discontinuos.

## **Secadores Continuos**

En el secador continuo el producto, el cual va a ser sacado ingresa en una tasa de alimentación, es decir kg/h o kg /día y con ello se tiene producciones elevadas, pero a elevados costos.

## **Secadores Discontinuos**

En los secadores discontinuos, se lotizan a los alimentos que se van a secar, los cuales ingresan y se realiza el respectivo secado a determinados tiempos, con ello se permite un control máximo de producto pero producciones muy bajas.

En una segunda clasificación, el secado se clasifica en base a la energía térmica que ocupan para trabajar.

- Directo o por conducción
- Indirecto o por convección
- Por radiación

## **Secadores por Conducción**

En el secador por conducción el aire caliente debe circular a través del alimento, para que el flujo del aire caliente pase absorbiendo la humedad del alimento de esta forma se produzca la deshidratación hasta llegar a las condiciones de almacenamiento. (Fito Maupoey, Andrés Grau, Albors Sorolla, & Barat Baviera, 2001)

## **Secadores por Convección**

De acuerdo con Fito (2001), el calor de evaporación que se genera en superficies calentadas colocadas directamente en el material a secar. Para calentar las

superficies se utiliza vapor. El agua evaporada se elimina mediante una operación de vacío o a través de una corriente de gas, la función principal es eliminar el agua.

### **Secadores por radiación**

Es la denominación a la transmisión de la energía a través del espacio por medio de ondas electromagnéticas. Se basa en la transferencia de energía radiante para evaporar la humedad del producto. La energía es absorbida selectivamente por las moléculas de agua, por ende mientras el producto se seca, se requiere menos energía. Incluye varias fuentes de radiación electromagnética con longitudes de onda desde el espectro solar hasta microondas (0,2 m – 0,2 mm). Dentro de esta categoría se incluye el infrarrojo. (Mujumdar, 2006)

### **1.7 Paneles solares**

El Ecuador por su ubicación geográfica es un país privilegiado esto concierne a los recursos solares, debido a que el ángulo de incidencia de la luz cae de forma perpendicular en la superficie, situación que no ocurre en otras zonas del planeta, esto se debe a que dicho ángulo varía dependiendo de la estación en la que se encuentre. (Cedeño, 2012)

Para que el equipo sea eficiente se debe conocer la cantidad de granos que se va a secar, la radiación media que incide sobre el lugar que se instalará el secador, con estas investigaciones se obtendrá el área requerida en el secador, también es necesario conocer el tipo de panel que se ajusta a dichas condiciones.

En la actualidad existen diversos tipos de paneles solares, de estos, los paneles que se destacan son:

Paneles fotovoltaicos, paneles térmicos, paneles termodinámicos.

### **Paneles Solares Fotovoltaicos**

De acuerdo con Esther (2015), el funcionamiento se basa en la incidencia de los rayos del sol en el panel, dicho panel es aquel que la luz solar transmite energía a los electrones, los cuales se separan en neutrones y protones permitiendo generar electricidad. Estos paneles hoy en día se encuentran en desuso ya sea por sus elevados costos o por su eficiencia.

### **Paneles Solares Térmicos**

El panel solar térmico es el elemento encargado de absorber la energía contenida en la radiación solar y transferir dicha energía en forma de calor al aire en contacto.

Los paneles solares térmicos para ser instalados necesitan una inclinación de 30 a 45 grados, aplicable a sistemas de placa plana.

Los sistemas de placa plana o placa absorbadora tienen mayor resistencia que los de tubo vacío, los cuales son muy frágiles.

Estos paneles mientras mayor sea la placa absorbadora tienen mayor eficiencia, también deben estar ubicados en lugares que tengan recepción directa de los rayos solares. (Pérez, 2001)

### **Paneles Solares Termodinámicos**

Los paneles solares termodinámicos son una alternativa a los paneles solares convencionales. La diferencia que existe entre ellos es que no solo captan la energía solar también captan la energía del ambiente exterior (el calor del sol, del agua de lluvia, del viento), esto se origina por los principios termodinámicos del panel, siempre y cuando la temperatura exterior no baje de los 0° absolutos.



Lo ideal de este panel es que produce energía en días nublados y durante toda la noche, esto eleva la eficiencia del panel. (Alonso, 2013)

### **1.8 Tiempo de secado**

El tiempo de secado depende de varios factores tales como: tipo de producto, tamaño, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del aire.

Para el secado se deben tomar en cuenta 3 etapas distintas:

- a) Etapa inicial; la rapidez con la cual se elimina humedad en función del tiempo.
- b) La rapidez del secado permanece constante y es independiente del sólido, de modo que para las mismas condiciones externas, el proceso es similar al que se daría en la superficie de una masa de agua.
- c) Una vez que la humedad superficial ha sido eliminada, la humedad interna comienza a ser eliminada pero, en consecuencia, la rapidez del secado disminuye a medida que se va perdiendo humedad interna por evaporación en la superficie. (Moreno, 2000)

### **Tipos de circulación de aire**

El aire es el elemento indispensable para que produzca la deshidratación o secado ya que el aire caliente evapora la humedad presente en el material. El tipo de circulación del aire se clasifica en circulación forzada y circulación por convección.

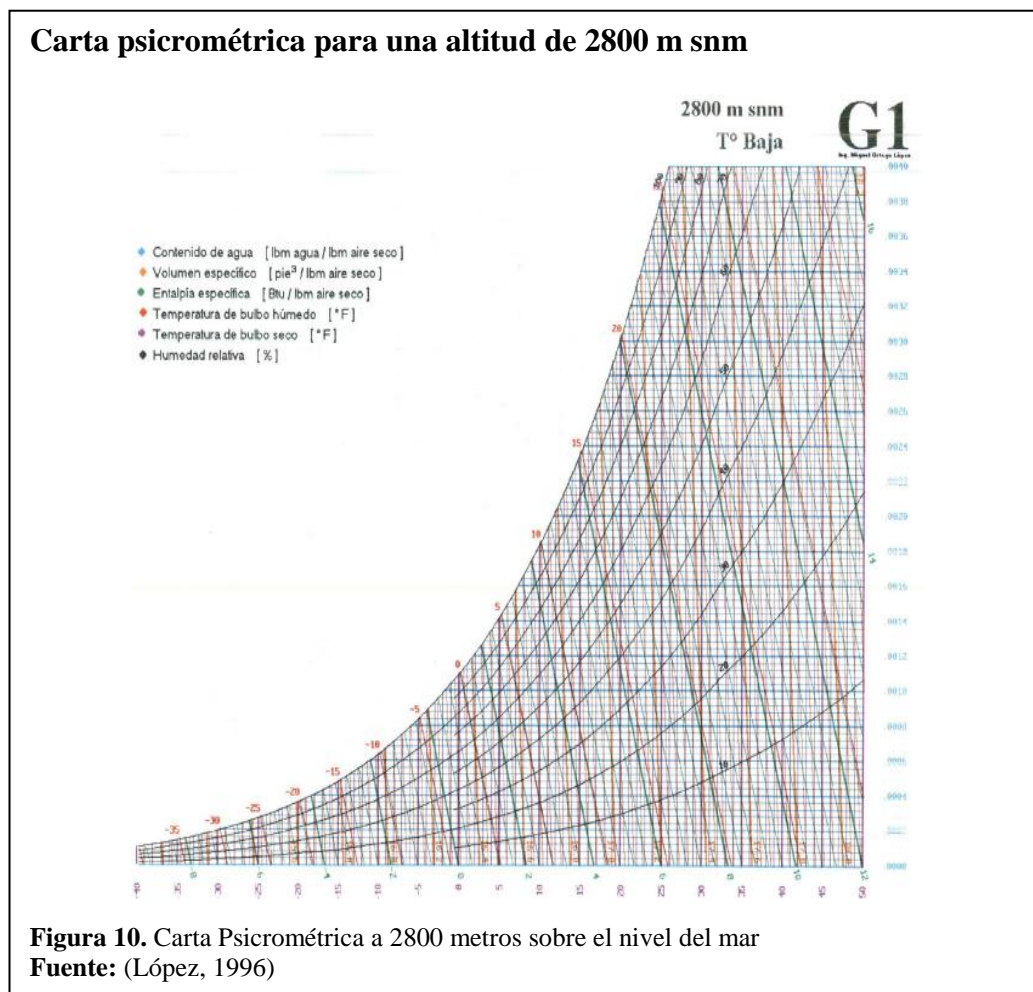
En la **circulación forzada** el aire que se encuentra circulando es generado por un equipo impulsado por energía eléctrica, la ventaja que provee este tipo de sistemas radica en la construcción de secadores de mayor tamaño, alcanzado velocidades de aire entre 0.5 y 1 m/s. Una desventaja es que se debe tener suministro de energía eléctrica para su funcionamiento. (Moreno, 2000)

En la **circulación por convección** natural el aire circula gracias a las diferencias de temperatura entre el colector y la cámara de secado. Siendo este tipo de circulación aplicable en equipos pequeños alcanzando velocidades de aire entre 0.4 y 1 m/s, en comparación con la velocidad en equipos grandes de 0.1 a 0.3 m/s. (Moreno, 2000)

## Psicometría

En el secado a temperatura baja, la velocidad de secado depende de la capacidad del aire para evaporar la humedad, la cual es determinada por las condiciones psicrométricas del aire, la temperatura y la humedad relativa.

En la Figura 10 se detalla la carta psicrométrica para la ciudad de Quito.



**Figura 10.** Carta Psicrométrica a 2800 metros sobre el nivel del mar  
**Fuente:** (López, 1996)

Las propiedades termodinámicas del aire seco y vapor de agua que constituyen el aire atmosférico se puede presentar adecuadamente en forma de gráfico, recibiendo el nombre de carta psicrométrica.

### **1.9 Propiedades termodinámicas fundamentales**

El aire debido a sus características químicas posee la capacidad de retener una cantidad variable de vapor de agua en relación a la temperatura del aire. La relación es directamente proporcional, menor temperatura, menor la cantidad de vapor y a mayor temperatura, mayor cantidad de vapor de agua presente en el aire; a presión atmosférica constante. Diferentes propiedades termodinámicas fundamentales se encuentran relacionadas a las propiedades del aire húmedo.

A continuación se definen las propiedades más relevantes:

#### **Temperatura del bulbo seco**

La temperatura que generalmente se indica como temperatura del aire o del ambiente es la temperatura de bulbo seco, el sensor empleado para su medición es un termómetro en condición seca.

#### **Temperatura del bulbo húmedo**

El instrumento de medición para la temperatura de bulbo húmedo no difiere del instrumento para la temperatura de bulbo seco, la diferencia radica en que tiene un recubrimiento de tela en el bulbo. Para la lectura de la temperatura de bulbo húmedo primero se debe humedecer el bulbo con agua limpia, el aire circundante hace que el agua se evapore obteniendo así una lectura inferior a la temperatura de bulbo seco. La temperatura de bulbo seco es directamente proporcional al aire seco, es decir, entre más seco se encuentre el aire más rápido se evapora el agua del bulbo,

es una indicación del calor total en el aire y la humedad, ya que tanto el aire circundante como la temperatura en el cuarto pueden influir en su lectura.

### **Contenido de agua**

La humedad absoluta o específica es la relación entre el peso del vapor y el aire. Dimensionalmente expresada en gramos de humedad por kilogramo de aire seco (g/kg) en el sistema internacional.

En el presente capítulo se ha recopilado información relacionada al maíz duro – morochillo, elemento a secarse en el presente trabajo así también se analiza los diferentes tipos de secadores existentes, detallando su funcionamiento y aplicabilidad. Otro factor de consideración es la incidencia de la radiación solar en el lugar donde el secador será instalado, para el caso de estudio es en la ciudad de Quito. Se ha recopilado información que permita tener una visión detallada de las variables que influyen para la construcción de un secador solar para el secado de granos.

## 2. Diseño del prototipo de un secador solar para granos de maíz duro – morochillo.

El secador emplea energía solar para su funcionamiento, es pertinente realizar un análisis de la radiación solar del sitio donde será instalado, realizando consideraciones sobre su incidencia en superficies planas y superficies inclinadas, se analiza los materiales empleados para la construcción de colector solar, cámara de secado y se destaca el rol que cumple el aislante, se consideran las pérdidas producidas llegando a establecer el calor necesario para el secado.

### 2.1 Análisis de la radiación solar en Quito

A continuación se muestra la Tabla 3, mediante la cual se puede determinar el día promedio recomendado para cada mes. En donde, (i) es el día del año a analizar, (n) es el valor que toma por cada mes.

**Tabla 3.** Día promedio para cada mes y valor de (n) por meses

Mes	n para i Día del mes	Para el día promedio del mes		
		Fecha	n, día del año	$\delta$ Declinación
Enero	i	17	17	-20.9
Febrero	31+i	16	47	-13.0
Marzo	59+i	16	75	-2.4
Abril	90+i	15	105	9.4
Mayo	120+i	15	135	18.8
Junio	151+i	11	162	23.1
Julio	181+i	17	198	21.2
Agosto	212+i	16	228	13.5
Septiembre	243+i	15	258	2.2
Octubre	273+i	15	288	-9.6
Noviembre	304+i	14	318	-18.9
Diciembre	334+i	10	344	-23.0

**Nota:** En la tabla se muestra el promedio de cada mes. **Fuente:** Adaptado de (Maureira Poveda, 2006)

En la Tabla 4 se detallan las constantes de Ångström-Prescott, las cuales servirán para el cálculo de las heliofanías de cada región que se requiera.

**Tabla 4.** Constantes de Ångström-Prescott

CONSTANTES DE ÅNGSTRÖM	COSTA	SIERRA
a	0,28	0,23
b	0,54	0,56

**Nota:** En la tabla se detallan las constantes para el cálculo de las heliofanías en distintas regiones. **Fuente:** Adaptado de (Benavides, 2006)

### Radiación solar en la ciudad de Quito

A continuación se muestran los cálculos realizados para determinar la radiación mensual promedio en la ciudad de Quito. Tomando como referencia la Tabla 3 para el análisis de energía solar en el mes de Octubre, siendo el día 17 el más representativo para dicho mes, dato que será empleado para el cálculo de la helofanía.

$$i = 17$$

i = Día representativo para el mes de Octubre Tabla 3.

$$n = 273 + 17$$

$$n = 290$$

Donde:

n = valor asignado a cada mes de acuerdo a la Tabla 3.

### Constante solar ( $G_{sc}$ )

La constante solar es la energía que el sol emite por unidad de tiempo a una superficie de forma perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar (Duffie, 2006). Se debe medir en el punto medio de la distancia entre la Tierra y el sol, fuera de la atmosfera. El valor de la radiación solar actualmente conocido es de:

$$G_{sc} = 1367 \frac{W}{m^2}$$

### 2.1.1 Ángulos de la radiación directa

La radiación directa se define como la trayectoria lineal que llega a la superficie de la Tierra sin que se presente cambios en su trayectoria. Entre un plano de cualquier orientación relativa a la Tierra y la radiación directa del sol, se presentan relaciones geométricas, relaciones que son descritas por varios ángulos, sus definiciones se detallan a continuación.

#### Latitud ( $\phi$ )

Es la posición angular Norte o Sur de un punto en la Tierra respecto al Ecuador, es positiva al norte y negativa al Sur;  $-90^{\circ} \leq \phi \leq 90^{\circ}$

Las coordenadas geográficas de la ciudad de Quito son proporcionadas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

**Tabla 5.** Coordenadas geográficas de la ubicación ciudad de Quito

Latitud	21' 57" S
Longitud	33' 18" O

**Nota:** Ubicación de la ciudad de Quito. **Fuente:** (INAMHI, 2014)

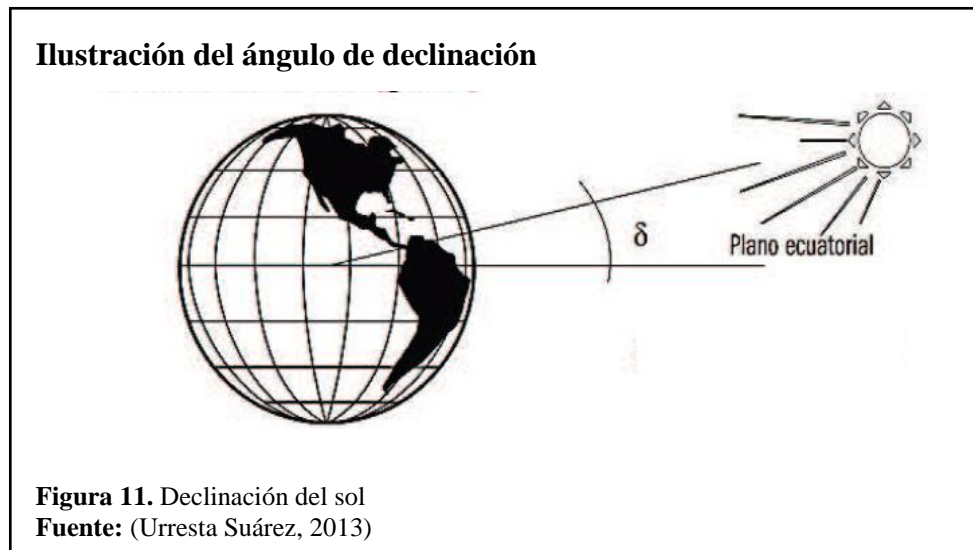
Mediante lo cual se determina el ángulo que representa la latitud de Quito.

$$\phi = 0,167^{\circ}$$

#### Declinación solar ( $\delta$ )

Es el ángulo formado por la declinación del sol en el mediodía con respecto al plano ecuatorial. Siendo positiva al Norte y negativa al Sur;  $-23.5^{\circ} \leq \delta \leq 23.5^{\circ}$

En la Figura 11 se observa la declinación que tienen los rayos solares sobre el plano ecuatorial.



Con la ecuación de Cooper (1969), se puede calcular ( $\delta$ ) en forma mensual con el número de día del año.

$$\delta = 23,45 \times \text{sen} \left[ \frac{360 \times (284+n)}{365} \right] \quad [\text{Ecuación 1}]$$

Donde:

$\delta$  = Ángulo de declinación solar (grados)

n = Número del día del año

$$\delta = -10,33^\circ$$

### Ángulo de acimut de la superficie ( $\gamma$ )

Se define como la desviación de la proyección de la normal a una superficie en el plano horizontal, la desviación de esta proyección respecto al meridiano local, se denomina ángulo de acimut de la superficie, adopta un valor de cero al Sur, siendo negativo al Este y positivo al Oeste;  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$



## Inclinación de la superficie ( $\beta$ )

Es el ángulo formado entre el plano de la superficie en análisis y la horizontal; -  
 $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ , si  $\beta \geq 90^\circ$  el plano está mirando hacia abajo.

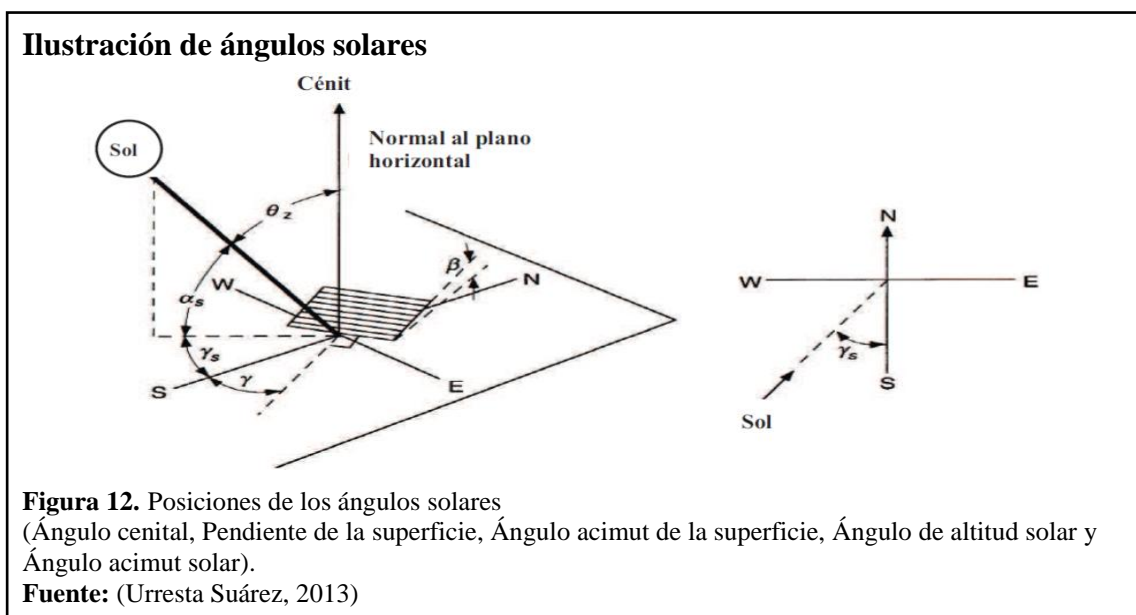
## Ángulo de incidencia

Es el ángulo entre la radiación directa del sol que incide sobre una superficie y la normal a esa superficie.

## Ángulo horario ( $w_s$ )

El sol se desplaza de forma angular en dirección Este u Oeste, respecto al meridiano local, el desplazamiento es generado debido a la rotación de la tierra, su velocidad es de  $15^\circ$  por hora, en horas de la mañana es negativo mientras que en horas de la tarde es positivo.

En la Figura 12. Se muestra la representación de los ángulos del sol hasta llegar al Cénit.



El ángulo horario representado en la Figura 12 como  $\omega_s$  se define de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\omega_s = \text{arc cos}[-\tan(\delta) \times \tan(\theta)] \quad [\text{Ecuación 2}]$$

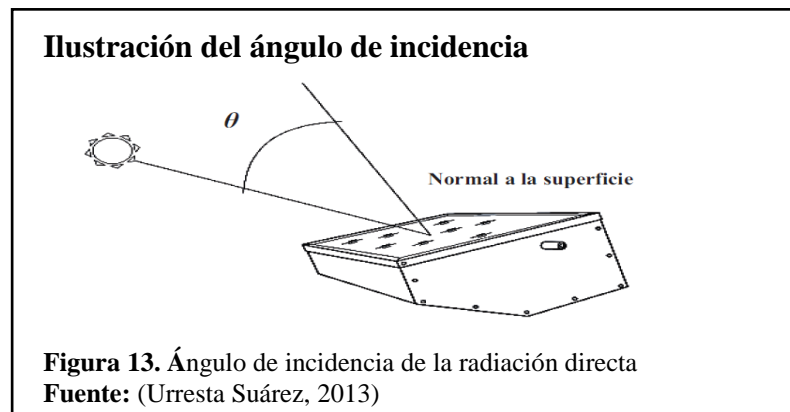
Donde:

$\omega_s$  = Ángulo del ocaso (grados)

$\theta$  = Latitud del lugar donde se hace la prueba (grados)

$$\omega_s = 89,96^\circ$$

Se observa en la Figura 13, la representación gráfica del ángulo de incidencia con respecto a una superficie.



### Número de horas de sol teóricas (N)

En el diseño de equipos que emplean energía solar para su funcionamiento, es de gran importancia las horas efectivas de sol durante el día, las que son calculadas en base al ocaso, desde que sale el sol hasta que se esconde.

$$N = \frac{2}{15} \times \omega_s \quad [\text{Ecuación 3}]$$

Donde:

N = Número de horas de sol teóricas (h)

$\omega_s$  = Ángulo del ocaso (grados)

$$N = 11,99 \approx 12 \text{ horas}$$

### 2.1.2 Heliofanía

Heliofanía o duración de brillo solar, se define como el tiempo de duración de brillo solar u horas de sol. Los instrumentos empleados para su medición se denominan Helifanógrafo, encargado de registrar las horas que recibe radiación solar directa.

A continuación se calcula la heliofanía para el mes en análisis octubre, considerando el día representativo, para el presente caso el día 17 y la heliofanía mensual obtenida de los datos proporcionados por el (INAMHI, 2014).

$$n - \text{Heliofanía} = 149,4$$

$$n.r = 149,4 \div 31 = 4,81$$

### 2.1.3 Radiación extraterrestre diaria sobre una superficie horizontal ( $H_o$ )

Con esta ecuación se puede obtener la radiación que extraterrestre para cada día mes del año:

$$H_o = \frac{24 \times 3600 \times G_{sc}}{\pi} \times \left[ 1 + 0,033 \times \cos\left(\frac{360 \times n}{365}\right) \right] \times \left[ \cos\phi \times \cos\delta \times \text{sen}\omega_s + \left(\frac{\pi \times \omega_s}{180}\right) \text{sen}\phi \times \text{sen}\delta \right] \quad [\text{Ecuación 4}]$$

$$H_o = 38201508 \frac{J}{m^2}$$

$$H_o = 10611,53 \frac{W.h}{m^2.día}$$

### 2.1.4 Radiación diaria solar promedio terrestre sobre una superficie horizontal ( $H_{ab}$ )

Para establecer la radiación solar promedio se debe relacionar las horas de sol con la radiación solar, donde se incorpora la relación Angstrom-PreScott expresada con la siguiente ecuación:

$$\frac{H_{ab}}{H_o} = a + b \times \frac{n.r}{N} \quad [\text{Ecuación 5}]$$

Donde:

$$H_{ab} = \text{Irradiación diaria solar promedio sobre una superficie horizontal; } \frac{W.h}{m^2.día}$$

N = Número de horas de sol teóricas

$n_r$  = Número real de horas de sol

$a$  y  $b$  = Constantes Ångström-Prescott

$$H_{ab} = 4822,58 \frac{W \cdot h}{m^2}$$

### 2.1.5 Estimación de la radiación solar en una superficie inclinada ( $H_T$ )

Para el diseño de equipos solares, se deben cambiar los datos de radiación sobre una superficie horizontal a datos sobre una superficie inclinada, aplicado tanto a la radiación directa como a la radiación difusa.

$$H_T = H_b \times R_b \times H_d \times \left(\frac{1+\cos\phi}{2}\right) + H_{ab} \times \left(\frac{1-\cos\phi}{2}\right) \times P_d \quad [\text{Ecuación 6}]$$

Donde:

$H_T$  = Radiación solar en la superficie inclinada;  $\frac{W \cdot h}{m^2}$

$H_b$  = Radiación solar directa horaria en una superficie horizontal;  $\frac{W \cdot h}{m^2}$

$R_b$  = Factor de cambio de ángulo de incidencia en el transcurso del día

$H_d$  = Radiación solar difusa horaria en una superficie horizontal;  $\frac{W \cdot h}{m^2}$

$H_{ab}$  = Radiación global horaria;  $\frac{W \cdot h}{m^2}$

$P_d$  = Albedo o coeficiente de reflexión del suelo

Se debe calcular primero  $H_b$  y  $H_d$

### 2.1.6 Radiación solar difusa horaria en una superficie horizontal ( $H_d$ )

La radiación emitida por el sol al llegar a la Tierra atraviesa la atmósfera, reflejándose y difundiéndose en la atmósfera, cambiando su dirección original.

Se calcula en base al valor de KT (índice de claridad), mediante la siguiente ecuación:

$$H_d = H_{ab} \times [1,39 - 4,03 \times KT + 5,53 \times KT^2 - 3,11 \times KT^3] \quad [\text{Ecuación 7}]$$

### 2.1.7 Índice de claridad (KT)

Se puede definir el índice de claridad diaria como la relación de la radiación de un día en particular a la radiación extraterrestre para el día en análisis 17 de octubre. A continuación se detalla:

$$KT = \frac{H_{ab}}{H_o} \quad \text{[Ecuación 8]}$$

$$KT = 0,45$$

Con el valor de KT determinado, se puede obtener la radiación difusa  $H_d$ :

$$H_d = 1991,36 \frac{W \cdot h}{m^2 \cdot día}$$

### 2.1.8 Radiación solar directa en una superficie horizontal ( $H_b$ )

No toda la radiación solar que atraviesa la atmosfera cambia de dirección, a esta radiación se define como radiación solar directa en una superficie horizontal.

Depende de la radiación difusa ( $H_d$ ).

$$H_b = H_{ab} - H_d \quad \text{[Ecuación 9]}$$

$$H_b = 2831,22 \frac{W \cdot h}{m^2 \cdot día}$$

### 2.1.9 Factor de cambio de ángulo de incidencia en el transcurso del día ( $R_b$ )

Es la razón del promedio diario para cada mes de la radiación directa sobre una superficie inclinada al promedio de la misma magnitud pero sobre una superficie horizontal.

[Ecuación 10]

$$R_b = \frac{\text{sen} \delta \times \text{sen}(\phi - \beta) \times (t_2 - t_1) + \frac{12}{\pi} \times \text{cos} \delta \times \text{cos}(\phi - \beta) \times [\text{sen}(15 \times t_1) - \text{sen}(15 \times t_2)]}{\text{sen} \delta \times \text{sen} \phi \times (t_2 - t_1) + \frac{12}{\pi} \times \text{cos} \delta \times \text{cos} \phi \times [\text{sen}(15 \times t_1) - \text{sen}(15 \times t_2)]}$$

Donde:

$\beta$  = Ángulo de inclinación de la cubierta del vidrio

$t_1$  = Tiempo inicial desde las 24 horas o 12 de la noche hasta las 9 horas

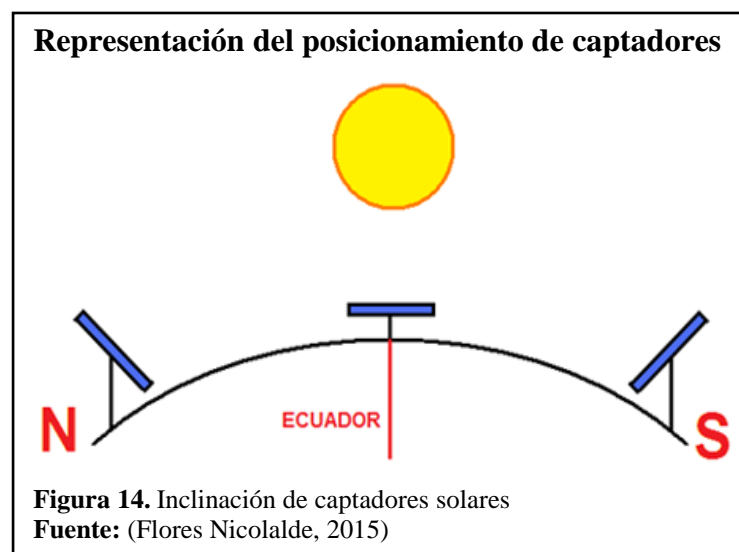
$t_2$  = Tiempo final desde las 24 horas o 12 de la noche hasta las 16 horas

Remplazando los valores en la ecuación 10 el resultado es el siguiente:

$$R_b = 1,05$$

### 2.1.10 Ángulo de incidencia con respecto a la horizontal para la cubierta de un secador solar ( $\theta$ )

Se requiere de un captador de energía para establecer los ángulos de incidencia, el cual ocupa una posición en la superficie terrestre.



De acuerdo con Flores N. (2015), los grados de inclinación de la cubierta, se basa en la latitud del lugar donde se monte el sistema, para el caso del secador solar, la latitud del lugar es de 21°57' S, lo que quiere decir que se debe dar una inclinación con respecto a la horizontal de 21°57', se puede definir a ésta inclinación como mínima, razón por la cual se adopta un ángulo de 30° ya que las pérdidas por radiación son menores, la difusión es mayor y permite que el aire circule adecuadamente por el sistema.

### **La radiación solar incidente o radiación total ( $H_T$ )**

Es la radiación solar sobre una superficie con una inclinación  $\beta$  respecto a la horizontal, siendo así la suma de sus componentes, radiación directa, radiación difusa y reflejada por el suelo, se expresa de acuerdo a la ecuación:

$$H_T = Hb_T + Hd_T + Hr_T \quad \text{[Ecuación 11]}$$

#### **2.1.11 Radiación directa sobre una superficie inclinada ( $Hb_T$ )**

Se calcula relacionando la radiación directa sobre una superficie horizontal ( $H_b$ ) con el factor de cambio de ángulo ( $R_b$ )

$$Hb_T = H_b \times R_b \quad \text{[Ecuación 12]}$$

$$Hb_T = 2972,75 \frac{W \cdot h}{m^2}$$

#### **2.1.12 Radiación difusa sobre una superficie inclinada ( $Hd_T$ )**

Existe variación entre la radiación difusa sobre una superficie inclinada  $Hd_T$  y la que incide sobre una superficie horizontal ( $H_d$ ), ya que  $Hd_T$  no mira hacia todo el cielo que es el origen de la radiación difusa, mediante la siguiente ecuación:

$$H_d = \frac{1 + \cos\beta}{2} \quad \text{[Ecuación 13]}$$

Quedando la ecuación para la radiación difusa en una superficie inclinada de la siguiente forma:

$$Hd_T = H_d \times \left[ \frac{1 + \cos\beta}{2} \right] \quad \text{[Ecuación 14]}$$

Reemplazando valores:

$$Hd_T = 1857,96 \frac{W \cdot h}{m^2}$$

### 2.1.13 Radiación reflejada por el suelo ( $H_{r_T}$ )

Al ser ubicado el sistema en el suelo, recibe radiación directa y difusa reflejada por el terreno circundante. Se calcula su valor en la ecuación:

$$H_{r_T} = \rho \times H_{ab} \times \left[ \frac{1 - \cos\beta}{2} \right] \quad [\text{Ecuación 15}]$$

Donde:

$$\rho_T = 0,2 \text{ Albedo}$$

$$H_{r_T} = 63,94 \frac{W \cdot h}{m^2}$$

Con los valores obtenidos, se reemplaza los valores en la ecuación 11 de la radiación total que incide en una superficie inclinada.

$$H_T = 4902,77 \frac{W \cdot h}{m^2}$$

## 2.2 Energía solar disponible para la transferencia de calor y masa

Uno de los factores más importantes en el diseño de máquinas solares es la energía solar disponible en el lugar donde se ubicará, se establecen los siguientes aspectos de relevancia para el balance de energía.

Una vez que se ha obtenido la energía incidente que llega a la superficie del secador ( $H_T$ ), parte de dicha energía se refleja, otra parte de la energía solar es absorbida y una parte final es transmitida al secador, compuesto principalmente por el vidrio (g), el grano (c).

Para el proceso de transferencia de calor el secador recibe la radiación difusa y la radiación directa, en la transferencia térmica de calor y masa.

$$G_s = H_b + H_d \quad [\text{Ecuación 16}]$$

$$G_s = 4822,58 \frac{W \cdot h}{m^2}$$



La radiación que entra en el secador es:

$$G_{rg} = G_s x (1 - \alpha_g) \quad \text{[Ecuación 17]}$$

Donde:

$\alpha_g = 0,1$  Factor que incluye la reflexión y la absorción de la radiación solar en vidrio.

$$G_{rg} = 4340,32 \frac{W \cdot h}{m^2}$$

### 2.2.1 Transferencia de calor por conducción ( $q_c$ )

En la pared plana inferior del secador es donde se realiza la transferencia de calor por convección y es donde se debe enfocar el estudio, para el análisis se emplea la siguiente fórmula:

$$q_c = k_b x (T_c - T_a) \quad \text{[Ecuación 18]}$$

Donde:

$k_b$  = Resistencia térmica equivalente del aislante;  $\frac{m^2 \cdot K}{W}$

$T_c$  = Temperatura del grano; K

$T_a$  = Temperatura ambiente; K

Es necesario calcular la resistencia térmica del aislante ( $R_{eq}$ ), en este caso para el tol que forma parte de la base del colector, la plancha de lana de vidrio – aislante que evita la pérdida de calor y una capa de duratecho que forma parte de la estructura exterior.

$$R_{eq} = \frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2} + \frac{x_3}{k_3} \quad \text{[Ecuación 19]}$$

Donde:

$x_1$  = Espesor plancha de duratecho; m

$x_2$  = Espesor plancha de lana de vidrio; m

$x_3$  = Espesor plancha de hierro tol; m

$k_1$  = Coeficiente de conductividad térmica del duratecho o galvalume;  $\frac{W}{m \cdot K}$

$k_2$  = Coeficiente de conductividad térmica de la lana de vidrio;  $\frac{W}{m \cdot K}$

$k_3$  = Coeficiente de conductividad térmica del hierro tol;  $\frac{W}{m \cdot K}$

Remplazando los valores se obtiene:

$$R_{eq} = 1,02 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

### 2.2.2 Coeficiente de calor convectivo ( $h_{ct}$ )

Se aplica para determinar las pérdidas de calor por convección, depende de la velocidad del viento.

$$0 \leq v \leq 5 \frac{m}{s}$$

La fórmula para calcular el  $h_{ct}$  es:

$$h_{ct} = 5,7 + 3,8 x (v) \quad \text{[Ecuación 20]}$$

Donde:

$v$  = Velocidad del viento;  $\frac{m}{s}$

La velocidad del viento en la ciudad de Quito es de  $2,5 \frac{m}{s}$  información obtenida del (INAMHI, 2014).

$$h_{ct} = 15,2 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

### 2.2.3 Resistencia térmica del aislante ( $k_b$ )

Se requiere conocer la resistencia térmica de la lana de vidrio, es decir la oposición que muestra al paso del calor, y del coeficiente convectivo de calor  $h_{ct}$ .

$$k_b = \frac{1}{R_{eq} + \frac{1}{h_{ct}}} \quad \text{[Ecuación 21]}$$

Donde:

$R_{eq}$  = Resistencia térmica de las paredes aislantes;  $\frac{m^2.K}{w}$

$h_{ct}$  = Coeficiente de calor convectivo;  $\frac{W}{m^2.K}$

$$k_b = 0,921 \frac{W}{m^2.K}$$

Con el valor de la resistencia térmica del aislante y el valor de las temperaturas del grano y del ambiente, se tienen las variables requeridas para calcular el calor perdido por conducción ( $q_c$ ):

$$q_c = 22,10 \frac{W}{m^2}$$

#### 2.2.4 Transferencia de calor por radiación en el vidrio ( $q_{rg}$ )

Calor perdido por la radiación del vidrio, se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$q_{rg} = \varepsilon_g \times \sigma \times (T_g^4 - T_s^4) \quad \text{[Ecuación 22]}$$

Donde:

$\varepsilon_g$  = Emisividad del vidrio

$\sigma$  = Constante de Stefan Boltzman;  $\frac{W}{m^2.K}$

$T_g$  = Temperatura del vidrio; K

$T_s$  = Temperatura del cielo; K

#### 2.2.5 Temperatura del cielo

El aire caliente al estar en contacto con una superficie con diferencial de temperatura inferior, se produce un cambio de estado, es decir se condensa sobre una superficie, a esta temperatura se denomina temperatura de rocío. La que se gradúa en la misma escala que la temperatura de bulbo húmedo.

Se calcula la temperatura del cielo mediante la siguiente fórmula:

$$T_s = T_a \times \left[ 0,8 + \frac{T_{dp} - 273}{250} \right]^{0,25} \quad [\text{Ecuación 23}]$$

Donde:

$T_{dp}$  = Temperatura de rocío; K

$T_a$  = Temperatura ambiente; K

Para obtener la temperatura de cielo se emplea la siguiente ecuación, basada en la temperatura de rocío.

$$T_{dp} = \sqrt[8]{\frac{H_r}{100}} \times (110 + T_a) - 100 \quad [\text{Ecuación 24}]$$

Donde:

$H_r$  = Humedad relativa (%)

$$T_{dp} = 286,46 \text{ K}$$

Con el valor de  $T_{dp}$  se puede determinar el valor de  $T_s$

$$T_s = 277,80 \text{ K}$$

Cálculo de la radiación que se pierde en el vidrio

$$q_{rg} = \varepsilon_g \times \sigma \times (T_g^4 - T_s^4)$$

$$q_{rg} = 137,02 \frac{W}{m^2}$$

### 2.2.6 Calor perdido por convección del vidrio ( $q_{cg}$ )

El calor perdido por transferencia de calor por convección en la cubierta de vidrio del secador solar, se detalla a continuación:

$$q_{cg} = h_{cv} \times (T_g - T_a) \quad [\text{Ecuación 25}]$$

Donde:

$h_{cv}$  = Coeficiente de transferencia de calor convectivo del vidrio;  $\frac{W}{m^2.K}$

$T_g$  = Temperatura del vidrio; K

En la ecuación 25 se reemplaza los valores y se obtiene el calor perdido por convección.

$$h_{cv} = h_{ct}$$

$$q_{cg} = 285,91 \frac{W}{m^2}$$

### 2.2.7 Calor perdido por radiación del grano ( $q_{rc}$ )

Para el cálculo de transferencia de calor por radiación entre el grano y la cubierta de vidrio del secador solar, el intercambio se lo realiza entre dos superficies paralelas infinitas, donde se utiliza la siguiente ecuación:

$$q_{rc} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{1}{\varepsilon_g} - 1} x (T_c^4 - T_a^4) \quad [\text{Ecuación 26}]$$

Donde:

$\sigma$  = Constante de Stefan Bolstzman;  $\frac{W}{m^2.K}$

$\varepsilon_c$  = 0,98 Emisividad del grano

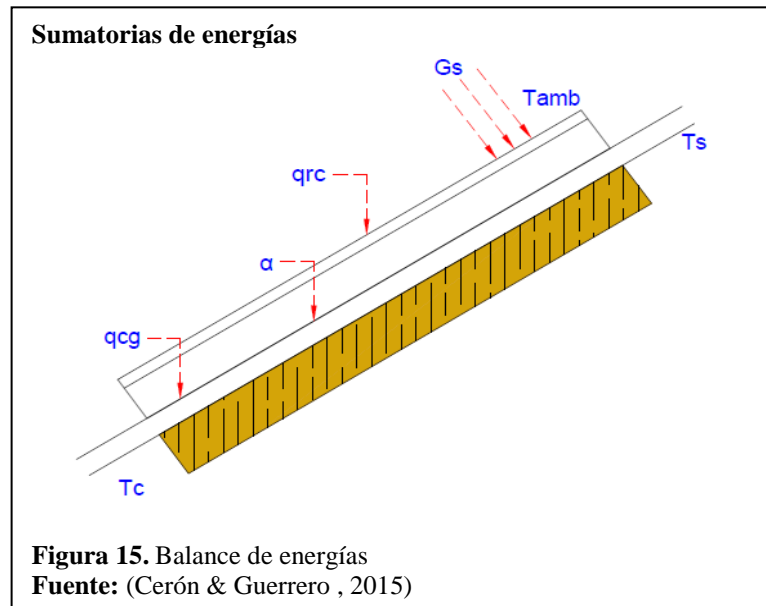
$\varepsilon_g$  = 0,8 Emisividad del vidrio

$$q_{rc} = 133,41 \frac{W}{m^2}$$

### 2.3 Balance global de energía del sistema

Para el análisis global del sistema se considera el conjunto, formado por la tapa transparente y placa absorbadora, para dicho balance se toman los valores representativos que inducen la pérdida de calor en el sistema. Los valores de pérdida de calor se presentan por la radiación directa y la radiación del vidrio.

De acuerdo con Cerón (2015), se observa en la Figura 15 la representación del balance de energías.



De acuerdo con la Figura 15 se toma en consideración el principio de conservación de la energía:

$$q'_c = q_{rc} + (\alpha_g + Gs) - (q_{rg} + q_{cg}) \quad [\text{Ecuación 27}]$$

Donde:

$$q'_c = \text{Calor almacenado por la cubierta; } \frac{W}{m^2}$$

$$q_{rw} = \text{Calor perdido por la radiación; } \frac{W}{m^2}$$

$$\alpha_g = \text{Factor de reflexión de la radiación; } \frac{W \cdot h}{m^2 \cdot \text{día}}$$

$$Gs = \text{Radiación directa sobre una superficie inclinada; } \frac{W \cdot h}{m^2 \cdot \text{día}}$$

$$q_{rg} = \text{Calor perdido por la radiación del vidrio; } \frac{W}{m^2}$$

$$q_{rg} = \text{Coeficiente de transferencia de calor convectivo del vidrio; } \frac{W}{m^2}$$

$$q'_c = 752,43 \frac{W \cdot h}{m^2 \cdot \text{día}}$$

$$q'_c = 752,43 \frac{W \cdot h}{m^2 \cdot \text{día}} \times \frac{\text{día}}{7h} = 107,49 \frac{W}{m^2}$$

## 2.4 Cálculo del calor absorbido por el grano

En la siguiente ecuación se realiza el balance de calor sobre el grano:

$$q'_a = Gs x (1 - \alpha_g) x (1 - \alpha_a) - (q_{rc} + q_c) \quad [\text{Ecuación 28}]$$

Donde:

$$q_c = \text{Calor perdido por evaporación; } \frac{W}{m^2}$$

En las primeras horas de la mañana el sol proporciona calor suficiente para que el sistema se caliente, la radiación solar es intensa al medio día, por lo que el secador en su operación será efectivo, aportando 7 horas de trabajo de secado efectivo y al finalizar el día la temperatura desciende, para hacer las unidades consistentes se tiene:

$$q_{rc} = 133,41 \frac{W}{m^2}$$

$$Gs = 4822,58 \frac{W \cdot h}{m^2 \cdot \text{día}} x \frac{\text{día}}{7h} = 688,94 \frac{W}{m^2}$$

$$q'_a = 279,14 \frac{W}{m^2}$$

## 2.5 Cálculo del calor absorbido por el sistema

Para encontrar el calor absorbido se emplea la siguiente ecuación, es necesario conocer las variables de calor absorbido por el grano y almacenado por la cubierta.

$$q_t = q'_c + q'_a \quad [\text{Ecuación 29}]$$

Donde:

$$q_t = \text{Calor absorbido por el sistema; } \frac{W}{m^2}$$

$$q'_a = \text{Calor absorbido por el grano; } \frac{W}{m^2}$$

$$q'_c = \text{Calor almacenado por la cubierta; } \frac{W}{m^2}$$

Reemplazando

$$q_t = (107,49 + 279,14) \frac{W}{m^2}$$

$$q_t = 386,63 \frac{W}{m^2}$$

Calculando la capacidad del calor almacenado por el secador promedio de la siguiente ecuación:

$$Q_T = q_t \times A_{colector} \quad [\text{Ecuación 30}]$$

$$Q_T = 386,63 \frac{W}{m^2} \times 1 m^2$$

$$Q_T = 386,63 W$$

## 2.6 Cantidad de calor necesario para calentar y evaporar

Se encuentra el calor necesario para calentar y evaporar la humedad del grano mediante la siguiente ecuación.

$$md = \rho d \times Ad \times Ed \quad [\text{Ecuación 31}]$$

Donde:

$md$  = Masa del duratecho; kg

$\rho d$  = Densidad del duratecho;  $\frac{kg}{m^3}$

$Ad$  = Área del duratecho;  $m^2$

$Ed$  = Espesor del duratecho;  $m$

Para realizar el cálculo se toma como referencia el espesor del metal duratecho de 4 mm.

Sustituyendo en la ecuación 31 el valor del peso específico del duratecho  $7850 \frac{kg}{m^3}$ , se obtiene la masa en función de la longitud:

$$md = 7850 \frac{kg}{m^3} \times 1 m^2 \times 0,004m$$



El resultado de la masa del duratecho es:

$$m_d = 31,4 \text{ kg}$$

Con la ayuda de la masa de la plancha de duratecho y haciendo uso de la siguiente ecuación se determina el calor necesario para calentar la plancha de duratecho:

$$Q_d = m_d \times Cp_d \times (T_d - T_a) \quad \text{[Ecuación 32]}$$

Donde:

$$Q_d = \text{Calor necesario para calentar el vidrio; } \frac{W.h}{\text{día}}$$

$$Cp_d = \text{Capacidad calorífica del duratecho; } \frac{J}{\text{kg.K}}$$

$$T_d = \text{Temperatura duratecho; K}$$

$$T_a = \text{temperatura ambiente; K}$$

$$Q_d = 31,4 \text{ kg} \times 389 \frac{J}{\text{kg.K}} \times (308,65 - 289)K$$

$$Q_d = 66,67 \frac{W.h}{\text{día}}$$

$$Q_d = 66,67 \frac{W.h}{\text{día}} \times \frac{\text{día}}{7h} = 9,52 W$$

## 2.7 Calor necesario para calentar el grano

Para la determinación del calor necesario para calentar el agua se hace uso de la ecuación:

$$Q_{cc} = mc \times Cp_c \times (T_c - T_a) \quad \text{[Ecuación 33]}$$

Donde:

$$m_c = \text{Masa del grano; kg}$$

$$Cp_c = \text{Capacidad calorífica del maíz; } \frac{kJ}{\text{kg.K}}$$

$$T_c = \text{Temperatura del grano; K}$$

$$T_a = \text{Temperatura ambiente; K}$$

Se debe considerar las horas de sol efectivo de trabajo que tiene el día. Para el presente trabajo se han considerado 7 horas.

$$Q_{cc} = 15 \text{ kg} \times 0,1020 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \times (313 - 289) \text{K}$$

$$Q_{cc} = 36,72 \text{ kJ}$$

El calor obtenido se transforma a vatios hora y esta transformación se considera por día.

$$Q_{cc} = 10,2 \frac{\text{W} \cdot \text{h}}{\text{día}}$$

$$Q_{cc} = 10,2 \frac{\text{W} \cdot \text{h}}{\text{día}} \times \frac{\text{día}}{7\text{h}} = 1,46 \text{ W}$$

## 2.8 Calor necesario para evaporar x porcentaje de humedad del grano

Cálculo de calor necesario para evaporar un porcentaje del total de la masa del grano. La humedad inicial del grano de maíz duro – morochillo se encuentra determinada por la (FAO - Food and agriculture organization), en un rango promedio del 28%. (Quitiaquez, 2015)

$$Q_{ev} = x' \times m \times c \times \lambda \quad \text{[Ecuación 34]}$$

Donde:

$$\lambda = \text{Calor latente de agua a evaporar; } \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$x' = \text{Humedad del grano (28\%)}$$

Reemplazando valores:

$$Q_{ev} = 0,28 \times 15 \text{ kg} \times 2407,99 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_{ev} = 10113,55 \text{ kJ}$$

$$Q_{ev} = 2809,32 \frac{\text{W} \cdot \text{h}}{\text{día}}$$

Para expresar el calor obtenido en Watts se considera las horas efectivas de secado al día, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Q_{ev} = 2809,32 \frac{W \cdot h}{día} \times \frac{día}{7h} = 401,33 W$$

La cantidad necesaria para calentar el panel viene dada de la siguiente ecuación:

$$Q_N = Q_{cd} + Q_{cc} + Q_{ev} \quad \text{[Ecuación 35]}$$

$$Q_{cd} = q_{cg} \times A_{colector} + Q_d \quad \text{[Ecuación 36]}$$

$$Q_{cd} = 285,91 \frac{W}{m^2} \times 1 m^2 + 9,52 W$$

$$Q_{cd} = 295,43 W$$

Sustituyendo en la ecuación 35 se tiene el siguiente resultado:

$$Q_N = 295,43 W + 1,46 W + 401,33 W$$

$$Q_N = 698,22 W$$

Calculando la energía total almacenada (Q) por el sistema según la ecuación:

$$Q = Q_T + Q_N \quad \text{[Ecuación 37]}$$

$$Q = 386,63 W + 606,05 W$$

$$Q = 1084,85 W$$

De acuerdo a la ecuación

$$\text{Eficiencia}_{teórica} \eta = \frac{Q}{A_c G_s} \quad \text{[Ecuación 38]}$$

Donde:

$A_c$  = área del colector ( $1m^2$ )

$$\eta = 0,21$$

$$\eta = 21\%$$

## 2.9 Consideraciones en el diseño de la carcasa

La carcasa se fabrica con láminas de tol, se seleccionó este tipo de lámina ya que cumple con los requisitos de resistencia, bajo peso. Para protegerlo del deterioro por condiciones ambientales será protegido con una capa de pintura.

## 2.10 Cubierta transparente

La absorción depende del espesor del cristal, debido a esto el cristal debe ser tan delgado como sea posible tomando en cuenta que este espesor sea compatible con la resistencia mecánica del material. (Maureira Poveda, 2006)

Existen varios materiales empleados en los secadores solares para cubiertas, indicando las principales características se ha formulado la siguiente tabla.

**Tabla 6.** Comparación de diversos tipos de cubiertas

	Porcentaje de Transmitancia de Energía solar (onda corta)	Porcentaje de Transmitancia Infrarroja (onda larga)	Índice de Refracción	Durabilidad y Resistencia al clima
Vidrio blanco				Excelente
Vidrio templado con bajo contenido de hierro	91,5 87,5	2 2	1,5 1,51	Excelente
Láminas de vidrio con bajo contenido de hierro	87,5	2	1,51	Excelente
Vidrio flotado y templado	84,3 77 a 87	2 0,1 a 0,3	1,52 1,54	Regular a bueno
Fibra de vidrio	80 a 90	2	1,49	Deficiente a bueno
Láminas acrílicas	73 a 84	2	1,59	bueno
Láminas de policarbonatos	90 a 92 80 a 87	25 a 26 20 a 21	1,34 1,64 a 1,67	Aceptable a bueno
Teflón FEP				Aceptable a bueno
Película de poliéster				bueno

**Nota:** Se observa los distintos tipos de cubierta y sus porcentajes de ondas.  
**Fuente:** Adaptado de (Maureira Poveda, 2006)

Se seleccionó la lámina de vidrio claro ya que presenta las siguientes ventajas:

- Retiene las ondas electromagnéticas, produciendo el efecto invernadero, permitiendo de esta manera que el calor permanezca dentro del panel.
- Disminuye las pérdidas de calor por convección hacia el exterior.
- Tiene un buen comportamiento a choques térmicos, alta resistencia y bajo costo.
- Transparencia del 92% ( Una absorción del 95% de la energía recibida y una emisión del 5% de la radiación solar) (V. Cardozo, 2005)

## 2.11 Aislamiento

El aislamiento de un colector solar debe cumplir con los siguientes requisitos y características:

- No debe existir deterioro, gasificación ni evaporación a temperaturas de 200 C
- No debe haber deterioro debido a la repetición de los ciclos térmicos entre 30 C y 120 C
- Conductancia térmica inferior a  $0.04 \frac{W}{m.K}$  (R = 10 o menor)
- Debe ser hidrofóbico, de tal forma que no absorba ni retenga el agua

Existen cuatro tipos básicos de aislantes térmicos que son tratados por Montgomery (1994). Los aislantes de fibra mineral o de cerámica, con excepción de la lana mineral, resisten altas temperaturas debido a su diseño, temperaturas que exceden las alcanzadas por los colectores solares, su costo hace que sean poco aplicables en el diseño de máquinas solares. La lana mineral al estar bajo los efectos del ciclo de humedad pierde sus propiedades aislantes, por lo que no se la usa. Las planchas de fibra de vidrio se fabrican con pequeñas cantidades de aglutinante o

ninguno, lo que hace que sea resistente a altas temperaturas, siendo un aislante adecuado para las aplicaciones de colectores solares.

Incropera (1999), detalla las propiedades termo físicas de algunos materiales y sistemas de aislamiento, por lo que para escoger el aislante esta información es de gran importancia, cabe recalcar que se debe tomar en cuenta las posibilidades de obtener el aislante seleccionado en el mercado nacional, así como también los costos de este.

## **2.12 Placa absorbente**

La placa de absorción debe estar construida de material ferroso con contenido de zinc y carbono, se recomienda que la placa absorbente tenga una capa de recubrimiento de color negro mate para que exista mayor captación y retención de energía, con el objetivo de mejorar el sistema del colector. Se encarga de recolectar la energía que se transmite a través de la cubierta, además debe tener la capacidad de transferir la energía al fluido de trabajo el cual es el aire. La placa absorbedora cumple con las siguientes funciones:

- Capta y remite la radiación solar
- Transmite a un fluido de trabajo (aire), el calor generado por la radiación solar.

### **2.12.1 Entrada de aire al colector solar**

El ingreso de la cantidad adecuada de aire en un colector debe ser la apropiada, en el diseño de prototipos de colectores solares verticales que aplican el concepto de circuitos convectivos aplicados en acondicionamiento de aire para edificios, se establece las aberturas para la circulación de aire, cada abertura tiene un

área igual al 1% del área total de la base. (Hernández, Fernández, Salvo, & Suligoy, 2007)

En el presente trabajo se emplea la circulación por convección natural, es decir, el aire es movido por la diferencias de temperaturas entre las distintas partes del equipo, que promueven la convección térmica del aire, este tipo de circulación se hace más difícil de incorporar con equipos grandes. (Moreno, 2000)

#### **Vista de la entrada del aire del colector**



**Figura 16.** Entradas de aire

**Fuente:** (Hernández, Fernández, Salvo, & Suligoy, 2007)

Para equipos pequeños o medianos se pueden lograr velocidades de 0,4 a 1,0 m/s al interior de la cámara, pero en equipos grandes esta velocidad no sobre pasa los 0,1 a 0,3 m/s. (Centro Tecnológico Nacional de la Conserva y Alimentación, 2013)

#### **2.12.2 Dinámica del aire al calentarse**

El medio físico está constituido por: sólido (tierra, rocas), agua (hidrósfera) y la envolvente gaseosa (atmósfera), con una interacción continua, siendo la biosfera, la totalidad de formas de vida del planeta (sobre tierra sólida, agua y atmósfera) y que asocia a los elementos que se han considerado.

La atmosfera es una capa de gas la cual nos proporciona de aire para respirar también protege del sol y de las radiaciones peligrosas.

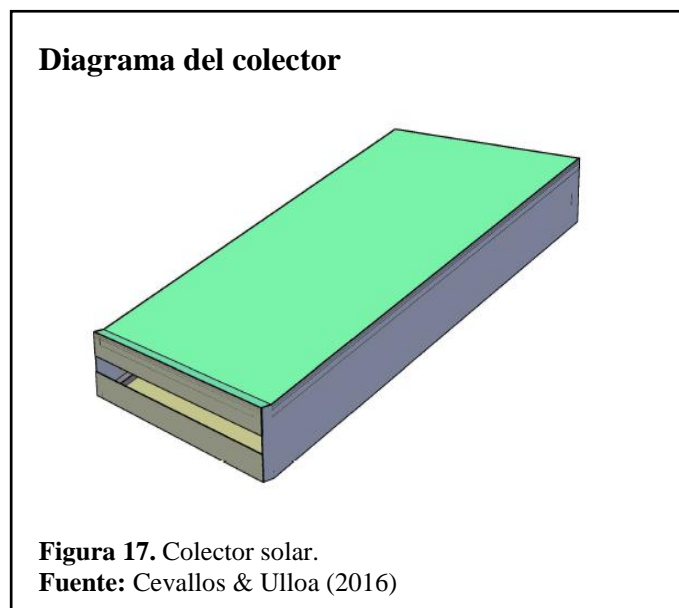
Los factores que determinan el clima son: la temperatura del aire, la humedad del aire, la cantidad y tipo de precipitación, presión ejercida por el aire, velocidad y dirección de viento.

Para que exista los fenómenos atmosféricos como vientos de temporada hasta una suave brisa es por la energía calorífica la cual se da en la atmosfera.

El aire al calentarse se hace menos denso y más ligero, mientras que cuando se enfría se hace más denso y pesado. (Bilbao, 2012)

### 2.12.3 Colector solar principal

Dimensiones 1m x 1,6m



Un colector solar convierte la radiación solar en calor, la radiación tiene que atravesar una capa de vidrio, luego de atravesar la cubierta transparente la radiación llega a la parte principal del colector, la placa de absorción, la radiación es transformada en calor en esta placa, el mismo que se transmite al fluido de trabajo por conducción, convección, comúnmente se la pinta de color negro.



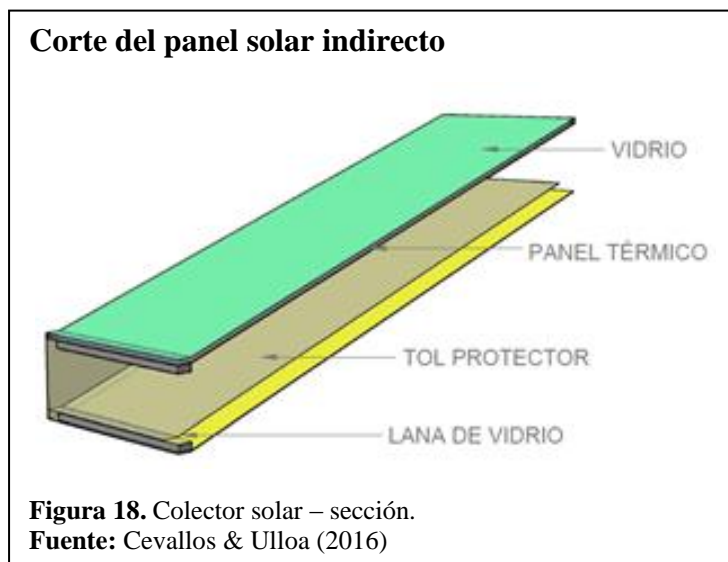
En la Tabla 7 se detalla todos los componentes del colector del secador solar.

**Tabla 7.** Tabla de características de los componentes del secador

<b>PARTES</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>REFERENCIAS</b>
Cubierta transparente	Material: Vidrio  Dimensiones: 2x(0,795x0,995) m x0,004 m Peso: 15,97 kg	Extralum: Peso: 10,1 kg/m <sup>2</sup> (Extralum vidrio y aluminio, 2010)
Placa absorbedora:	Dimensiones: 1,56x0,913m Área: 1,42 m <sup>2</sup> Peso: 4,77 kg	Catálogo Dipac Peso: 3,35 kg/m <sup>2</sup>
Aislante	Material: Lana de vidrio  Dimensiones: 1,575x0,96 m 2 x (1,6x0,168) m Área total = 2,05 m <sup>2</sup> Peso: 1,93 kg	Espesor: 0,05 m Densidad: 18kg/m <sup>3</sup> Referencia: (KAEFER SOUYET)
Cubierta	Material: Tol  Área interna 2,35 m <sup>2</sup> 2 x (1,644x0,220) m 1,002x1,635 m Peso: 12,91 kg Área externa = 2,28 m <sup>2</sup> 2x(1,638x0,208) m 1,615x1,002 m Peso: 12,53 kg	Espesor = 0,0007 m Peso específico acero = 7850 kg/ m <sup>3</sup>

**Nota:** Se detalla las áreas de los componentes del secador y sus referencias.  
**Fuente:** Cevallos & Ulloa (2016)

La placa de absorción se coloca sobre el aislante térmico, con una separación aceptable, de tal forma que el fluido de trabajo fluya entre estos dos componentes, otra forma en la que puede fluir el aire es por el espacio vacío existente entre la placa absorbidora y la cubierta de vidrio.



#### 2.12.4 Colector solar secundario

El segundo colector solar ha sido instalado para potenciar el secado de los granos, este colector es del tipo directo.

**Tabla 8.** Características de los componentes del colector solar secundario.

PARTES	CARACTERÍSTICAS	REFERENCIAS
Cubierta transparente	Material: Vidrio	
Colector solar directo	Dimensiones: 415x995x0,004 mm Área: 0,41 m <sup>2</sup> Peso del vidrio: 4,87 kg	Extralum: Peso: 10,1 kg/m <sup>2</sup> (Extralum vidrio y aluminio, 2010)

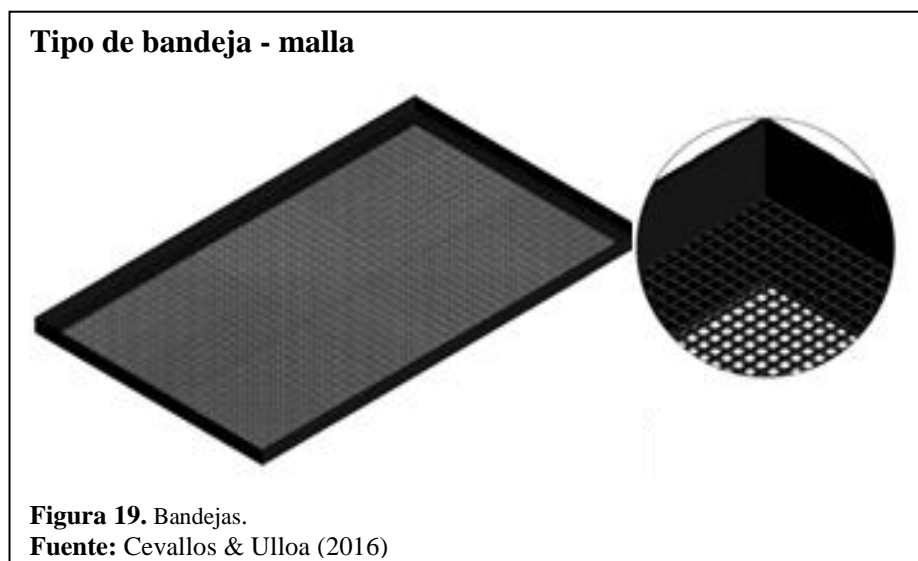
**Nota:** Se muestra los componentes del colector secundario y sus referencias.  
**Fuente:** Cevallos & Ulloa (2016)

## Cubierta transparente

Se denomina así ya que se halla constituida por una lámina de vidrio o plástico transparente, que se hallan ubicadas sobre la placa absorbadora. El objetivo principal de la cubierta transparente es reducir las pérdidas de calor por radiación y convección así como también aumentar la capacidad del colector solar para alcanzar mayor diferencial de temperatura.

### 2.13 Bandejas

Las bandejas están montadas sobre ángulos en L de acero inoxidable ASTM 304 montados en la estructura.



Las bandejas deben soportar la carga generada por el peso de los granos de maíz, cada bandeja ha sido diseñada para soportar el volumen de maíz contenido en 14,4 kg. Se ha escogido planchas de acero inoxidable ASTM 304 tipo malla con soportada por malla de acero inoxidable.

En la Tabla 9 se detalla las características de la bandeja ya sea tipo de material como en peso.

**Tabla 9.** Tabla de características de los componentes de las bandejas

PARTES	CARACTERÍSTICAS	REFERENCIAS
Grano:	Morochillo	
	Peso: 3,0 kg	Cada bandeja
		Nota: el peso establecido del maíz duro - morochillo se lo obtuvo experimentalmente
	Número de Bandejas: 5	
Bandejas	Material: Malla de acero	Norma ASME VII
	Inoxidable ASTM 304	Densidad: 7,93 gr/cm <sup>3</sup> (7,93x10 <sup>-3</sup> kg/cm <sup>3</sup> )
	Dimensiones: 0,90x0,54 m	Peso bandeja = espesor x área x densidad
	Área de la malla: 0,48 m <sup>2</sup>	
	Peso: 2,42 kg	
Perfil de bandeja	Área: 0,02 m <sup>2</sup>	Espesor: 0,002 m
	Dimensiones: 2,88 m	
	Peso: 3,91 kg	Peso: 1,36 kg/m
		Referencia: Catálogo de Dipac
Soportes	Material: Acero Inoxidable de 0,7 doblado	
	Dimensiones: 2x(600x540) mm	
	Peso: 2,04 kg	Densidad: 7,93 gr/cm <sup>3</sup> (7,93x10 <sup>-3</sup> kg/cm <sup>3</sup> )

**Nota:** se observan las áreas y materiales de cada bandeja. **Fuente:** Cevallos & Ulloa (2016)

### Determinación de la carga que soporta la bandeja

Las cargas que se aplican sobre la bandeja  $q$ , son conocidas, por lo tanto que procede a calcular el borde más largo de la bandeja como viga simplemente apoyada con carga uniformemente distribuida. Las unidades de los pesos son en  $kgf$ .

Con las cargas establecidas se procede a calcular el valor de la carga distribuida ( $q$ ).

$$q = \frac{P_{bandeja} + P_{morochillo}}{lb} \quad [\text{Ecuación 39}]$$

$$q = \frac{6,33 \text{ kgf} + 3 \text{ kgf}}{0,9 \text{ m}}$$

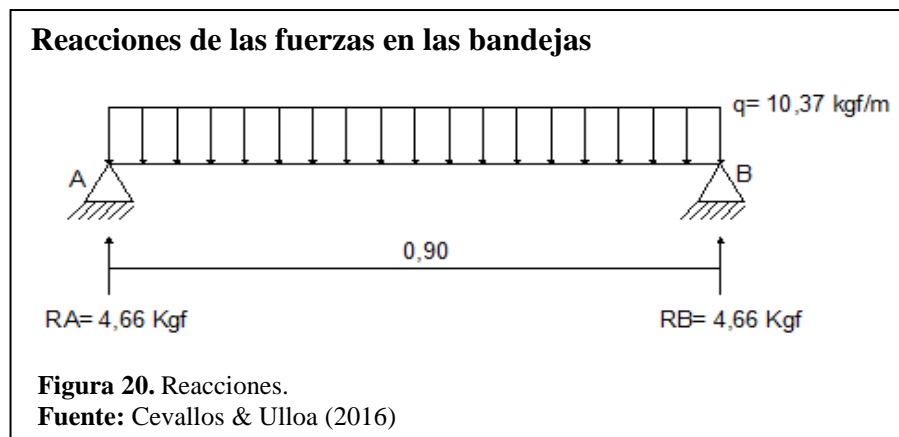
$$q = 10,37 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

Donde:

$q$  = Carga distribuida

$lb$  = Longitud de la bandeja

Para realizar los cálculos de fuerzas y momentos se toma en cuenta la carga distribuida y las reacciones representadas en la Figura 20.



$$(\uparrow^+) \sum F_y = 0$$

$$RA + RB = q \times 0,9$$

$$RA + RB = 9,33 \text{ kgf} \quad [\text{Ecuación 40}]$$

Para encontrar las reacciones se debe realizar sumatoria de momentos en el punto “A”, se lo realiza de la siguiente manera:

$$(\curvearrow^+) \sum M_A = 0$$

$$R_b \times 0,9 \text{ m} - \left( 10,37 \frac{\text{kgf}}{\text{m}} \times \frac{0,9 \text{ m}}{2} \right) \times 0,9 \text{ m} = 0$$

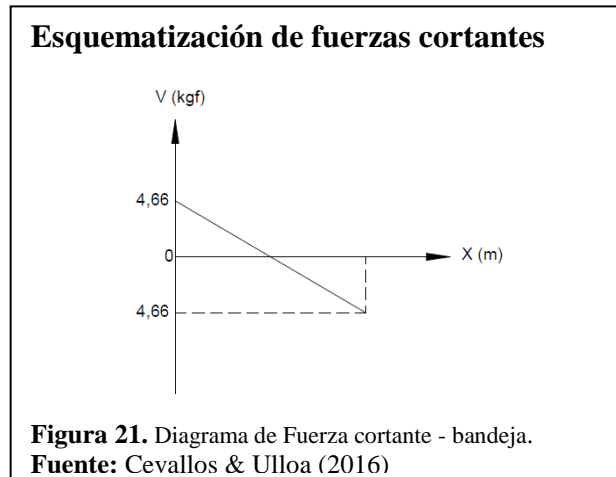
$$4,19 \text{ kgf} \cdot \text{m} = RB \times 0,9 \text{ m}$$

Se despeja RB y se reemplaza el valor en la ecuación 40 para obtener RA.

$$RB = 4,66 \text{ kgf}$$

$$RA = 4,66 \text{ kgf}$$

En la siguiente figura se muestra la fuerza cortante que se ejerce sobre la bandeja.



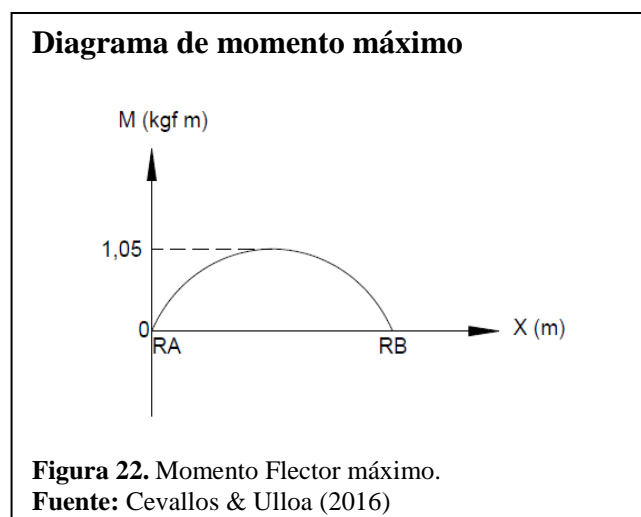
### Momento flector máximo ( $M_f$ )

Para cada sección transversal se manifiestan momentos internos, que reciben el nombre de acuerdo a la dirección de la fuerza. Si la barra se somete a esfuerzos transversales se hablará de momentos flectores.

El momento flector máximo  $M_A$  es igual a la reacción en A.

$$M_f = R_A + \frac{lb}{2} \quad \text{[Ecuación 41]}$$

$$M_f = 1,05 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$



### Módulo Elástico ( $S_{min}$ )

Se denomina módulo de elasticidad a la razón entre el incremento de esfuerzo (esfuerzo máximo) y el cambio correspondiente a la deformación unitaria (esfuerzo admisible). A continuación se determina:

Donde:

$\sigma_{adm} = 1170$  kg Esfuerzo admisible

$$S_{min} = 5,25 \times 10^{-6} \text{ cm}^3$$

### 2.14 Secador

Se detalla la construcción de la estructura, es decir las dimensiones, los tipos de materiales a utilizar, y el tipo de aislante que tendrá el secador.

En la Figura 23 se observa cómo se encuentra construida la estructura base del secador.



En la Tabla 10 se muestra las características dimensionales de la estructura del secador solar.

**Tabla 10.** Características de los componentes del secador

PARTES	CARACTERÍSTICAS	REFERENCIAS
Aislante	Material: Lana de Vidrio	
	Área total: 2,59 m <sup>2</sup>	
	Peso: 2,33 kg	Densidad: 18kg/m <sup>3</sup> Referencia: (KAEFER SOUYET)
Cubierta	Área interna: 2,58 m <sup>2</sup>	Acero Inoxidable
		Espesor 0,4 mm
	Peso: 8,18 kg	
	Área externa: 2,67 m <sup>2</sup>	
Estructura	Material: tubo rectangular	ASTM A36
	40x20x1,5	
	Longitud total: 19,64 m	Catálogo DIPAC
	Peso: 21,41 kg	Peso: 1,09 kg/m
	Material: tubo cuadrado	Catálogo DIPAC
	40x40x1,5	
	Longitud: 6,66 m	
	Peso: 12,13 kg	Peso 1,82 kg/ m
	Material: tubo 20x20x1,5	
	Longitud: 10,76 m	Peso: 0,88 kg/ m
Chimenea	Peso: 9,47 kg	
	Material: Acero Inoxidable	
	ASTM 304	
	Área: 0,15 m <sup>2</sup>	
	Peso: 0,44 kg	Densidad: 7,93 gr/cm <sup>3</sup> (7,93x10 <sup>-3</sup> kg/cm <sup>3</sup> )

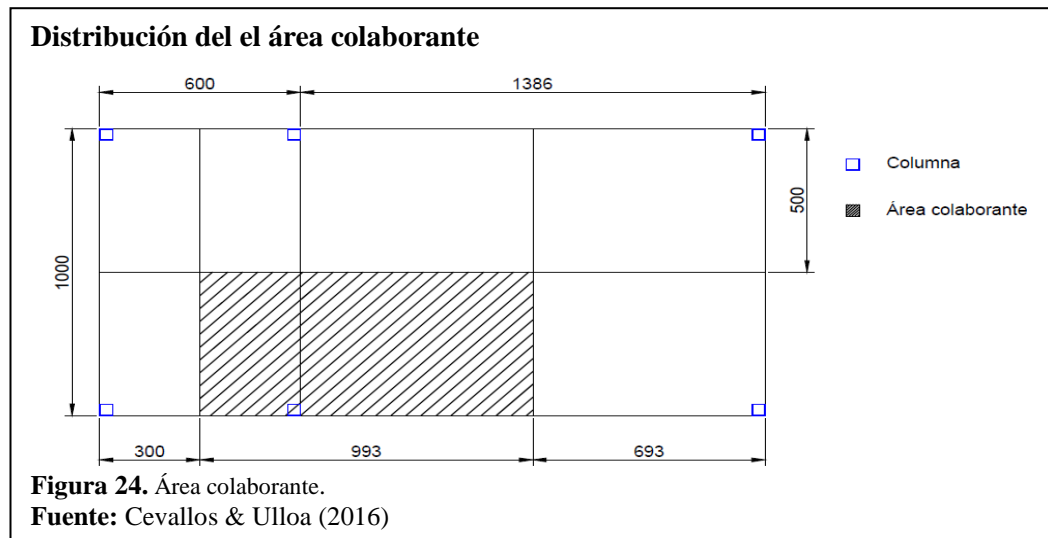
**Nota:** Características del aislante y chimenea del secador solar mixto. **Fuente:** Cevallos & Ulloa (2016)



## Diseño de la estructura del secador

Para determinar el tipo de columna que se utilizará para soportar el maíz duro – morochillo, las bandejas y marcos, se usa el método de diseño de factor de carga de resistencia, (LRFD) por sus siglas en inglés.

En la siguiente figura se muestra marcada el área colaborante que será analizada.



Se debe determinar el área colaborante  $A_{co}$ , que es el área que se encuentra sustentada sobre la columna.

$$A_{co} = 993 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$$

$$A_{co} = 0,496 \text{ m}^2$$

Este método de diseño toma en cuenta cargas de diferentes características a las que denomina por ejemplo: Carga muerta, D, es la carga que permanece constante durante todo el tiempo; Carga viva, L, es la carga que varía o está fluctuando en el tiempo, también aparecen cargas como W que es la del viento, R la de la lluvia, C la de la ceniza, S que representa a la carga de la nieve.

Para este caso en particular la carga viva corresponde a la carga del maíz duro - morochillo aplicada en el área colaborante, de donde:

$$C_{maíz} = 6,17 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

### **Carga Viva (L)**

La carga viva (L), también llamada sobrecargas de uso, que se utilizara en el cálculo depende de la ocupación a la que está destinada la estructura y están conformadas por las bandejas, carga de maíz duro – morochillo.

$$L = C_{co} \times A_{co} \quad \text{[Ecuación 42]}$$

Remplazando

$$L = 3,06 \text{ kgf}$$

Carga muerta (D) constituida por el peso de marco y las bandejas en el área colaborante.

$$P_b = 12,25 \text{ kg} \text{ Peso de las bandejas}$$

### **Carga Muerta (D)**

Las cargas muertas (D) están constituidas por los pesos de todos los elementos estructurales que actúan de forma permanente sobre la estructura. Son elementos tales como: aislante, paredes internas, paredes externas, chimenea, colector solar, vidrio – colector solar directo.

$$D = P_b + P_{secador}$$

$$D = 133,85 \text{ kgf}$$

Para la determinación de la resistencia requerida  $R_u$ , se aplica la principal ecuación del método de diseño, tomando en cuenta que se encuentra restringida a los valores de cargas vivas y muertas.

Como se observa en la siguiente ecuación:

$$R_u = 1,2D + 1,6L \quad \text{[Ecuación 43]}$$

El objetivo del método es el cumplimiento de la siguiente relación:

$$R_u \leq \phi \times R_n \quad \text{[Ecuación 44]}$$

Donde:

$\phi$  = Factor de resistencia sujeción

$R_n$  = Es la resistencia nominal, esta depende de las características geométricas y propiedades del material.

### Sumatoria de cargas (cargas vivas y cargas muertas)

Se aplica la ecuación 44

$$R_u = 165,52 \text{ kgf}$$

$$R_u = 1622,06 \text{ N}$$

### Esbeltez ( $\tau$ )

La esbeltez es de gran importancia en el diseño de estructuras ya que son más propensas a fallas por estabilidad, antes que por resistencia. Se determina por la siguiente expresión.

$$\tau = \frac{k \times L_c}{r \times \pi} \times \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad \text{[Ecuación 45]}$$

Donde:

$k = 2$  Constante de sujeción de la columna

$r$  = Radio de giro

$L_c$  = Longitud de la columna

Remplazando

$$F_y = 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Es la resistencia a la cedencia (acero ASTM A-36)

$$E = 207\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

### Módulo de elasticidad

Columna tipo cuadrado 40 mm x 40 mm y 1,5 mm de espesor

$L_c = 830 \text{ mm}$  Longitud de la columna 830 mm

$es = 1,5 \text{ mm}$

$a_1 = 40 \text{ mm}$

### Radio de giro ( $r$ )

Se define como la distancia desde el eje de giro, columnas de 40 x 40 cm, a un punto donde se puede suponer concentrada toda la masa del cuerpo.

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad \text{[Ecuación 46]}$$

Donde:

$I = \text{Inercia}$

$A = \text{Área de sección}$

Se aplica la ecuación de la inercia para encontrar el área de sección transversal.

$$I = \frac{1}{12}[a_1^4 - (a_1 - 2es)^4] \quad \text{[Ecuación 47]}$$

$$I = 57,15 \times 10^3 \text{ mm}^4$$

$$A = a_1^2 - (a_1 - 2es)^2 \quad \text{[Ecuación 48]}$$

$$A = 231 \text{ mm}^2$$

Donde:

$A = \text{Área de sección transversal de la columna.}$

Se reemplazan los valores de la inercia y del área en la ecuación 47

$$r = 15,73 \text{ mm}$$

Se desarrolla la ecuación 46

$$\tau = 1,14$$

$\tau < 1,5$  Se encuentra en la zona inelástica, por lo que el límite crítico  $F_{cr}$  se lo determina mediante la siguiente ecuación:

$$F_{cr} = 0,658\tau^2 \times F_y \quad [\text{Ecuación 49}]$$

$$F_{cr} = 139,31 \frac{N}{mm^2}$$

Donde:

$F_{cr}$  = Fuerza de límite crítico

### **Resistencia Nominal ( $R_n$ )**

Para obtener la resistencia nominal se debe multiplicar el área de la sección por el límite crítico.

$$R_n = A \times F_{cr} \quad [\text{Ecuación 50}]$$

Reemplazando

$$R_n = 32180,26 N$$

Se cumple con la relación descrita en la ecuación 45, se procede al cálculo del factor de resistencia nominal final ( $R_{nf}$ )

$$R_{nf} = \phi \times R_n$$

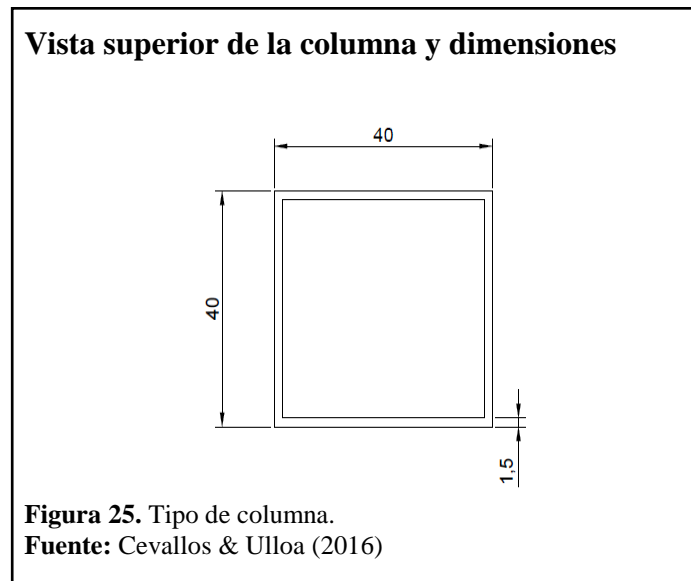
$$R_{nf} = 27353,22 N$$

$$R_{nf} = 2791,14 kgf$$

$\phi = 0,85$  (Factor de resistencia) valor determinado en laboratorio mediante ensayos Maureira Poveda (2006)

$R_{nf} > R_u$  Por tanto la resistencia que puede soportar la columna es superior a la carga mínima requerida.

En la Figura 25 se observa la columna seleccionada la cual va a soportar el secador.



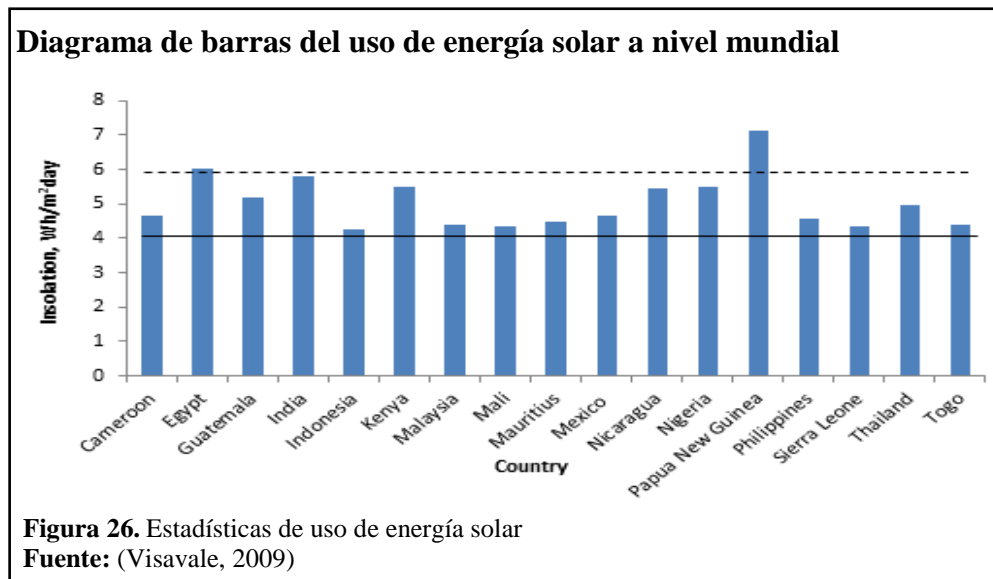
## 2.15 Innovaciones

La energía solar ha sido usada desde tiempos inmemoriales para secar – preservar plantas, hojas, frutos, carne, pescado, madera entre otros. Debido al alto costo del usar petróleo y la reducción de las importaciones muchos países han decidido utilizar energías renovables.

A nivel mundial la capacidad instalada de equipos para calentamiento de agua en el 2005 registró un incremento del 19,5% en referencia al 2004. En Europa se registra un incremento del 44% en la instalación de colectores solares térmicos en referencia a años pasados. Francia es el líder en términos de crecimiento. En ciudades como Barcelona, existen ordenanzas municipales que regulan la incorporación de sistemas de captación y utilización de energía solar.

Europa ha desarrollado la mayoría de las tecnologías de energía renovable, sin embargo China domina el mercado mundial en una relación de siete a uno, donde la mayoría de colectores son de vacío. En América Latina Cuba, México, Brasil Y República Dominicana son los países que han puesto mayor atención al calentamiento de agua por energía solar. (Placco, Saravia, & Cadena, 2006)

En la Figura 26 se muestra las estadísticas de energía solar en el mundo.

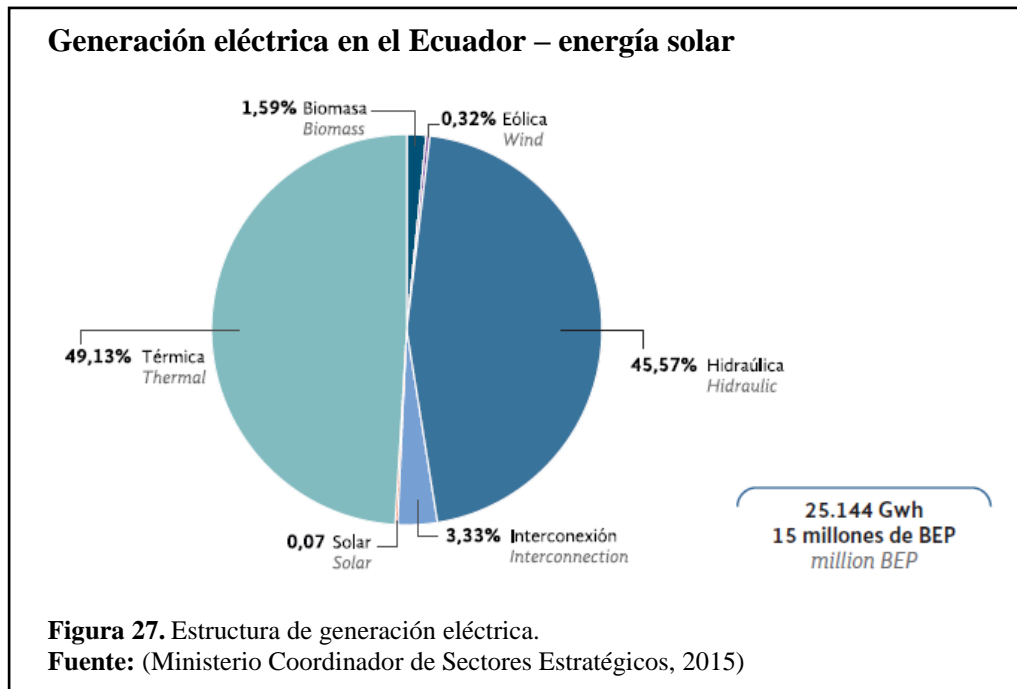


### Recurso solar que posee el Ecuador

Para el aprovechamiento de recursos solares existen dos modos básicos, la tecnología fotovoltaica y la tecnología termosolar. La tecnología fotovoltaica permite la conversión directa de la energía solar en electricidad. La tecnología termosolar se puede aprovechar de dos maneras, para la generación eléctrica y el aprovechamiento directo del calor. En el Ecuador actualmente no se tiene constancia de proyectos de generación eléctrica utilizando este tipo de tecnología.

El Direct Normal Irradiance (DIN), es la cantidad de radiación solar recibida por unidad de área, actualmente el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER), se encuentra elaborando el primer mapa de DNI para el Ecuador, para escoger la mejor tecnología termosolar aplicable, la falta de ésta información es uno de los factores que impide el desarrollo de la tecnología termosolar en el país.

La generación de energía con fuentes renovables no convencionales supera el 1,5% de participación en la matriz eléctrica, debido al aporte de fuentes de biomasa, eólica y solar fotovoltaica. Además, existe la importación de electricidad de 3.3%.



Realizados los cálculos pertinentes se ha llegado a establecer que el calor almacenado por el colector solar es de 1030,35W. De acuerdo a que el secador va a ser instalado en la ciudad de Quito se llega a establecer un ángulo de inclinación de 30°, disminuyendo las pérdidas de la radiación.

Mediante los cálculos detallados en el capítulo se ha llegado a determinar la eficiencia del secador que es de 25%. Se han analizado varias alternativas para los materiales llegando a establecer que usar vidrio transparente de 4 mm, lana de vidrio, tol y tubo son los materiales adecuados para la estructura del secador solar, para el interior de la cámara de secado se usa acero inoxidable debido al contacto que tendrá con los granos de maíz. El uso de la energía solar se ha ido incrementando con el pasar de los años a nivel mundial, se espera que en el Ecuador mediante estudios de radiación solar realizados por entidades estatales.



### **3. Resultados y Análisis Económico**

Al término de la construcción del secador solar se procede a realizar las respectivas pruebas. Para el desarrollo de las pruebas se han establecido 3 condiciones climáticas: día soleado, día parcialmente nublado y día nublado.

Las variables que se emplearán para realizar las pruebas son:

- Peso (kg), es la variable que se considera como unidad de medida con el objetivo de establecer la pérdida de humedad, es decir, al eliminar la humedad contenida en el morochillo se resta peso al grano.
- Temperatura (C), el incremento de la temperatura en el aire se realiza mediante el colector solar, dicha variación es transmitida a los granos donde se extrae la humedad.
- Tiempo (h), para que el proceso de secado se ejecute se requiere de un período de tiempo llamado tiempo de secado.

En el proceso de secado se considera las tres variables anteriormente descritas, a continuación se realiza una pequeña descripción del proceso de secado, resalta la importancia de las tres variables:

Para iniciar el proceso de secado se realiza una medición de peso de grano el cual se nota como cantidad inicial, la temperatura captada en el secador solar con el paso del tiempo incrementa la temperatura del aire que por diferencia en su densidad pasa al secador extrayendo la humedad de los granos. Se puede asegurar que a mayor temperatura menor será el tiempo de secado y mayor será la humedad extraída reflejándose en la disminución en el peso el cual se nota como cantidad final.

El valor de humedad más aceptado para el almacenamiento del grano se sitúa entre 13 y 15.5 %, durante las pruebas de secado se busca llegar a esta condición de porcentaje de humedad, la humedad inicial es de 26,6%.

De acuerdo con León & Barrera (2003), para encontrar la fluctuación de la temperatura en los periodos del año se emplea la ecuación:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot \cos CX + b_1 \cdot \text{sen } CX + a_2 \cdot \cos 2CX + b_2 \cdot \text{sen } 2CX + a_3 \cdot \cos 3CX + b_3 \cdot \text{sen } 3CX$$

Para esta ecuación se toma la curva de Fourier (1978).

Donde

X = Tiempo expresado en unidades.

C = Constante igual a  $360^\circ$  dividido por el número de unidades dentro del ciclo, el ciclo está compuesto de 12.

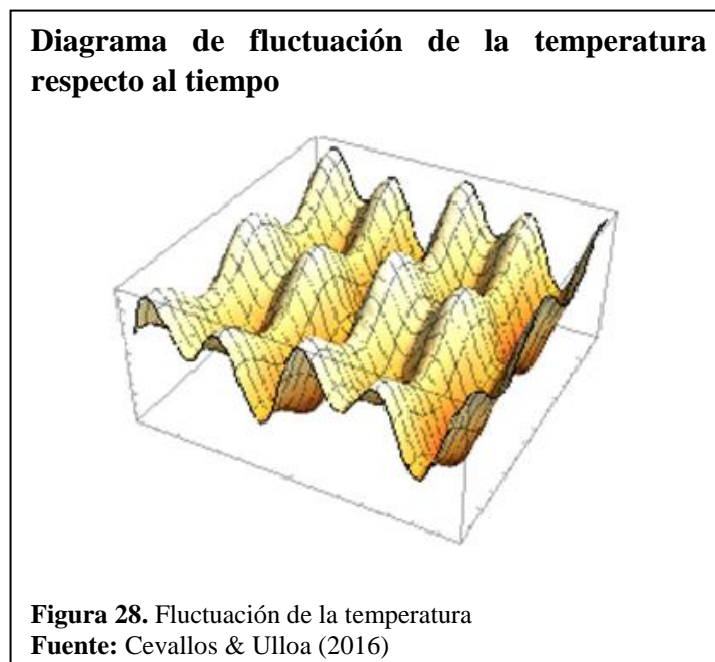
La curva es polinomial, por lo tanto permite la obtención de los parámetros necesarios para describir la curva.

Donde:

a = Es el intercepto

b = La pendiente

En la Figura 28 se observa como es el comportamiento de las ondas de calor.



### 3.1 Pruebas en días nublados

El secador solar cuenta con 5 bandejas en la cámara de secado, en promedio la sumatoria de carga total es de 15 kg aproximadamente.

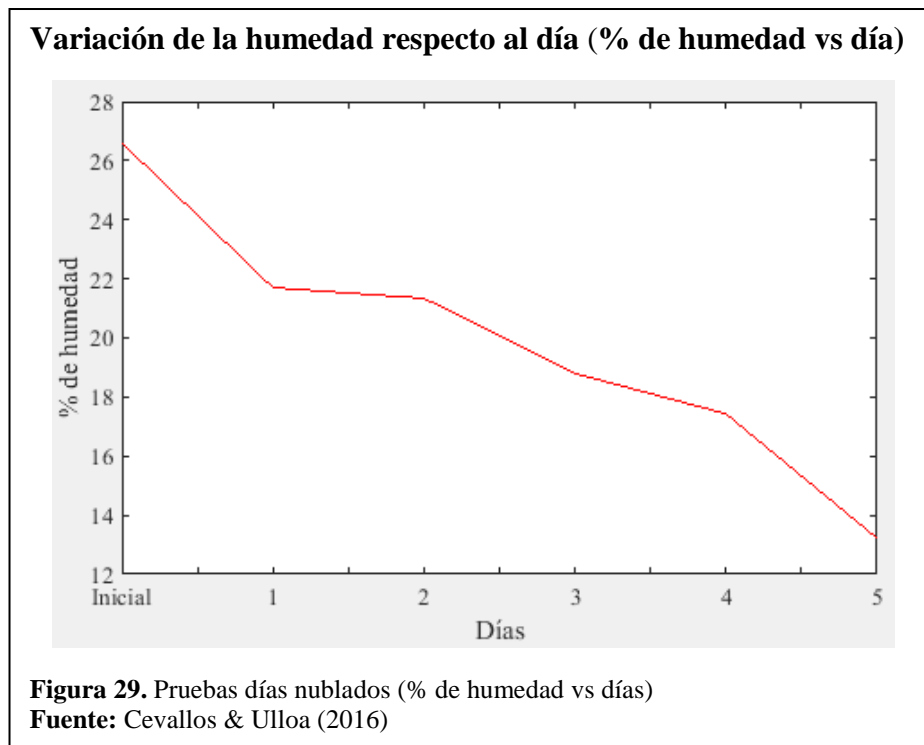
**Tabla 11.** Pruebas días nublados – Peso/Porcentaje de humedad absorbida del grano.

Día	Cantidad Inicial (kg)	Cantidad Final (kg)	Tiempo (Horas)	Reducción de Peso (%)	% Humedad del grano
1	15,04	12,23	7	18,68	21,70
2	12,23	9,78	7	20,03	21,34
3	9,78	6,89	7	29,55	18,80
4	6,89	4,50	7	34,69	17,43
5	4,50	2,23	7	50,44	13,22

**Nota:** Pruebas de días nublados, se observa el % de humedad perdido.

**Fuente:** Cevallos & Ulloa (2016)

En días parcialmente nublados se observa un secado no regular ya que la radiación solar fluctúa y por ende la temperatura tiene variaciones.



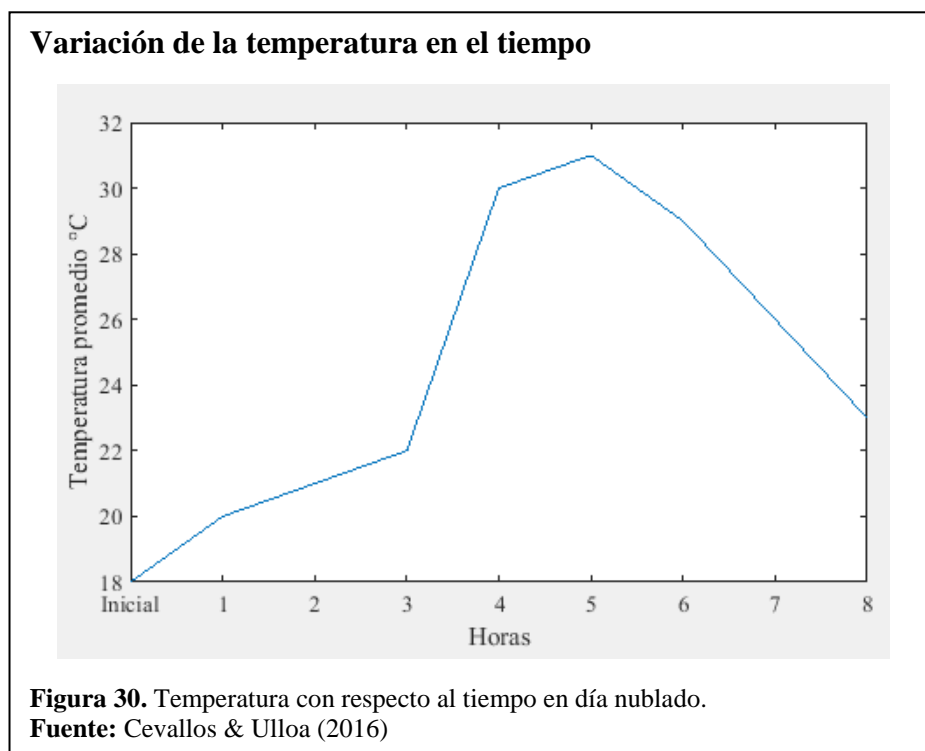
En la Tabla 12 se muestra las temperaturas promedio recopiladas en 5 días de pruebas, estableciendo las temperaturas para un día nublado.

**Tabla 12.** Temperaturas respecto al tiempo nublado

Hora	Temperatura °C Promedio
8 a 9	18
9 a 10	20
10 a 11	20
11 a 12	19
12 a 13	30
13 a 14	30
14 a 15	28
15 a 16	28
16 a 17	25

**Nota:** Temperaturas promedio respecto al día nublado. **Fuente:** Cevallos & Ulloa (2016)

En la figura siguiente se observa la distribución de la temperatura respecto al tiempo.



### 3.2 Pruebas en días parcialmente nublados

En la Tabla 13 se observa que para días parcialmente nublados se necesita la cantidad de 3 días para el secado del grano.

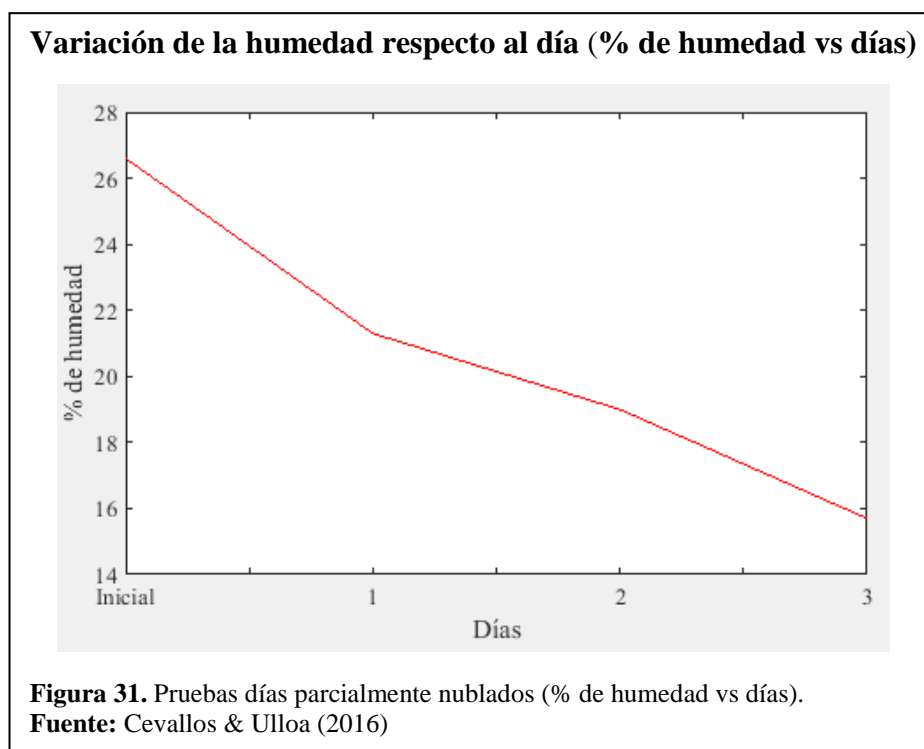
**Tabla 13.** Pruebas de días parcialmente nublados – Peso/Porcentaje de humedad absorbida del grano.

Día	Cantidad Inicial (kg)	Cantidad Final (kg)	Tiempo (horas)	Reducción de Peso (%)	% Humedad grano
1	15,00	12,00	7	20,00	21,3
2	12,00	8,525	7	28,96	19,0
3	8,525	5,025	7	41,06	15,7

**Nota:** Pruebas de días parcialmente nublados, se observa el % de eliminación de humedad.

**Fuente:** Cevallos & Ulloa (2016)

En las pruebas que se realizaron en días soleados se observa una disminución considerable de humedad respecto al tiempo, en ésta prueba se necesitó de 3 días para que el grano alcance la humedad esperada. En el Figura 31 para días parcialmente nublados, se observa de como desciende la humedad con respecto a los días.



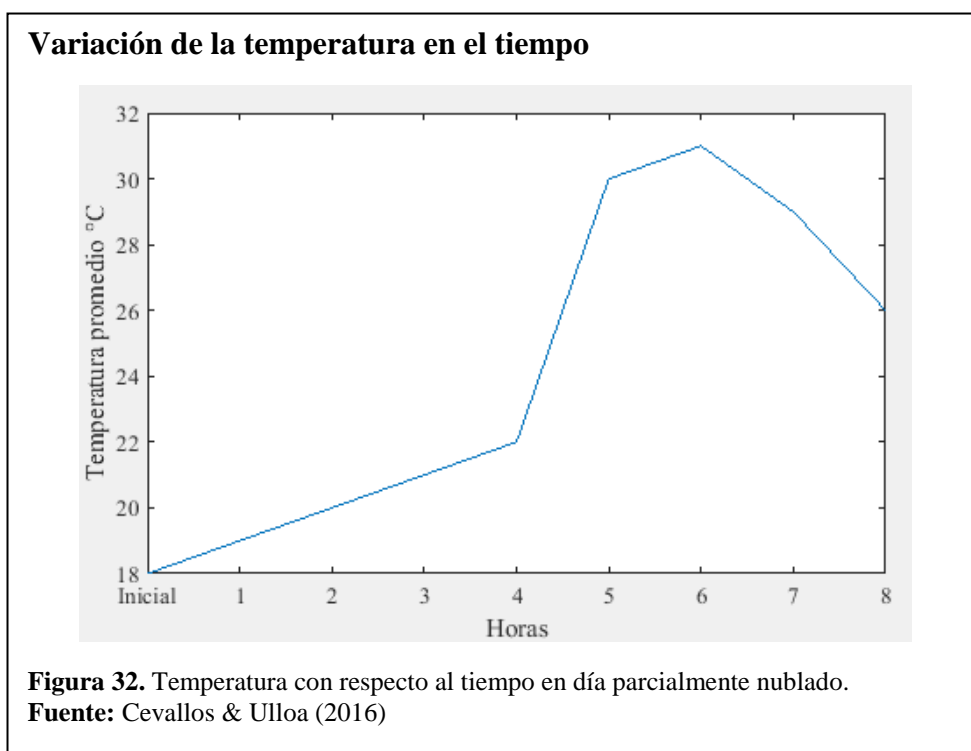
En la Tabla 14 se observa la temperatura promedio que se obtiene en días parcialmente nublados.

**Tabla 14.** Temperaturas respecto al tiempo

Hora	Temperatura
	°C Promedio
8 a 9	19
9 a 10	20
10 a 11	21
11 a 12	22
12 a 13	30
13 a 14	31
14 a 15	29
15 a 16	26
16 a 17	23

**Nota:** Temperatura promedio en días parcialmente nublados. **Fuente:** Cevallos & Ulloa (2016)

En el siguiente diagrama se puede observar la variación de las temperaturas de acuerdo al transcurso de los días. Teniendo el mayor pico de temperatura al medio día, entre las 12 y 13 horas.



### 3.3 Pruebas en días soleados

Se observa en la Tabla 15, que es necesario 2 días para que el secado llegue a la humedad de almacenamiento, en días con abundante radiación solar.

**Tabla 15.** Pruebas día soleado – Peso/Porcentaje de humedad absorbida del grano.

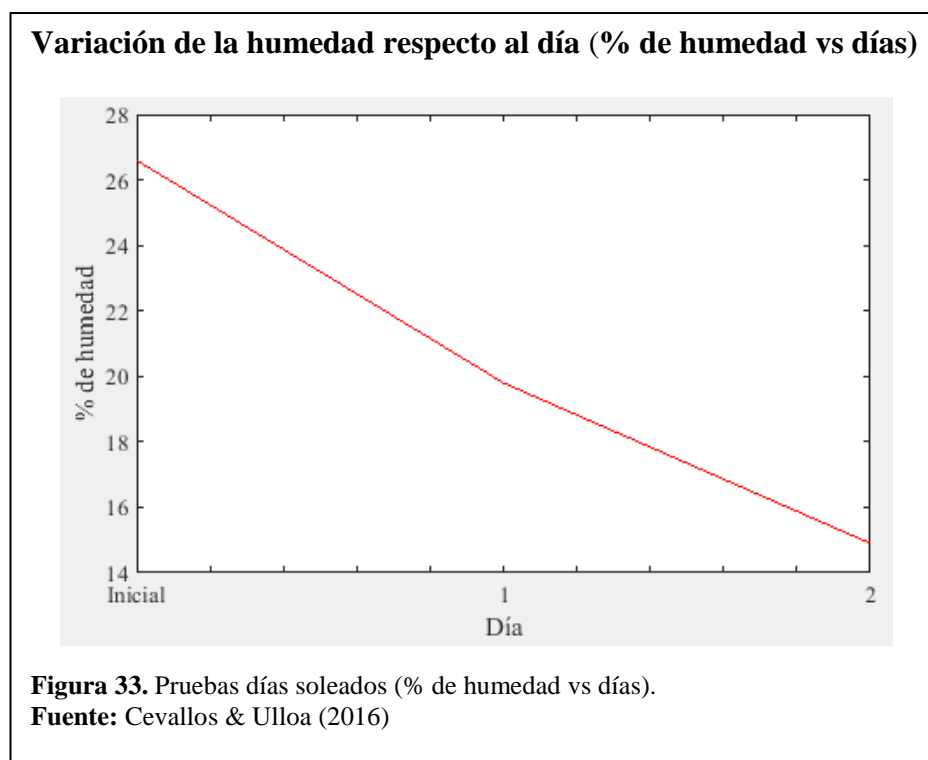
Día	Cantidad Inicial (kg)	Cantidad Final (kg)	Tiempo (horas)	Reducción de Peso (%)	% Humedad grano
1	15	11,13	7	25,80	19,8
2	11,13	6,225	7	44,07	14,9

**Nota:** Pruebas de días soleados, se observa el % de eliminación de humedad.

**Fuente:** Cevallos & Ulloa (2016)

Para el secado óptimo de los granos es necesario 2 días en un tiempo soleado, en la Figura 32 se puede observar como es el decrecimiento de la humedad con respecto a los días.

En el Figura 33 para días soleados, se observa que la humedad desciende de forma rápida (vs) la Figura 29 la que es de días nublados.



Las pruebas realizadas se efectuaron en dos días, en el día 1 se tomaron lecturas de la temperatura cada hora de trabajo, la temperatura fue medida en el interior de la cámara de secado, en el día 2 se tomaron únicamente 2 mediciones de temperatura, al inicio y al final del secado.

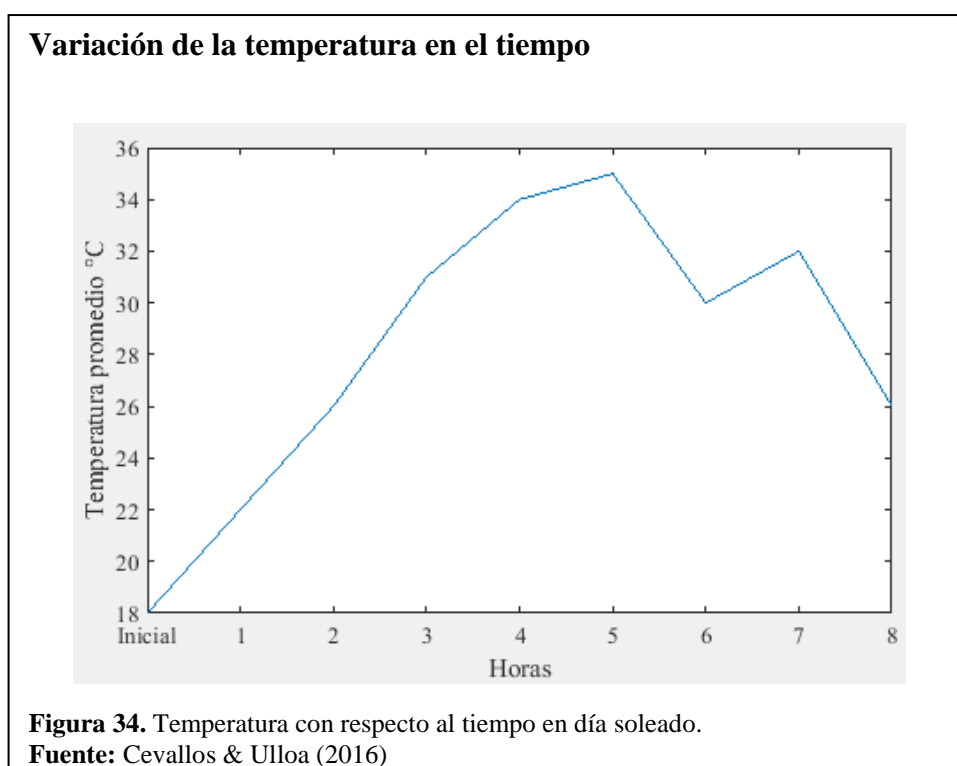
**Tabla 16.** Temperaturas respecto al tiempo

Hora	Temperatura °C Promedio
8 a 9	22
9 a 10	26
10 a 11	31
11 a 12	34
12 a 13	35
13 a 14	30
14 a 15	32
15 a 16	26

**Nota:** Temperatura promedio en días soleados.

**Fuente:** Cevallos & Ulloa (2016)

En la Tabla 16 se muestra el promedio de temperaturas, su variación se puede observar en la Figura 34.





De las pruebas realizadas se puede concluir, que el secador solar tiene una mayor eficiencia en días soleados que en días nublados, esto se observa en el tiempo de secado, el proceso de secado en días soleados toma 2 días llegar a la humedad deseada, mientras que en días nublados el tiempo de secado es mayor 5 días, debido a la que radiación solar es fluctuante y existe variación de temperaturas. En días parcialmente nublados se tiene un rango intermedio entre días soleados y nublados, obteniendo así el proceso de secado en 3 días.

### 3.4 Análisis Económico

En el presente capítulo se muestran los materiales y costos involucrados en la construcción del secador solar térmico. Los cuales se detallan en tres secciones: materiales, accesorios y servicios.

Costos Directos, son aquellos que se consideran como materia prima, directamente asociados en la producción, su identificación es directa.

Costos Indirectos, son aquellos que no son fácilmente identificables, van asociados de forma indirecta con la fabricación de los bienes.

#### 3.4.1 Materiales

En la siguiente tabla se detallan los costos directos e indirectos para la construcción del secador.

**Tabla 17.** Costos Directos e Indirectos involucrados en el secador solar

MATERIAL	CANT	PRECIO UNITARIO	TOTAL USD
Costos Directos	1	750,78	750,78
Costos Indirectos	1	198,58	198,58
Mano de Obra	1	672,00	672,00
		<b>TOTAL</b>	<b>1621,36</b>

**Nota:** Detalle de costos directos e indirectos y la mano de obra. **Fuente:** Cevallos & Ulloa (2016)

En la Tabla 18 se observa los tipos de materiales y sus costos para la construcción del secador solar de granos.

**Tabla 18.** Costos de materiales

MATERIAL	CANT	PRECIO UNITARIO	TOTAL USD
Tubo Cuadrado 40x40x1,5mm	1,5	1,545	2,3175
Tool, servicio de TRASADO 1/32 plg Y ACERO inoxidable	1	126,79	126,79
Tubo CUADRADO 40x40x1,5 mm	1	8,27	8,27
Tubo RECTANGULAR 20x40x1,5 mm	3	6,64	19,92
Tubo RECTANGULAR 20x40x1,5 mm	1	6,64	6,64
REMACHE 1/8 x 1/2 plg - CIENTO	3	0,54	1,62
Tool 1/32 plg y Acero 0,5	1	26,79	26,79
Lana de vidrio s/Recubrimiento	8	2,25	18
REMACHE 1/8 x 1/2 plg - CIENTO	100	0,01	1
Malla de Acero Inoxidable Mesh 4	3	89,29	267,87
Vidrio Blanco 4 mm x 3	1	21,12	21,12
Tubo cuadrado de 20x20x1,5 mm	1	5	5
Duratecho	1	15	15
Plancha de acero Inox. 2 mm	1	150	150
		Subtotal	670,34
		IVA 12 %	80,44
		<b>TOTAL</b>	<b>750,78</b>

**Nota:** Se muestra los costos de los materiales que se utilizaron para la construcción.  
**Fuente:** Cevallos & Ulloa (2016)

### 3.4.2 Costos de servicios

En los servicios se detallan, procesos especializados necesarios para la construcción del secador solar.

**Tabla 19.** Costos de servicios

MATERIAL	CANT	PRECIO UNITARIO	TOTAL USD
Corte acero Inoxidable	20	0,47	9,40
Dobles acero Inoxidable	20	0,38	7,60
Dobles acero Inoxidable	4	0,34	1,36
Suelda Inox	1	30,00	30,00
Transporte	1	65,00	65,00
Mano de Obra Construcción	1	600,00	600,00
		Subtotal	713,36
		IVA 12 %	85,60
		<b>TOTAL</b>	<b>798,96</b>

**Nota:** Se observa los costos de los servicios para la construcción del secador solar.  
**Fuente:** Cevallos & Ulloa (2016)

### 3.4.3 Accesorios

Se define a los accesorios como elementos complementarios a los materiales, necesarios para ensamblar, hermetizar y proteger de la corrosión generada por el medio ambiente.

Los costos de los accesorios se detallan en la Tabla 20, estos son los que no se puede construir ya que son estandarizados.

**Tabla 20.** Costos de accesorios

MATERIAL	CANT	PRECIO UNITARIO	TOTAL USD
Broca hierro 1/8 plg	3	0,62	1,86
Cemento de contacto Africano	2	1,75	3,50
SUELDA ESAB 6011	1	2,58	2,58
Bisagra	1	1,34	1,34
Picaporte 1/2 luna vera Niquelado	1	1,25	1,25
Tiradera p22217-96 mm AB	1	0,98	0,98
Pintura Autoglare Negro	2	6,25	12,50
Pintua Fondo Uniprimier verde	1	7,14	7,14
Silicon	1	3,80	3,80
Pintura Autoglare Negro Mate	1	3,00	3,00
caucho	1	2,00	2,00
Silicón	1	4,00	4,00
50 Kg morochillo	1	20,00	20,00
		Subtotal	63,95
		IVA 12 %	7,67
		<b>TOTAL</b>	<b>71,62</b>

**Nota:** Se detallan los costos se utilizaron para los acabados del secador solar mixto.  
**Fuente:** Cevallos & Ulloa (2016)

Se puede concluir que el costo representativo en la construcción del secador solar son los materiales en acero inoxidable, necesario para el interior ya que permiten el manejo de productos alimenticios.

Los costos detallados ayudarán a tener una visión objetiva y clara en caso de requerir la construcción de un secador solar de mayores dimensiones.

### 3.4.4 Conclusiones

- Actualmente en el mundo se encuentra en crecimiento la tecnología y el uso de fuentes renovables de energías, para el calentamiento de agua, conservación de alimentos, generación de energía eléctrica entre otras aplicaciones. Las aplicaciones para calentamiento de agua son las que abarcan un mayor número, seguido de tecnologías para la conservación de alimentos, como es el presente caso.
- El prototipo de secador solar se ha diseñado empleando dos paneles solares térmicos, siendo así un secador solar mixto, compuesto por un colector solar indirecto, una cámara de secado que en su parte superior incorpora una panel solar directo, se ha realizado pruebas con diferentes climas de días nublados a días soleados, teniendo diferentes períodos de secado, siendo el día soleado el de mayor eficiencia. La cámara de secado en su interior se encuentra construida en acero inoxidable, apto para secado de productos de consumo humano, obteniendo de esta forma un secador multiuso.
- Se ha realizado un estudio de los materiales adecuados para la construcción de secador solar, siendo sus componentes principales el colector solar construido de una placa de tol pintado en color negro mate que favorece la captación y retención de la energía solar, la parte interior que está en contacto con los granos a secar se han fabricado en acero inoxidable evitando así la contaminación de los granos o alimentos.
- En los ensayos realizados en el secador se han considerado tres variables, el peso del morochillo, la temperatura y el tiempo de secado. Las pruebas se realizaron en varios días con diferentes condiciones climáticas, días nublados, días parcialmente nublados y días soleados, obteniendo mejores resultados en

días soleados con tiempos de secado cortos un día y medio. En condiciones de días parcialmente nublados el tiempo de secado se incrementa a 3 días y menos eficiente con 5 días de secado en los días nublados.

- El prototipo de secador solar construido de acuerdo a las necesidades mostradas por la empresa Agrocometxport S. A., es de dimensiones de 1986 x 1000 x 1635 mm, el prototipo tiene una capacidad de carga de 15 kg distribuida en 5 bandejas.
- La eficiencia obtenida en el secado es de 21% en días soleados, mientras que en días nublados y parcialmente nublados la eficiencia es de 18% aproximadamente, estas eficiencias se pueden corroborar con las pruebas del contenido de humedad del grano realizadas en por una institución altamente reconocida en la ciudad de Quito, en días soleados se obtiene una humedad en el grano de 14% en dos días de secado, porcentaje de humedad recomendado para el almacenamiento.

### **3.4.5 Recomendaciones**

- El secador, no solo puede ser empleado para maíz duro, también para frutas y hortalizas, ya que las bandejas y el interior del secador es construido en acero inoxidable. El cual no prolifera ningún tipo de bacterias.
- Dependiendo al lugar donde se realice la instalación del secador puede requerirse instalar un seguidor solar llamado heliostato esto para que el secador sea más eficiente.
- Para que el secador sea de mayor eficiencia se debe ubicar en un lugar con mayor recepción de radiación solar.

- Los paneles solares termodinámicos aprovechan de mejor forma la radiación solar, para incrementar la eficiencia del secador solar se puede implementar un panel solar termodinámico, teniendo en consideración su elevado costo.
- El uso de extractores puede generar un incremento en la circulación del aire, incrementando el desempeño del secador.

## Lista de referencias

- Agosto, J. (2005). SECADO SOLAR Y CONVENCIONAL DE LA GUADUA ANGUSTIFOLIA.
- Alonso, C. B. (2013). Paneles Solares Termodinámicos. *UNAUS*.
- Aucancela Guacho, C., & Chavez Cordova, E. (2009). *DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SECADORE DE TUNEL PARA LA DESHIDRATAACION DEL MAIZ*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- AUGUSTO, J. (2005). SECADO SOLAR Y CONVENCIONAL DE LA GUADUA ANGUSTIFOLIA.
- Benavides, E. (2006). *Diseño y construcción de una cocina solar experimental de tipo cilíndrico parabólico con aplicación al sector rural marginal*. Sangolquí.
- Bergues, C. (2008). GENERALIZACIÓN DE SECADORES SOLARES DIRECTOS EN CUBA. *DELOS - Revista Desarrollo Local Sostenible*, 1.
- Bermúdez, A. C. (ABRIL, 2013). Paneles Solares Termodinámicos. *UNAUS*.
- Bilbao, P. D. (2012). FÍSICA DE LA ATMÓSFERA. *Universidad de Valladolid. Facultad de Ciencias. Departamento Física Aplicada*, 15, 24.
- Blanco Cano, L., Soria Verdugo, A., Gracia Gutiérrez, L. M., & Ruiz Rivas, U. (2013). Modelling and Design of Indirect Solar Dryers for Batch Drying. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'13)*, 1.
- Caselles, V., Coll, C., Rubio, E., Valor, E., & Sospedra, F. (1999). MEDIDA DE LA TEMPERATURA Y LA EMISIVIDAD CON DATOS MULTIESPECTRALES DEL SENSOR DAIS. *Departament de Termodinámica*, 343-346.
- Cedeño, H. (2012). La energía renovable en el ecuador. *ALTERNATIVAS*.
- Cengel, Y., & Boles, M. (2012). *Termodinámica*. México D.F.: MC Granw Hill.
- CENTRO PARA EL DESARROLLO AGROPECUARIO Y FORESTAL, INC. (1998). CULTIVO DE MAIZ. *FUNDACION DE DESARROLLO AGROPECUARIO, INC*, 8,9.
- Centro Tecnológico Nacional de la Conserva y Alimentación. (2013). SECADOR SOLAR. *AGRO WASTE*, 7.
- Cerón, E., & Guerrero , O. (2015). *DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA SECADORA HIBRIDA DE ALIMENTO EN HOJUELAS PARA PECES DE ACUARIO, QUE OPERE CON ENERGIA SOLAR Y ELECTRICA*. Quito: EPN.
- Cerón, R. (2011). Operaciones unitarias I. *Universidad Autónoma del Carmen*.
- Ching Lik Hii, S. V. (2012). Fundamentals, Applications and Innovations. *Solar Drying*, 14.
- CONELEC. (2008). ATLAS SOLAR DEL ECUADOR.
- Corporacion para la Investigación Energética. (2008). *Atlas Solar del Ecuador*. Quito.
- Corporación para la Investigación Energética. (2008). *Atlas Solar del Ecuador*. Quito.
- Corvalan. (1996). *Ingenieria del Swcado solar*. Lima.

- Del Pozo, D. (1983). *LAS CONDICIONES AMBIENTALES*. España: Dialnet.
- Duffie, J., & Beckman, W. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*. New Jersey: Jhon Wley.
- Duffie, J., & Beckman, W. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. New Jersey: Jhon Wiley.
- Escamilla, J. C. (2009). Construcción de un secador solar de frutas y verduras: una experiencia ciudadana. En J. C. Escamilla, *Construcción de un secador solar de frutas y verduras: una experiencia ciudadana*.
- Esther. (14 de mayo de 2015). *El blog verde*. Obtenido de <http://elblogverde.com/tipos-de-paneles-solares/>
- Extralum vidrio y aluminio. (28 de Octubre de 2010). *Peso aproximado de Vidrio Plano Arquitectónico*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/61396688/Peso-Del-Vidrio>
- FAO - Food and agriculture organization. (1993). *El maíz en la nutrición humana*. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/x5051s/x5051s03.htm>
- Fito Maupoey, P., Andrés Grau, A. M., Albors Sorolla, A. M., & Barat Baviera, J. M. (2001). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Flores Nicolalde, R. C. (2015). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE DESTILADOR DE AGUA, UTILIZANDO ENERGÍA SOLAR*. Quito: Universidad Politécnica Salesiana.
- García Gallegos, J. C. (24 de Julio de 2013). La nixtamalización del maíz. Mexico: Fondo de Cultura Económica.
- Gilbes, F. (15 de OCTUBRE de 2011). *MÉTODO CIENTÍFICO*. Obtenido de [http://gers.uprm.edu/pdfs/metodo\\_cientifico.pdf](http://gers.uprm.edu/pdfs/metodo_cientifico.pdf)
- GONZALEZ, A. G. (18 de 07 de 2012). *ESPE*. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5592/1/T-ESPE-033789.pdf>
- Grande Tovar, C. D., & Orozco Colonia, B. S. (2013). Producción y procesamiento del maíz en Colombia. *Revista Científica Guillermo de Ockham*, 97-110.
- Hernández, A., Fernández, C., Salvo, M., & Suligoy, H. (2007). Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional. *INECO*, 02-48. 02-49.
- INAMHI. (2014). *INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA*. Quito: INAMHI.
- Incropera, F. (1999). *Funamentos de transferencia de calor*. México.
- KAEFER SOUYET. (s.f.). *Aislantes Térmicos y Absorbentes Acústicos Incombustibles*. Obtenido de <http://www.kaefer.cl/uploads/pdf/lanavidrio.pdf>
- Lema Carrera, M. (2015). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE PURIFICACIÓN DE AGUA POR MEDIO DE ENERGÍA, REFLEXIÓN SOLAR, Y LUZ ULTRAVIOLETA*. Quito: Universidad Politécnica Nacional.



- León Valverde, C. U., & Barrera, V. H. (2003). *Métodos dio-matemáticos para el análisis de sistemas agropecuarios en el Ecuador*. Quito: INIAP.
- López, I. M. (1996). Cartas Psicrométricas. *Escuela Politécnica Nacional*, 27.
- Maureira Poveda, J. P. (2006). *DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SECADOR DE GRANOS DE CACAO CON COLECTORES SOLARES PLANOS MEDIANTE CONVECCIÓN FORZADA PARA UNA CAPACIDAD DE 500 Kg*. Quito: ESPE.
- Maureira Poveda, J. P. (2006). *DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SECADOR DE GRANOS DE CACAO CON COLECTORES SOLARES PLANOS MEDIANTE CONVECCIÓN FORZADA PARA UNA CAPACIDAD DE 500 Kg*. Sangolquí: ESPE.
- Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos. (2015). *Balance Energético Nacional*. Quito: [www.sectoresestrategicos.gob.ec](http://www.sectoresestrategicos.gob.ec).
- Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca. (2013). Maíz duro seco. *Boletín Situacional*, 2.
- Montgomery, R. (1994). *ENERGÍA SOLAR* (3ra ed.). Mexico: LIMUSA.
- Moreno, G. (2000). MANUAL DE CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UNA SECADORA SOLAR. *Seminario de Proyectos II*, 6 -7.
- Mujumdar, A. (2006). *Handbook of Industrial Drying*. Florida: CRC PRESS.
- NORMA INEN. (1995). *GRANOS Y CEREALES MAÍZ EN GRANO REQUISITOS*. Quito: INEN.
- Novoa, W. (2010). *DISEÑO DE DOS SISTEMAS DE SECADO DE MAÍZ PARA EL SECTOR AGRICOLA DEL CANTON VENTANAS PROVINCIA DE LOS RIOS*. Quito: Universidad Politécnica Nacional.
- Nuri, & Moshein, N. (1980). *Thermal propieties of food and agricultural materials*. London.
- Pérez, Á. (11 de 30 de 2001). *Termodinamic SYSTEM*. Obtenido de <http://www.thermodynamicsystems.us/website/index.php/es/noticias-2/138-termodinamica-vs-termica>
- Placco, C., Saravia, L., & Cadena, C. (2006). COLECTORES SOLARES PARA AGUA CALIENTE. *INENCO, UNSa –CONICET*, 7 - 13.
- Quitiaquez, W. (2015). *Diagnóstico Energético Destilador Solar*. Quito: Universidad Técnica Cotopaxi.
- Salcedo, E. S. (2006). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA COCINA SOLAR EXPERIMENTAL, DE TIPO CILÍNDRICO PARABÓLICO CON APLICACIÓN AL SECTOR RURAL MARGINAL*. Sangolquí: UNIVERSIDAD POLITECNICA DEL EJERCITO.
- Santaella, F. G. (15 de Octubre de 2011). *Recinto Universitario de Mayagüez*. Obtenido de Recinto Universitario de Mayagüez: [http://gers.uprm.edu/pdfs/metodo\\_cientifico.pdf](http://gers.uprm.edu/pdfs/metodo_cientifico.pdf)
- Strumillo, C., & Kudra, T. (1986). *DRYING PRINCIPLES APPLICATIONS AND DESIGN*. Switzerland: Montreux.
- Tibaquirá, J. (2003). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN QUEMADOR EXPERIMENTAL DE ACPM DE ALTA*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

- Tovar, C. D. (12 de 12 de 2012). *USBCALI*. Obtenido de [http://investigaciones.usbcali.edu.co/ockham/images/volumenes/Volumen11N1/Guilermo11-1\\_c7.pdf](http://investigaciones.usbcali.edu.co/ockham/images/volumenes/Volumen11N1/Guilermo11-1_c7.pdf)
- Urresta Suárez, E. F. (2013). *DISEÑO, CONSTRUCCION Y SIMULACION DE UN DESTILADOR SOLAR TERMICO MODULAR DE AGUA DE MAR PARA EL LABORATORIO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS Y EFICIENCIA ENERGÉTICA, CON UNA CAPACIDAD DIARIA PROMEDIO DE 4 LITROS*. Quito: Escuela Politecnica Nacional.
- V. Cardozo, F. F. (2005). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CALENTADOR SOLAR DIDÁCTICO. *REVISTA COLOMBIANA DE FÍSICA*, VOL. 37, No. 2. 2005, 3.
- Visavale, G. (2009). *Design and Characteristics of Industrial Drying Systems*. Mumbai, India: Institute of Chemical Technology.

## ANEXO 1

Valores constantes y valores asignados como datos.

CONSTANTE	DESCRIPCIÓN	VALOR	REFERENCIA
Ta	Temperatura ambiente	293 K	INAMHI
Tc	Temperatura grano	315 K	
v	Velocidad del viento promedio	$2,5 \frac{m}{s}$	INAMHI
X1	Espesor de la plancha duratecho o Galvalume	0,003 m	(Hueza & Morán, 2012, pág. 65)
X2	Espesor de la plancha de lana de vidrio	0,05 m	(Hueza & Morán, 2012, pág. 65)
X3	Espesor de la plancha de hierro tol negro	0,007 m	(Hueza & Morán, 2012, pág. 65)
K1	Coefficiente de conductividad térmica de duratecho	$168 \frac{W}{m.K}$	(Incropera & Dewitt, 1999, pág. 828)
K2	Coefficiente de conductividad térmica de lana de vidrio	$0,049 \frac{W}{m.K}$	(Incropera & Dewitt, 1999, pág. 827)
K3	Coefficiente de conductividad térmica de hierro	$51,9 \frac{W}{m.K}$	(Incropera & Dewitt, 1999, pág. 827)

CONSTANTE	DESCRIPCIÓN	VALOR	REFERENCIA
$\epsilon_g$	Emisividad del vidrio	0,8	(TESTO ARGENTINA, 2010)
$\epsilon_c$	Emisividad del grano	0,98	(Caselles, Coll, Rubio, Valor, & Sospedra, 1999)
$C_{pd}$	Calor específico del duratecho	$389 \frac{J}{kg.K}$	(Incropera & Dewitt, 1999, pág. 828)
$C_{pc}$	Calor específico del grano	$0,1020 \frac{kJ}{kg.K}$	(Nuri & Moshein, 1980, pág. 300)
$X'$	Fracción de agua a evaporar del maíz	28 %	Norma INEN 0187 (1995)
$\lambda_0$	Calor latente	$2407,99 \frac{kJ}{kg}$	(Del Pozo, 1983)
$\sigma$	Constante de Stefan Boltzmann	$5.6697 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \times K^4}$	(Incropera, 1999)
$G_{sc}$	Constante solar	$1367 \frac{W}{m^2}$	(CONELEC, 2008)

## ANEXO 2

### FICHA TÉCNICA

El secador mixto se compone de dos partes; Colector solar y Cámara de secado.

El ingreso del aire es por convección natural, esto quiere decir que ingresa el aire por la parte inferior del colector y al calentarse el aire sube hasta la cámara de secado, este atraviesa el producto hasta salir por la parte superior.

Las bandejas pueden ser construidas en madera con una malla de plástico o metal inoxidable y se disponen dentro de la cámara de secado en dos o más niveles superpuestos.

El secador posee una puerta ubicada en la parte posterior para la carga y descarga de bandejas y productos.

**APLICACIÓN:** Semillas, Frutas y hortalizas.

---

<b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS:</b>	
<b>Dimensiones del secador:</b>	<b>Latitud:</b> 21' 57'' sur
<b>Colector Solar</b>	<b>Longitud:</b> 33' 18'' oeste
- <b>Ancho:</b> 1 m	<b>Altitud:</b> 2850 msnm
- <b>Longitud:</b> 1.98 m	<b>Radiación <math>\frac{kWh}{m^2}</math>:</b> 4.8
- <b>Altura:</b> 1.63 m	<b>Temperatura media del ambiente:</b> 16°C
<b>Material de cubierta:</b> Vidrio claro 4 mm	<b>Temperatura lograda con el secador:</b> 45°C – 50 °C
<b>Material del absorbedor:</b> Duratecho	<b>Velocidad del aire en la cámara de secado:</b> 0,1 a 0,2 m/s
<b>Cámara de secado</b> (no incluye patas)	<b>Dirección relativa del flujo dentro de la cámara:</b> a través del producto
- <b>Ancho:</b> 1 m	
- <b>Altura:</b> 0.78 m	
- <b>Profundidad:</b> 0.6 m	
<b>Capacidad Normal de carga:</b> 3 a 15 kg.	
<b>Tiempo de secado:</b> 2 a 5 días	

---

En las siguientes figuras se observa de cómo está compuesto el secador solar, también el modo de carga del secado.

### Vista frontal



**Figura A2.1:** Vista frontal del secador solar de granos.  
**Fuente:** Cevallos & Ulloa (2016)

### Vista posterior



**Figura A2.2:** Vista posterior del secador solar de granos.  
**Fuente:** Cevallos & Ulloa (2016)

### Interior del secador solar



**Figura A2.3:** Vista interior del secador solar de granos.  
**Fuente:** Cevallos & Ulloa (2016)

### Posición de bandejas



**Figura A2.4:** Vista de la posición de bandejas del secador solar de granos.  
**Fuente:** Cevallos & Ulloa (2016)

## ANEXO 3

### MANUAL DE FUNCIONAMIENTO SECADOR SOLAR TÉRMICO MIXTO

#### 1. Observaciones importantes sobre seguridad durante el funcionamiento del secador

El usuario deberá observar normas de seguridad durante la operación como:

- a) Uso de guantes como protección contra el calor en caso de manipular las bandejas durante el proceso de secado.
- b) Considerar el peso de las bandejas y su carga al momento de cargar y descargar el producto. La mala operación puede causar caídas de las bandejas metálicas en las extremidades inferiores.
- c) Asegurar correctamente la puerta, para evitar accidentes, golpes o lesiones.
- d) No topar la plancha absorbidora del colector solar durante el secado, existe el riesgo de quemaduras.
- e) No golpear ni dejar caer objetos contundentes sobre los vidrios, al romperse pueden ser corto punzante para el operador.

#### 2. Descripción técnica del secador solar

---

##### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS:

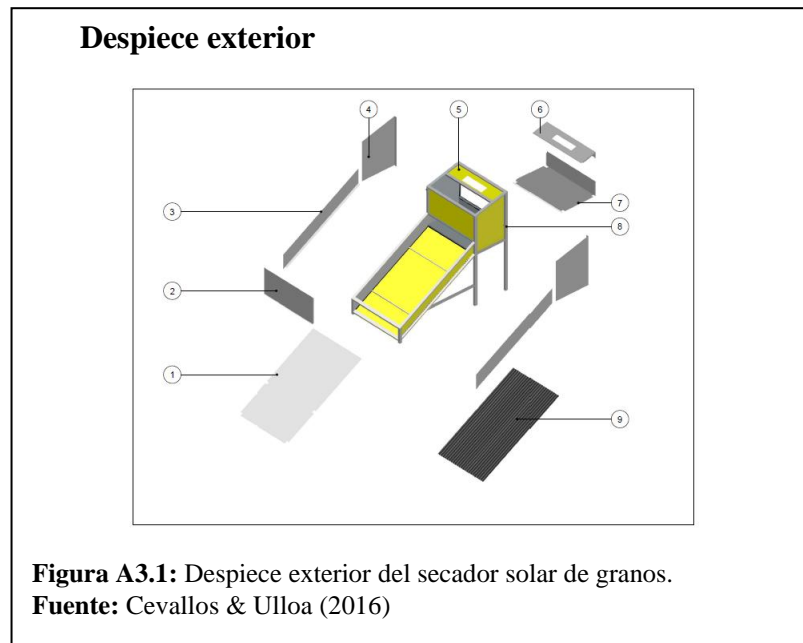
---

<b>Dimensiones del secador:</b>	<b>Latitud:</b> 21° 57' sur
<b>Colector Solar</b>	<b>Longitud:</b> 33° 18' oeste
- <b>Ancho:</b> 1 m	<b>Altitud:</b> 2850 msnm
- <b>Longitud:</b> 1.98 m	<b>Radiación <math>\frac{kWh}{m^2}</math>:</b> 4.8
- <b>Altura:</b> 1.63 m	<b>Temperatura media del ambiente:</b> 16°C
<b>Material de cubierta:</b> Vidrio claro 4 mm	<b>Temperatura lograda con el secador:</b> 45°C – 50 °C
<b>Material del absorbedor:</b> Duratecho	<b>Velocidad del aire en la cámara de secado:</b> 0,1 a 0,2 m/s
<b>Cámara de secado</b> (no incluye patas)	<b>Dirección relativa del flujo dentro de la cámara:</b> a través del producto
- <b>Ancho:</b> 1 m	
- <b>Altura:</b> 0.78 m	
- <b>Profundidad:</b> 0.6 m	
<b>Capacidad Normal de carga:</b> 3 a 15 kg.	
<b>Tiempo de secado:</b> 2 a 5 días	

---

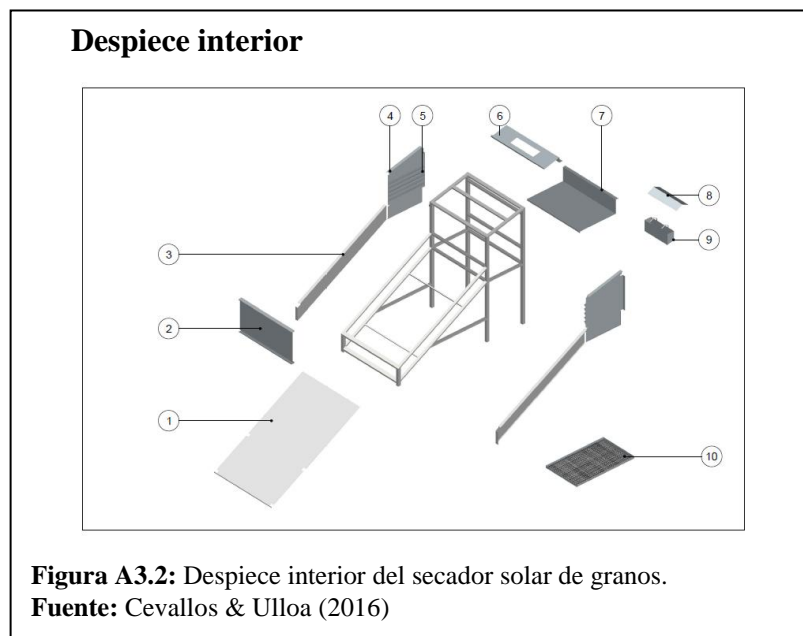


## 2.1 DESCRIPCIÓN DEL SECADOR



- 1 Protección superior del panel
- 2 Protector frontal
- 3 Tol protector lateral del panel
- 4 Protección lateral
- 5 Lana de vidrio

- 6 Protección chimenea
- 7 Protector base
- 8 Esqueleto secador
- 9 Placa absorbedora



- 1 Protector inferior panel
- 2 Protector frontal interior
- 3 Protector de panel lateral interior
- 4 Protección lateral secador
- 5 Soporte bandejas

- 6 Protección interna chimenea
- 7 Base de protección secador
- 8 Cubierta chimenea
- 9 Chimenea
- 10 Bandeja

### **3. TRANSPORTE**

Las columnas y los soportes de panel han sido diseñados considerando apoyos de sujeción para un adecuado y seguro transporte. Se debe realizar sin carga de producto y bandejas.

### **4. INSTRUCCIONES PARA LA INSTALACIÓN**

- a) El secador debe ser instalado en un espacio abierto, que brinde las condiciones adecuadas de circulación de aire y captación de los rayos del sol.
- b) Observar el movimiento de salida y de ocaso del sol, el secador debe ser colocado de tal forma que reciba de forma constante e ininterrumpida los rayos del sol. Se recomienda que el secador se coloque de forma longitudinal en sentido norte o sur.
- c) Verificar que el suelo sea regular o plano, evitando una sobrecarga en un punto específico del secador.

### **5. FUNCIONAMIENTO**

#### 5.1 Revisión

- a) Retirar toda materia o suciedad que pueda obstruir el paso de los rayos del sol en los vidrios.
- b) Verificar que el equipo se encuentre libre de impurezas de cargas anteriores.

## 5.2 Carga

- a) Abrir la puerta del secador, con cuidado ubicarla en la posición inferior.



- b) Ubicar la bandeja 1 (bandeja inferior) en el secador, colocar el producto a secar, verificando visualmente que la distribución sea uniforme.



- c) Repetir el paso anterior hasta cargar las bandejas restantes.



- d) Cerrar la puerta verificando que la cerradura de medio giro se encuentre asegurada.



### 5.3 Descarga

- a) Previo a la descarga se debe verificar que el producto se encuentre en las condiciones esperadas.
- b) Abrir la puerta del secador, con cuidado ubicarla en la posición inferior.
- c) Con el uso de guantes de protección al calor, remover la bandeja superior y descargar el producto seco.
- d) Repetir el paso anterior con las bandejas restantes.

### 5.4 Limpieza

Realizar la limpieza del interior del secador, retirando los restos que pudiesen haber caído.

**NOTA:** Se recomienda usar un cobertor para la intemperie durante los periodos en que el secador no se encuentre en funcionamiento, con el objetivo de prolongar su vida útil.

## ANEXO 4

### MANTENIMIENTO

Las actividades recomendadas para realizar el mantenimiento del equipo se detallan a continuación, donde se recomienda observar los períodos de mantenimiento, diario, trimestral y semestral.

- a) Se debe cargar el secador de acuerdo al ritmo de trabajo, se recomienda que se realice la carga del producto diariamente.
- b) Con el objetivo de mantener la captación de los rayos solares de forma efectiva se debe realizar la limpieza de los vidrios cada día de trabajo.
- c) Es importante mantener la limpieza del área de secado, principalmente si se cambia de producto, realizar la limpieza diariamente.
- d) Las bandejas se encuentran fabricadas en malla, es muy probable que restos de los granos se queden adheridos, se recomienda realizar la limpieza de las bandejas de forma diaria.
- e) El viento puede llevar partículas del producto a secarse a través del secador siendo la chimenea un punto de acumulación, se recomienda realizar una inspección y limpieza cada tres meses.
- f) Realizar una verificación visual del equipo cada tres meses, buscando indicios de corrosión que deben ser controlados.
- g) Una vez al año realizar la inspección visual del estado de la pintura y retocar de ser necesario.

Se recomienda realizar todos los trabajos de mantenimiento y limpieza cuando el secador se encuentre frío.

En la siguiente tabla se puede observar detalladamente el cronograma de mantenimiento del secador solar.

### CRONOGRAMA DE MANTENIMIENTO

#### DATOS GENERALES

EMPRESA	AGROCOMETEXPORT S.A.	NOMBRE	SECADOR SOLAR TÉRMICO MIXTO
DEPARTAMENTO	SECADO	MODELO	PROTOTIPO

#### CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO DE UN SECADOR SOLAR MIXTO

ITEM	SEMANAS																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Recarga de Producto	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Limpieza de vidrios	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Limpieza del área de secado	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Limpieza de bandejas	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Limpieza de la chimenea												O												O
Verificar corrosión												O												O
Pintura exterior del equipo																								Δ

Diario	X
Trimestral	O
Semestral	Δ

Revisión	
Carga	
Pintura	

## ANEXO 5

**Tabla A5.1. Anuario meteorológico- mensual**

M0024		QUITO INAMHI-INNAQUITO										INAMHI							
MES	HELIOFANIA (Horas)	TEMPERATURA DEL AIRE A LA SOMBRA (°C)						HUMEDAD RELATIVA (%)				PUNTO DE ROCIO (°C)	TENSION DE VAPOR (hPa)	PRECIPITACION(mm)			Número de días con precipitación		
		ABSOLUTAS		M E D I A S				Máxima día	Mínima día	Media	Mensual			Suma Mensual	Máxima en 24hrs	día			
		Máxima día	Mínima día	Máxima	Mínima	Mensual													
ENERO	161.7	23.6	15	7.2	30	21.2	10.0	14.6	98	14	37	25	78	10.5	12.7	82.4	30.0	2	13
FEBRERO	100.3	23.0	1	7.6	26	20.4	10.2	14.3	98	12	47	26	83	11.2	13.4	182.5	23.9	24	22
MARZO	119.4	23.2	31	6.5	11	20.0	9.8	13.9	98	17	52	24	82	10.6	12.8	145.8	25.7	5	26
ABRIL	93.1	23.2	1	8.6	28	19.7	10.3	13.9	98	9	50	1	84	11.1	13.3	372.9	39.9	12	30
MAYO	155.7	25.0	10	6.7	18	21.9	10.4	15.5	98	13	42	20	77	11.1	13.2	55.2	16.8	1	14
JUNIO	144.2	24.1	28	7.4	21	21.4	10.6	15.3	96	2	44	11	72	10.0	12.3	28.5	13.6	19	11
JULIO	163.9	23.9	8	7.2	20	21.1	10.1	14.9	97	15	44	8	71	9.2	11.7	117.2	35.4	29	11
AGOSTO	225.9	24.2	25	7.4	14	22.4	10.1	15.4	98	23	40	11	66	8.5	11.2	48.9	19.2	18	7
SEPTIEMBRE	175.9	24.9	29	8.2	16	22.2	10.5	15.5	94	20	39	30	67	8.8	11.4	73.3	15.9	17	10
OCTUBRE	149.4	23.6	24	8.1	19	21.3	10.0	14.4	96	6	40	31	74	9.3	11.7	54.8	11.9	5	12
NOVIEMBRE	165.8	25.8	1	7.0	19	22.1	9.8	14.6	99	7	32	1	72	9.1	11.7	65.7	23.0	26	13
DICIEMBRE	143.5	24.6	26	7.1	23	21.3	10.0	14.6	100	18	41	26	77	10.3	12.5	107.0	26.5	18	20
VALOR ANUAL	1798.8	25.8	6.5			21.3	10.2	14.7	100	32	75			10.0	12.3	1334.2	39.9		

**Nota:** Datos de Heliofanía **Fuente:** (INAMHI, 2014, pág. 43)

**Tabla A5.2. Valores de Albedo**

Tipo de Superficie	Albedo
Nieve recién caída	0,9
Nieve aplastada	0,6
Suelo desnudo	0,15-0,25
Praderas	0,25-0,75
Mar en verano	0,05
Mar en invierno	0,1

**Nota:** Se observa la clase de Albedo. **Fuente:** (Flores Nicolalde, 2015)

**Tabla A5.3. Valores de la reflexión y absorción**

Reflexión y absorción del vidrio	$\alpha_g$	0,1
Reflexión y absorción del agua y fondo de destilador	$\alpha_a$	0,3

**Nota:** Datos de reflexión y absorción. **Fuente:** (Maureira Poveda, 2006)

**Tabla A5.4. Emisividad del grano**

120 (trigo)	planta + suelo 0,987 ± 0,005	suelo + rastrojo 0,957 ± 0,015
214 (trigo)		suelo desnudo 0,955 ± 0,018
Le Mas Neuf (maíz)	planta 0,984 ± 0,007	suelo (húmedo) 0,979 ± 0,006
500 (maíz)	planta 0,986 ± 0,009	suelo desnudo 0,958 ± 0,013
102 (girasol)	planta 0,979 ± 0,011	suelo desnudo 0,969 ± 0,009
	veg. natural 0,980 ± 0,003	
121 (girasol)		suelo desnudo 0,953 ± 0,012
304 (girasol)		suelo desnudo 0,958 ± 0,013
203 (alfalfa)	Planta + suelo 0,987 ± 0,004	

**Nota:** Detalles de emisividad del grano.

**Fuente:** (Caselles, Coll, Rubio, Valor, & Sospedra, 1999)





## ANEXO 7

### Pruebas de humedad de grano



**ESCUELA POLITECNICA NACIONAL**  
**DEPARTAMENTO DE CIENCIA DE ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA (DECAB)**  
Campus Politécnico José Rubén Orellana Ricaurte  
Direc.: Píezaje Andalucía E12-A y Alfredo Mena Caamaño . Telf.: 2976300  
Personas de Contacto: Ing. Sílvia Oleas. Telf.: 2976300 ext. 4236 e-mail: silvia.oleas@epn.edu.ec  
Tlgs. Elisabeth Venegas . Telf.: 2976300 ext. 2122 . e-mail: elisabeth.venegas@epn.edu.ec  
Quito- Ecuador



### INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS O TRABAJO

ORDEN: DC-OT0053-2016

#### IDENTIFICACIÓN DE LA(S) MUESTRA(S) Y SERVICIO (S)

Nº Muestra	ID Muestra	Descripción de la muestra	Servicio/Analito	Laboratorio
1	DC-MU3718	MOROCHILLO HÚMEDO	HUMEDAD	Bromatología
2	DC-MU3719	MOROCHILLO SECO	HUMEDAD	Bromatología
3	DC-MU3720	MOROCHILLO 3 HORAS DE SECADO	HUMEDAD	Bromatología

#### RESULTADOS

Muestra-ID Muestra	Servicio/Analito	Resultado	Unidades	Método
MOROCHILLO HÚMEDO/ DC-MU3718	HUMEDAD	26,60	%( g/100g)	INEN 1513
MOROCHILLO SECO/ DC-MU3719		13,72		
MOROCHILLO 3 HORAS DE SECADO/ DC-MU3720		20,04		

#### COMENTARIOS:

1.- Se reporta la media de tres determinaciones del analito.

PROFESIONAL RESPONSABLE  
DEL ANÁLISIS

Dra. Susana Fuertes

AUTORIDAD AUTENTICADORA  
( JEFE DECAB)

Ing. Francisco Quiroz

#### QUEJAS Y SUGERENCIAS

El cliente puede canalizar las quejas sobre los resultados de los análisis, sobre el tiempo de entrega del informe, u otro aspecto, a través del Jefe del DECAB, o de la persona Encargada de Recepción de Muestra y Atención al Cliente, ya sea en forma verbal o en