



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

DISEÑO DE UN MODELO MATEMÁTICO DE UN SECADOR SOLAR
PARA MADERA EN LA GRANJA YUYUCOCHA

TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN
ENERGIAS RENOVABLES

AUTOR: CAÑAR SANIPATIN JOSSUE ESTEBAN

DIRECTOR: ING. JUAN GUAMÁN TABANGO Msc.

OCTUBRE 2022

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

**DISEÑO DE UN MODELO MATEMÁTICO DE UN SECADOR SOLAR
PARA MADERA EN LA GRANJA YUYUCOCHA**

Trabajo de titulación revisado por el Comité Asesor, previa a la obtención del Título
de:

INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES

APROBADA:

Ing. Juan Guamán, MSc.

DIRECTOR

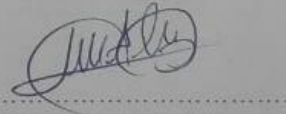
FIRMA



Ing. Luis Álvarez, MSc.

ASESOR

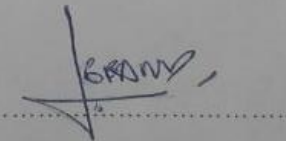
FIRMA



Ing. Jorge Granja, MSc.

ASESOR

FIRMA



IBARRA-ECUADOR

OCTUBRE, 2022



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DEL CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	100419029-2		
APELLIDOS Y NOMBRES:	CAÑAR SANIPATIN JOSSUÉ ESTEBAN		
DIRECCIÓN:	SAN ANTONIO (BARRIO MORAS)		
EMAIL:	Jossueking21@gmail.com jecanars@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	2 932 549	CELULAR:	0989688516

DATOS DE CONTACTO	
Título:	DISEÑO DE UN MODELO MATEMÁTICO DE UN SECADOR SOLAR PARA MADERA EN LA GRANJA YUYUCOCHA
Autoría:	Cañar Sanipatín Jossué Esteban
Fecha:	24 octubre 2022
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
Programa:	Pregrado
Título por el que opta:	Ingeniero en Energías Renovables

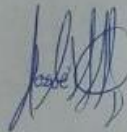
Director:	Ing. Juan Guamán, MSc.
------------------	------------------------

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 24 días del mes de octubre de 2022.

EL AUTOR:



Cañar Sanipatin Jossué Esteban
100414029-2

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

Guía: FICAYA-UTN

Fecha:

CAÑAR SANIPATIN JOSSUÉ ESTEBAN

**DISEÑO DE UN MODELO MATEMÁTICO DE UN SECADOR SOLAR PARA
MADERA EN LA GRANJA YUYUCOCHA**

TRABAJO DE GRADO

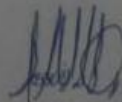
Ingeniero en Energías Renovables, Universidad Técnica del Norte, Carrera de
Ingeniería en Energías Renovables, Ibarra, 25 de octubre de 2022.

DIRECTOR: MsC. Juan Guamán Tabango Ing.

El objetivo de esta investigación permitió obtener un modelo matemático para el secado solar de madera en función de la radiación solar incidente sobre un punto en la superficie del campus YUYUCOCHA ubicado en la ciudad de Ibarra. De acuerdo con lo mencionado en este estudio se planteó lineamientos y variables para el secado con energía solar de especies estudiadas en el campus antes mencionado.

Ibarra, 25 de octubre de 2022

AUTOR



.....
Cañar Sanipatin Jossué Esteban

DIRECTOR



.....
MsC. Juan Guamán Tabango Ing.

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a:

A Dios por haberme guiado en todo momento, por ser esa fuente de amor, sabiduría y fuerza inagotable en todo momento y espacio.

A mi padre y madre

Sr. Raúl Cañar quién me ha enseñado a solucionar los problemas con ingenio y ha sido una fuente de inspiración y dedicación en todo momento.

Sr. Rubí Sanipatín quién siempre me ha instruido por los caminos justo y correctos, quién ha sido un apoyo en medio de la adversidad.

A mi abuelita Gladys Viteri por haberse transformado en mi segunda mamá, en el consejo cuando menos lo espero, quién me apoyó ciegamente en todo mi proceso.

A mis hermanos Danilo, Mateo y David por quienes busco ser el mejor ejemplo y quienes confían en mi a pesar de cada circunstancia adversa.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por bendecirme, por ser el centro de mi vida y permanecer fiel aunque no lo merezca, le doy gracias por darme la sabiduría para culminar este proceso.

A mi padre por su esfuerzo, por haberme dado esa confianza y seguridad para saber que es lo que quiero en la vida.

A mi madre por negarse a sí misma todos los días por amor a su familia, por muchas veces ser la última en acostarse y la primera en levantarse con el único fin de ver a sus hijos triunfar, por su servicio y sobre todo por instruirnos en los caminos de Dios a través de su ejemplo.

A mi abuelita por enseñarme que el esfuerzo trae su fruto, por apoyarme incluso cuando no lo puede hacer, por sus oraciones y consejos.

A mis hermanos por ser una inspiración en mi vida y un ejemplo de superación en medio de las circunstancias.

Agradezco a Melanny Granda por ser su apoyo durante cada uno de mis procesos, por confiar en mí y ayudarme a alcanzar esta metas de forma incondicional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Contenido	Páginas
Índice de tablas.....	xi
Índice de figuras.....	xii
Resumen.....	xiii
Abstract.....	xiv
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Planteamiento del Problema.....	3
1.3 Justificación.....	4
1.4 Objetivos.....	5
1.4.1 Objetivo General.....	5
1.4.2 Objetivos Específicos.....	5
1.5 Pregunta directriz.....	5
1.6 Hipótesis.....	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 Marco teórico referencial.....	6
2.1.1 Energía solar.....	6
2.1.2 Desarrollo del modelo matemático.....	10
2.1.3 Validación de valores.....	18
2.2 Marco legal.....	19
2.2.1 Constitución del Ecuador 2008.....	19
2.2.2 Ley de Fomento de Energías no Convencionales.....	19
2.2.3 Ley del Régimen del Rector Eléctrico.....	20

2.2.4 Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica	20
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	21
3.1 Área de estudio.....	21
3.2 Métodos.....	22
3.2.1 Análisis de los valores de radiación	22
3.2.2 Modelo Matemático	29
3.2.3 Validación del modelo de secado.....	36
3.3 Materiales y equipos	36
CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
4.1 Análisis de los valores de radiación del polígono de la Granja Yuyucocha con fines de aprovechamiento solar térmico.....	38
4.1.1 Descarga de la base de datos	38
4.1.2 Análisis.....	38
4.1.3 Radiación global de la campaña de medición	39
4.1.4 Pronóstico y validación	40
4.1.5 Adecuación de datos	44
4.2 Desarrollo del modelo matemático	45
4.2.1 Elección del tipo de secador solar a usar	45
4.2.2 Evolución de la humedad de secado al aire durante el secado de la madera	46
4.2.3 Valores resultantes de la solución de ecuaciones diferenciales del modelo matemático	49
4.3 Validación de datos y estimación de tiempo de secado	49
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
5.1 Conclusiones	51

5.2 Recomendaciones.....	52
Bibliografía	53
ANEXOS	63

Índice de tablas

Tabla 1: Criterios de separación de tablas en el secado	32
Tabla 2: Propiedades físicas del <i>Alnus nepalensis</i> D. Don	33
Tabla 3: Valores de densidad, contenido de humedad (peso verde) y tiempo de secado	36
Tabla 4: Detalle de los materiales	37
Tabla 5: Cantidad de radiación solar global en el polígono de Yuyucocha	39
Tabla 6: Radiación medida con el piranómetro	39
Tabla 7: Resultados del R^2 y R^2 ajustado	40
Tabla 8: Resultados del R^2 y R^2 ajustado del smoothing spline	41
Tabla 9: Valores de radiación global pronosticados	41
Tabla 10: P. valor de las pruebas de normalidad	43
Tabla 11: Prueba ANOVA de un factor	43
Tabla 12: Radiación solar global	44
Tabla 13: Variables climatológicas del lugar de investigación	45
Tabla 14: Tiempos de secado para las 4 especies estudiadas	50

Índice de figuras

Figura 1: Tipos de secadores solares	12
Figura 2: Planos de corte de la madera	13
Figura 3: Ubicación de la granja Yuyucocha	21
Figura 4: Piranómetro Hukseflux modelo LP02	23
Figura 5: Ubicación del piranómetro	25
Figura 6: Ventana modelizador de series temporales	26
Figura 7: Curve Fitting Tool	27
Figura 8: Esquema general de variables que intervienen en el modelado matemático	30
Figura 9: Componentes principales del diseño de secador solar para madera	34
Figura 10: Visualizador para la descarga de datos NSRBD	38
Figura 11: Suavizado de curvas	42
Figura 12: Secadores solares para madera tipo invernadero con circulación forzada	46
Figura 13: Desarrollo del modelo matemático	49

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

DISEÑO DE UN MODELO MATEMÁTICO DE UN SECADOR SOLAR
PARA MADERA EN LA GRANJA YUYUCOCHA

Trabajo de titulación

Nombre del estudiante: Cañar Sanipatin Jossué Esteban

Resumen

El constante aumento de las necesidades energéticas lleva a la academia a investigar nuevos métodos y procedimientos para el uso eficiente de la energía y de fuentes renovables no convencionales con el objetivo de promover el desarrollo sustentable. Los secadores solares usados comúnmente en la deshidratación de granos de café o cacao es una muestra del potencial que tiene el recurso solar en la industria. La investigación teórica se centra en el modelado matemático para el secado de madera mediante un secador de circulación forzada. La estimación del tiempo de secado fue necesaria la obtención de valores de radiación de la base de datos del National Renewable Energy Laboratory (NREL) de los Estados Unidos de América validados a través de la instalación de un piranómetro Hukseflux modelo LP02, además del uso de datos climáticos obtenidos de la estación meteorológica M1240 del INHAMI. El desarrollo del modelo matemático requirió de una validación para lo cual se obtuvieron tiempos de secado experimentales de 2 especies ya estudiadas en el campus Yuyucocha y valores del contenido de humedad y de densidad de otras dos especies que se encuentran en estudio.

Palabras clave: Modelo matemático, secado de madera, radiación solar térmica, energía renovable.

DESIGN OF A MATHEMATICAL MODEL OF A SOLAR DRYER FOR WOOD IN THE YUYUCOCHA FARM

Abstract

The constant increase in energy needs leads the academy to investigate new methods and procedures for the efficient use of energy and non-conventional renewable sources with the aim of promoting sustainable development. The solar dryers commonly used for the dehydration of coffee or cocoa beans are an example of the high capacities that solar resources have in the industry. For this reason, this theoretical research focuses on the mathematical modeling of wood drying in a forced circulation dryer. For the estimation of the drying time, it was necessary to obtain radiation values from the database of the National Renewable Energy Laboratory (NREL) of the United States of America, validated through the installation of a Hukseflux model LP02 pyranometer, in addition to the use of climatic data obtained from the INHAMI weather station M1240. The development of the mathematical model required a validation for which experimental drying times of 2 species already studied at the Yuyucocha campus and moisture content and density values of two other species that are under study were obtained.

Key words: Mathematical model, wood drying, solar thermal radiation, renewable energy.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El Ecuador tiene características topográficas variadas con gran diversidad climática y condiciones favorables para el aprovechamiento de energías renovables no convencionales: solar, eólica, biomasa, entre otras (CONELEC, 2008). A partir del 2012, con ayuda del CONELEC, se inició con el incentivo al desarrollo de proyectos de generación eléctrica con energías renovables por medio de nuevas regulaciones (Constante, 2014).

En la provincia de Imbabura ~~existeeuenta con~~ una variedad de recursos ~~energéticos de todo tipo~~, entre ellos el solar. ~~Está integrada~~ por el Cantón Ibarra, Pimampiro, Urcuquí, Antonio Ante, Otavalo, y Cotacachi (INEC, 2010). La ciudad de Ibarra, cabecera cantonal y capital de la provincia, se encuentra, entre las coordenadas 00° 20' 00" N y 78° 06' 00" O, ubicada a 2.228 m.s.n.m; el área urbana del cantón se localiza en una llanura, sobre la costa 2204 m.s.n.m con la mayoría de su superficie en una zona central que no supera el 5% de declive (GAD, 2013). El cantón Ibarra, de acuerdo con los datos de radiación global obtenidos a partir de archivos formato .tif para sistemas de información geográfica desde 1970 hasta el 2000, posee un rango de valores de radiación que va de 4649.46 W/m² y 5176.88 W/m² (WorldClim). Los valores de radiación solar directa y difusa están distribuidos en rangos que van de 3600 a 3900 W/m²/día y 2300 a 2500 W/m²/día respectivamente (CONELEC, 2008).

~~Para el~~ diseño del modelo matemático del secador solar ~~se~~ utilizará una base de datos climatológica obtenida de la estación meteorológica Ibarra (M1240), ubicada en la granja Yuyucocha, perteneciente a la Universidad Técnica del Norte, y una base de datos de radiación solar satelital. Los datos meteorológicos que arrojó la estación meteorológica M1240 para el año 2013 fueron los siguientes: temperatura media del aire a la sombra fue de 16.9°C, con un valor máximo de 23.5°C y un valor mínimo de

11.2°C; las horas de sol anuales fueron de 1932.1 con un valor máximo en el mes de agosto (200.9 h de sol/mes) y un valor mínimo en el mes de febrero (98.8 h de sol/mes); la humedad relativa medio fue del 80% con un máximo del 100% y un mínimo del 29%; la estación meteorológica Ibarra presentó un valor promedio de 6 octas en nubosidad que corresponde al nubosidad lo que quiere decir que el cielo estuvo parcialmente cubierto, ~~durante todo el año~~ (INHAMI, 2017).

La madera es usualmente secada hasta un contenido de humedad que puede variar entre un 18% y 20% antes de su procesamiento y uso, formando parte esencial en la preparación de la madera. La Industria busca alternativas económicas a los hornos convencionales o calentados con vapor, como los hornos de secado calentados con energía solar especialmente para operaciones pequeñas, como aficionados, o investigaciones de bajo presupuesto (Bond et al., 2011).

En Ecuador se ha desarrollado un proyecto de investigación orientado al diseño y construcción de un secador de madera a partir de modelos matemáticos donde se incluyen procesos de automatización y eficiencia energética. Uno de estos proyectos fue elaborado por el laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética (LEAEE) de la Escuela Politécnica Nacional donde se midieron las principales variables que intervienen en el proceso (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y contenido de humedad de la madera) a través de sensores en el secado de madera (Estrada et al., 2014).

Actualmente en la granja Yuyucocha se están realizando pruebas del secado de muestras de especies maderables mediante un secador solar artesanal elaborado a partir de plástico negro, caña guadua y madera en general. Además del secado solar se realizan pruebas de secado al aire libre con el objetivo de realizar comparaciones en los tiempos de un secado óptimo de especies maderables.

Planteamiento del Problema

En la actualidad, la preocupación por la contaminación ambiental y el cambio climático ha provocado que protocolos como el de Kioto en 1997 definan objetivos para que se disminuya la generación de gases de efecto invernadero (Protocolo de Kioto, 1997). Además, de acuerdo con Romero (2013), “el tratado de Lisboa, abarco bases jurídicas sobre el desarrollo de tecnologías energéticas en particular aquellas dedicadas a la eficiencia energética y a las energías renovables” (Romero, 2013). Hoy en día la necesidad energética de la población va en aumento gracias al desarrollo tecnológico y a las elevadas cantidades de producción. Se prevé que, en los próximos 50 años, la demanda de energía aumentará al doble de la que consumimos en la actualidad (Spitalnik, 2004). Es evidente que las fuentes energéticas provienen de los combustibles fósiles, los mismos que contaminan y amenazan el ambiente contribuyendo con el calentamiento global. (Lotfalian et., 2010).

Tal y como afirma Gil (2013) “el secado es uno de los procesos más exigentes en la preparación de la madera para usos industrial y doméstico” (Gil, 2013), ya que su correcta aplicación depende que la madera cumpla con los requerimientos de estabilidad, características específicas de trabajabilidad y propiedades mecánicas. Para poder lograr las condiciones mencionadas actualmente se usan sistemas de secado artificiales o convencionales, los mismos que usan combustibles fósiles o electricidad como fuente energética para el proceso de extracción de humedad.

El consumo eléctrico y de gasoil de un secador tradicional de madera es de 0.1 GJ y 1.1 GJ por cada m³ de madera respectivamente; el consumo eléctrico y de gasoil de un secador de madera por bomba de calor con gasoil es de 0.39 y 0.11 GJ por cada m³ de madera respectivamente; y finalmente un secador por bomba de calor solo con energía eléctrica consume 0.54 GJ por cada m³ de madera (Fernández et al., 2001). El consumo energético en el secado tradicional de madera es de 1.2 GJ/m³ o 333.33 kWh/m³, un valor elevado dado que en un hogar promedio se consumen aproximadamente 200 kWh-mes.

En Ecuador la práctica común es el secado de madera u otros productos al aire libre exponiéndolos al sol ubicados sobre una superficie horizontal, generalmente el piso generando así pérdidas y disminución en la calidad del producto seco (Roa & Ortega, 2011). De acuerdo a Roa y Ortega (2011) “el secador solar por convección de aire caliente, es una eficiente solución a este problema que posibilita la conservación de las propiedades de los productos agrícolas, protección contra la contaminación ambiental...” (Roa & Ortega, 2011).

La solución a esta problemática radica en el modelado matemático del secado de madera con el fin de aprovechar los niveles de radiación de la zona permitiendo encontrar las mejores condiciones para el tratamiento de la madera en función de los requerimientos técnicos que demandan los estudiantes de la carrera de Ingeniería Forestal para la caracterización y estudio de las especies madereras analizadas en los diferentes proyectos de investigación que realizan.

1.2 Justificación

La eficiencia energética constituye uno de los aspectos críticos de la meta mundial de desarrollo sostenible (Wang et al., 2012). Por ello, muchos han sido los estudios en esta materia para abordar los avances y las previsiones futuras energéticas de gran interés para el planeta (Song et al., 2012). Las energías alternativas son el mecanismo más importante capaz de mitigar el cambio climático en comparación con los combustibles fósiles, este tipo de energías trabaja de forma cíclica es decir se renuevan.

El desarrollo de cámaras de secado solares ha generado mucho interés y popularidad (Ekechukwu y Norton, 1999) ya que ofrece una alternativa barata y económica al momento de realizar procesos de secado a pequeña escala. Es una alternativa eficiente en zonas donde las horas de solar son altas y el coeficiente de nubosidad es bajo ya que se puede reducir el coste en el gasto energético. (Okala et al., 2011).

Gracias a los niveles de radiación descritos en los apartados anteriores se puede aprovechar la energía solar mediante un secador solar que servirá como evidencia del desarrollo de tecnologías más eficientes. El alto costo de sistemas de secado para madera tradicionales además, del costo de operación, reducida disponibilidad de mano de obra calificada para operar estos equipos y complejos sistemas de control respaldan la investigación de proyectos económicos y de fácil acceso (Salas, 2008).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Crear un modelo matemático de un secador solar para madera en la Granja Yuyucocha

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analizar los valores de radiación del polígono de la Granja Yuyucocha con fines de aprovechamiento solar térmico.
- Elaborar un modelo matemático en función de las variables de radiación y de secado de madera.
- Realizar pruebas del modelo matemático del secador solar de tres especies maderables estudiada en la Granja Yuyucocha.

1.4 Pregunta directriz

¿El modelado del secador solar en función de la radiación permitirá optimizar el proceso de secado de madera en el lugar de estudio?

1.5 Hipótesis

El modelo matemático permitirá identificar el potencial solar para el secado de madera mediante la validación de resultados.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Marco teórico referencial

2.1.1 *Energía solar*

La energía solar es una fuente de energía renovable o alternativa obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética proveniente del Sol en forma de energía solar pasiva, mediante el aprovechamiento directo de la radiación, o energía solar activa, en la producción de energía eléctrica y generación térmica mediante el uso de distintos dispositivos que transforman la radiación en energía útil (Vásquez Calero et al., 2015).

2.1.1.1 Radiación solar.

La radiación solar es la energía incidente sobre la superficie de la Tierra formada por un conjunto de longitudes de onda y frecuencias distintas, componentes del espectro de radiación solar (Constante, 2014). La radiación que llega por debajo de la atmósfera terrestre se divide en 4 componentes, Constante (2014) las divide en:

- Radiación directa: incide sobre una superficie sin haber tenido dispersión en la atmósfera, es decir se recibe con un ángulo único y directo.
- Radiación difusa: sufre un cambio de dirección en la atmósfera por dispersión.
- Albedo: incide sobre una superficie como consecuencia de la reflexión de superficies aledañas a la primera.
- Radiación total (global): es la suma de todas las anteriores que se presenta en una unidad de área o superficie (p. 27).

2.1.1.2 Base de datos de radiación solar.

Antes de iniciar con la elaboración de un proyecto con fines de aprovechamiento solar térmico o fotovoltaico es indispensable conocer la cantidad de radiación que se tiene en el lugar del área de captación (López Cózar, 2006) (Nandwani, 2005), mediante el uso de bases de datos de radiación que se pueden obtener a través de estaciones meteorológicas, mediciones experimentales y satélites, son una herramienta fundamental.

2.1.1.2.1 National Renewable Energy Laboratory (NREL).

NREL, en colaboración con la Universidad de Wisconsin y NOAA, generó un conjunto de datos de radiación solar procedentes de una serie de satélites ambientales operacionales geoestacionarios (GOES) ubicados por encima de la línea ecuatorial, que cubren América del Norte y del Sur cada 3 horas y el hemisferio norte, incluido Estados Unidos; este NSRDB cuadrículado (1998-2015) utiliza el Modelo Solar Físico (PSM) para presentar datos en cuadrícula con una resolución de 4 km x 4 km (Sengupta et al., 2017).

2.1.1.2.2 Mediciones experimentales

Para medir la radiación solar directa, difusa o global sobre la superficie terrestre se utilizan instrumentos como heliógrafos, piranógrafos, piranómetros, entre otros (Grossi Gallegos, 2001). Para la medición de la radiación difusa y global se utilizan los piranómetros, instrumentos que miden la radiación solar recibida por una superficie plana desde un ángulo de campo de visión de 180°. Esta cantidad, expresada en W/m², se denomina radiación solar "hemisférica" (Hukseflux, 2008). De acuerdo con (Pérez Carrasco, 2015) existen 3 tipos de piranómetros:

- **Piranómetro de termopila con revestimiento negro:** está cubierto por una pintura de alta absorptividad negra que absorbe el calor generando una señal de voltaje proporcional a la irradiancia solar.

- **Piranómetro de termopila con revestimiento blanco y negro:** su principio de funcionamiento es el mismo con la diferencia de que en su termopila contiene dos sensores, uno conectado al revestimiento blanco (señal fría) y otro al revestimiento negro (señal caliente) provocando una diferencia de temperaturas que genera una señal de voltaje proporcional a la radiación solar.
- **Piranómetro de célula fotovoltaica:** la célula FV genera un voltaje que representa la radiación solar.

2.1.1.3 Análisis de datos

Mediante una serie temporal de valores de radiación solar se desarrollan modelos predictivos o de regresión denominados como la representación de la relación entre dos o más variables a través de un modelo mediante una expresión lógico-matemática que, aparte de resumir cómo es esa relación, va a permitir realizar predicciones de los valores que tomará una de las dos variables (Molina & Rodrigo, 2019) en función del comportamiento pasado de la serie (Pereira González, 2010).

Se ha encontrado en la literatura varias metodologías para la predicción de valores o creación de series sintéticas de radiación solar global, que van desde el análisis matemático como el método Brinkworth que desarrolló un modelo basado en datos secuenciales de radiación solar global diaria en la comunidad de Bracknell, hasta el análisis computacional como el Método de Mohandes et al. que utilizó Redes Neuronales de tipo perceptrón multicapa para la predicción de radiación global en función de las temperaturas máxima y mínima y de la presión atmosférica del lugar de la investigación (Vega, 2016).

2.1.1.3.1 Predicción de datos

Existen softwares que permiten el desarrollo de modelos predictivos, tales como IBM SPSS que es un sistema global para el análisis de datos para la generación de informes tabulares, gráficos y diagramas de distribuciones y tendencias, estadísticos descriptivos y análisis estadísticos complejos (IBM, 2011), donde se pueden realizar

pruebas ARIMA que predicen el futuro de una serie en base a su comportamiento histórico propio (Sarmiento, 2012); y MATLAB, software que permite la creación de modelos predictivos mediante varias herramientas como smoothing splines que ajusta una *smooth curve* para encontrar una función $g(x)$ que se ajuste bien a los datos observados, es decir, que minimice la suma de los residuos al cuadrado mediante el suavizado de curvas para establecer pronósticos más exactos (Amat, 2017).

La proyección de datos se desarrolló tras la necesidad de predecir valores para el desarrollo de proyectos futuros, en este caso se busca el desarrollo de esta herramienta para la validación de la base de datos del NREL.

2.1.1.3.2 Pruebas estadísticas

De acuerdo con (Reyes et al., 2018) “es una forma de evaluar la evidencia que los datos proporcionan para probar una hipótesis” (p.39), es decir que permiten conocer el comportamiento de los datos para comprobar o no la hipótesis planteada en función de la estructura de la base de datos. El análisis de una serie de datos mediante la estadística surge de la necesidad de presentar conclusiones con un alto grado de validez que a su vez permita desarrollar la investigación con una menor incertidumbre (Chocó, 2017).

La herramienta estadística de análisis de varianza (ANOVA) se emplea al momento que se desea comparar las medias entre dos o más grupos (Amat, 2016). Es útil para la determinación de homogeneidad entre los dos grupos de datos (radiación solar) que se obtuvieron a través de las predicciones y las mediciones hechas in situ ya que usa las medias para comprobar la hipótesis de que estas deben coincidir entre sí, es decir, si los conjuntos de datos numéricos que se están comparando son significativamente distintos (Pereira González, 2010). Este análisis también es útil si se quiere conocer el comportamiento general de la variable a analizar, que en este caso es la radiación solar (Vélez et al., 2015).

En de la validación de métodos y modelos de predicción de radiación solar existen también parámetros estadísticos como RMSE (Raíz del Error Cuadrático

Medio), MBE (Error Medio Absoluto), MAE (Valor Absoluto Promedio) y MAPE (Error de Porcentaje Medio Absoluto), que miden el error o las posibles diferencias entre conjuntos de datos (Farías, 2018; Gutiérrez, 2014; Rodríguez, 2015; Yang, 2018). Estos parámetros se definen como:

- **RMSE:** medida de las diferencias promedio entre el conjunto de datos de la predicción y los datos reales;
- **MBE:** ofrece información sobre la sub y sobreestimación de una variable;
- **MAE:** promedio de los errores;
- **MAPE:** magnitud del error en función a la magnitud de los datos (porcentaje) (Rodríguez, 2015).

2.1.2 Desarrollo del modelo matemático

El secado de madera constituye una fase crítica de su proceso de industrialización, puede disponerse de ella en mayor o menor tiempo como el secado al aire libre que, a pesar de requerir una baja inversión inicial, el proceso es lento y no se puede obtener contenidos de humedad (CH) menor al 18% dependiendo de las condiciones meteorológicas (Solís Rodríguez et al., 2006). Dentro de esta sección se tratará los tipos de secadores solares conceptos esenciales del secado de madera, como la anatomía, humedad, tecnologías que actualmente se usan para este tipo de procesos en la industria actual y factores que intervienen en este proceso para el tratamiento de dicho insumo.

2.1.2.1 Métodos de secado de madera.

Los procedimientos para eliminar el exceso de agua en la madera son muy variados, desde los que aprovechan las condiciones secantes del medio ambiente (secado al aire libre), las estufas de secado en sus diferentes modalidades, estufas convencionales, solares, deshumidificadores, de vacío, hasta los que utilizan microondas u ondas de alta frecuencia (Zavala Zavala, 2000). La energía térmica absorbida aumenta la temperatura del producto, en este caso las muestras o testigos de

diferentes especies maderables, por lo tanto, la presión de vapor del producto excede la presión de vapor del aire circundante (Chauhan et al., 2018).

Otro de los métodos para el secado de madera son las estufas convencionales. Algunos de los problemas en el secado de la madera de especies tropicales en estufas convencionales se deben a la diversidad de sus propiedades tecnológicas y al alto costo del proceso que determina la capacidad rentable de las estufas y limita su utilización para secar volúmenes pequeños (Zavala Zavala, 2000). Existen además, otras formas alternativas de secado tales como los pre secadores, el secado al aire bajo cubierta y las estufas con deshumidificadores (Solís Rodríguez et al., 2006).

2.1.2.2 Secado solar para madera.

El uso de energía solar se ha establecido como la mejor fuente de energía para los sistemas de secado en cuanto a fuentes energéticas no convencionales se refiere (Perea-Moreno et al., 2016). El secado térmico, sistema más habitual y utilizado de secado de subproductos, como la madera, es un proceso simultáneo de transferencia de masa y energía en el que se produce: transferencia de calor, desde el agente desecante al producto; y transferencia de masa, encargada de llevar la humedad del interior del producto a la superficie y al aire de los alrededores (Haro Velasteguí, 2017). Con este tipo de tecnología se logra tiempos más cortos de secado en donde la madera pierde humedad entre un 25% a 50% más rápido que el secado al aire libre (McMiller & Wengert, 1978).

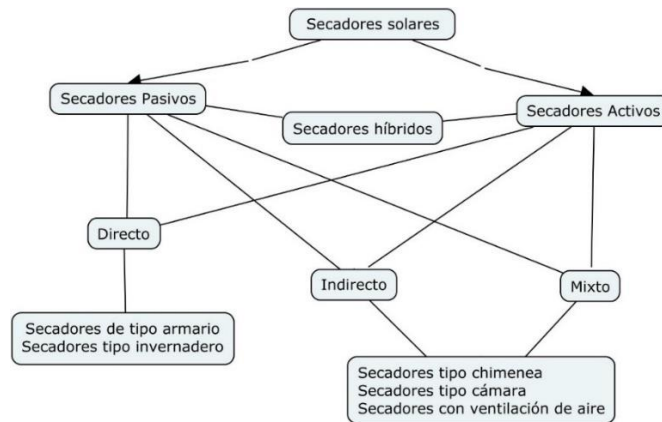
En la actualidad existen diversos tipos de secadores solares que se clasifican en función del método de calentamiento y a la forma en la que utilizan la radiación solar con fines de aprovechamiento térmico (Masias Rivera, 2019). Los secadores solares se pueden clasificar en: secadores solares pasivos o también llamados de circulación natural del aire, secadores solares activos o de circulación forzada, y secadores solares híbridos resultantes de la mezcla entre estos dos tipos.

Además de esta división existen tres subclases de modos de secado que se pueden observar en la Figura 1, el secador directo que recibe directamente la radiación solar incidente a través de materiales transparentes como las láminas de policarbonato, los secadores indirectos en donde el aire o fluido calo-transportador que entra a la cámara de secado es previamente calentado mediante colectores y secadores solares mixtos en donde el material se seca por el calentamiento directo y por el ingreso de aire previamente calentado (Fudholi et al., 2010).

Por lo general los secadores solares están hechos de madera o metales con un recubrimiento apropiado de materiales absorbentes como el polietileno negro para una mejor absorción de calor necesaria para los productos de secado (Kumar et al., 2016). Un secador solar es una alternativa económica en comparación al secado convencional y tiene la característica de ser muy utilizado en localidades con poco acceso a fuentes de energía convencionales (SOLAR, 2018).

Figura 1

Tipos de secadores solares



Nota. Tomada de (Fudholi et al., 2010).

La temperatura del aire es el factor más influyente en la velocidad de secado independientemente del material a secar (Hasan & Langrish, 2016). Este sistema de secado se compone de otro tipo de subsistema mixto en donde la radiación solar se

transmite conjuntamente a un calentador solar y a la cámara de secado (Haro Velasteguí, 2017), con el fin de aprovechar de mejor manera la energía proveniente del sol.

2.1.2.3 Madera.

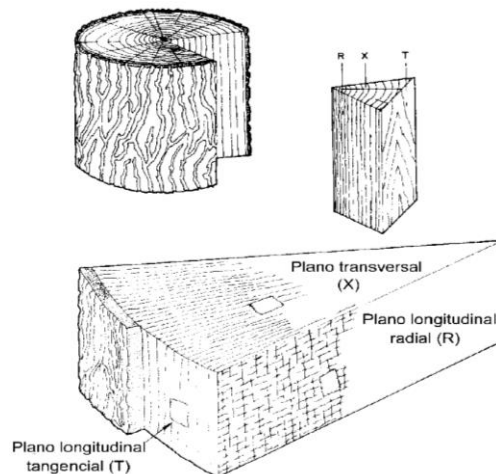
La madera se puede definir como “la parte sólida de los árboles por debajo de la corteza” (Giménez & Moglia, 2005), y también como “las partes de un árbol que, económicamente, pueden aprovecharse, siendo por lo general, troncos, y en un mayor alcance, también ramas y raíces” (Aguilar Pozzer & Guzowski, 2012), formado por un 50% de celulosa, 30% de lignina y 20% de productos orgánicos.

2.1.2.3.1 Planos de Corte de la madera.

La disposición de las células dentro de la madera se da en distintas direcciones, debido a esto es necesario conocer los distintos tipos de corte que existen.

Figura 2

Planos de corte de la madera



Nota. Identificación de los planos X, R y T en función del eje del árbol. Tomada de (Vásquez Correa & Ramírez Arango, 2011).

En la figura 2 se puede evidenciar de forma directa los siguientes tipos de planos de corte:

- Plano transversal o plano X perpendicular al eje del árbol.
- Plano longitudinal radial o también denominado plano “R”, corte perpendicular al eje del árbol).
- Plano longitudinal tangencial o también conocido como plano “T” direccionado paralelo al eje del árbol (Vásquez Correa & Ramírez Arango, 2011).

2.1.2.3.2 Estructura de la madera.

- La Corteza, definida como la capa más externa de un árbol formada, entre otros elementos, de células muertas del árbol que cumplen la función de protección contra agentes patógenos (Paz Fong, 2008).
- El cambium, capa que está por debajo de la corteza formado por dos capas: una interna o xilema que forma la albura y una externa o floema que limita con la corteza (Paz Fong, 2008).
- Albura, madera recién formada por medio de la cual viajan la mayor parte de vasos que conducen la sabia; es la capa más blanca (Paz Fong, 2008).
- Duramen, capa dura que representa a la madera propiamente dicha formada por células sin funciones por las que la sabia no circula savia (Paz Fong, 2008).

2.1.2.4 Propiedades de la madera.

2.1.2.4.1 Punto de saturación de las fibras.

Este valor corresponde al valor máximo de humedad de equilibrio higroscópico, cuando el ambiente que rodea a la madera está saturado de agua, también se define como el estado en el cual la madera ha eliminado toda su agua libre. Este valor es difícil de encontrar para ello se toma como referencia un valor aproximado del 30% independientemente de las especies de madera seleccionadas (García Ruiz, 2017) (Rodríguez Suárez, 2017).

De acuerdo con Ruiz (2017):

- Una vez alcanzado este punto se produce una merma de las dimensiones y un aumento de las propiedades mecánicas, este aumento de propiedades se traduce en la posibilidad de realizar un secado más intenso.
- El consumo de energía del proceso de secado por unidad de agua eliminada aumenta significativamente, debido que la evaporación del agua hay que sumar la energía consumida por el proceso de desorción, la cual aumenta exponencialmente al disminuir la humedad de la madera. (p. 17)

2.1.2.4.2 Densidad.

La densidad, conocida también como peso específico, es considerada como una de las propiedades más importantes dentro de la madera, (Leon, 2010) se la puede definir como la relación entre la masa (del cuerpo leñoso) y el volumen que ocupa (García Garrido, 2003), se la puede representar también como la relación entre la masa de la pieza y su volumen en distintos contenidos de humedad (Vásquez Correa & Ramírez Arango, 2011). Un dato muy importante a tomar en cuenta es que el valor máximo de densidad teórica que puede tener la madera es de 1,54 gr/cc, debido a que este es el valor de su pared celular (Vignote Peña, 2016).

- **Densidad específica**

Dentro del estudio de la madera, (Vignote Peña, 2016) define a la densidad específica como “la relación entre el peso seco P_0 de la madera y el volumen V_v de la madera cuando tiene una humedad superior al punto de saturación de la fibra” (p. 19).

2.1.2.4.3 Anisotropía.

La madera es un material heterogéneo debido a la configuración irregular de sus células, por ello puede presentar diferentes comportamientos en su estructura a lo largo de sus planos X, R y T durante el secado atribuyéndole esta propiedad (Vignote Peña, 2016).

2.1.2.4.4 Higroscópica.

Es la propiedad que posee la madera para absorber o eliminar el agua del ambiente que lo rodea provocando así el aumento o disminución de su peso (Moscoso & Gutiérrez, 2009). El momento en el que el CH de la madera llega a tener un equilibrio con la humedad relativa y la temperatura ambiente la pieza de madera llega a la humedad de equilibrio higroscópico (García Ruiz, 2017).

2.1.2.5 Humedad en la madera.

Puede definirse como la relación existente entre el peso del agua que contiene y el peso en el estado seco expresado mediante un valor de porcentaje (MIDUVI, 2014) o en kg/m^3 ((Ruíz Castillo, 2020), como se citó en Cisternas, 1994).

La cuantificación del porcentaje del contenido de humedad (CH) de la madera es muy importante para las múltiples aplicaciones industriales que se le puede dar a la misma (Pérez Peña et al., 2011). La madera tiene un alto CH debido a las propiedades de transporte de agua que posee encontrándose en tres formas diferentes:

- Agua libre: se ubica en las cavidades celulares de la madera; es la primera en evaporarse a la hora del secado;
- Agua de saturación o higroscópica: se ubica en la paredes celulares evaporándose con mayor dificultad produciendo cambios dimensionales en la madera (Moscoso & Gutiérrez, 2009).
- Agua en constitución: constituye el agua celular de la madera y no es posible evaporar con métodos de secado convencionales (Souter & De la Maza, 2011).

2.1.2.6 Factores de determinan el secado.

2.1.2.6.1 Temperatura del aire.

La temperatura del aire dentro de las etapas del proceso de secado de madera es muy importante debido a que favorece el movimiento del agua libre dentro de las

piezas de madera además de determinar la velocidad de evaporación del agua y la capacidad de absorción de agua del aire (García Ruiz, 2017).

2.1.2.6.2 Humedad relativa.

Hidalgo (2013) la define como “la razón de la presión de vapor de agua presente en ese momento, con respecto a la presión de saturación de vapor de agua a la misma temperatura” (Hidalgo Broncano, 2013), se la representa con un valor de porcentaje (%) logrando que aumento de la temperatura sea directamente proporcional a la capacidad de absorción de humedad del aire (García Ruiz, 2017).

2.1.2.6.3 Velocidad del aire.

La velocidad del aire es muy importante durante la primera fase de secado debido a la evaporación del agua libre dentro de la cámara de secado, es decir que mientras mayor sea la velocidad del aire menor será el tiempo de secado, a pesar de ello mientras menor agua libre exista dentro de la madera menor será el requerimiento de un alta velocidad del aire (García Ruiz, 2017) (Hidalgo Broncano, 2013).

2.1.2.7 Cantidad de Energía Solar Recibida.

Para establecer con exactitud la cantidad de energía solar que se puede aprovechar, se tiene en cuenta varios aspectos como: la hora del día, la estación del año, latitud, longitud y especialmente las condiciones atmosféricas (Haro Velasteguí, 2017). La superficie total de captadores, así como su configuración, proporciona mayor o menor cantidad de calor en el circuito primario, el cual se hace pasar por el intercambiador de calor de donde parten los circuitos secundarios de agua caliente sanitaria (ACS) o calefacción (López de Ponce, 2013).

El valor del calor (Q , en calorías) que llega a un punto de la superficie terrestre viene definido por tres variables: la superficie (S , en cm^2) considerada de los paneles, el tiempo (t , en minutos) de exposición y un coeficiente (k) que depende de las

anteriores variables indicadas de latitud, orientación, período estacional y hora del día, cuyo valor puede variar de 0 a 1,3 calorías/minuto x cm² (López de Ponce, 2013).

2.1.2.8 Modelo Matemático.

El desarrollo de modelos matemáticos es cada vez más útil a la hora de caracterizar procesos naturales (Haro Velasteguí, 2017), para este estudio será una herramienta fundamental para el diseño y evaluación del secador solar. Los modelos pueden categorizarse como predictivo o descriptivo (Jaluria, 2007), en el presente proyecto se usaron modelos predictivos ya que, como su nombre indica, predicen el comportamiento de un sistema dado.

Para elaborar el modelo matemático del sistema es necesario elaborar un balance de energía (Simo-Tagne et al., 2018). Para tratar de simplificar un modelo es necesario eliminar aspectos relativamente poco importantes, combinar los efectos de diferentes variables en el problema, utilizar supuestos para simplificar el análisis y reducir la cantidad de parámetros dentro del proceso o sistema (Jaluria, 2007).

2.1.2.9 Simulación de modelos.

La simulación del modelo matemático requiere de sistemas computacionales capaces de interpretar y analizar las variables que intervienen en cada fenómeno estudiado (García & Watkins, 2011). Softwares como MATLAB, entre otros, permiten ajustar modelos matemáticos a los procesos que se dan en la realidad determinando así la viabilidad de un proceso. Dentro de la simulación se desarrollan y construyen las ecuaciones más relevantes que pueden ser de tipo algebraicas, ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales, ecuaciones integrales, o combinaciones de éstos, dependiendo de la naturaleza del proceso o sistema en consideración (Jaluria, 2007).

2.1.3 Validación de valores

Para poder verificar los datos obtenidos en base al modelo matemático se necesita comparar los valores ya existentes en la literatura con valores arrojados por

los modelos matemáticos (Parra et al., 2008) que en el caso del presente proyecto será la comparación entre los valores de secado en función del tiempo ya establecidos en la literatura de las especies seleccionadas con los valores que arrojó el modelo matemático en base a la radiación solar.

2.1.3.1 Comparación de curvas y tiempos de secado

Cuando ya se ha construido el modelo matemático que explique el funcionamiento del secado de madera en función de la radiación solar es necesario conocer que tan fiables son los resultados mediante el uso de curvas y tiempos de secado obtenido en la investigación de (Yépez, 2021) sobre el secado de madera y los resultados de Meneses, 2011., Mediavilla, 2016., y Ruiz, 2017., sobre las propiedades físicas, químicas y de uso de la madera.

2.2 Marco legal

2.2.1 Constitución del Ecuador 2008

La Constitución del Ecuador 2008 dentro de su Título II sección segunda sobre un ambiente sano señala en Art. 15 que el “Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto”, garantizando la soberanía alimentaria. En el Título VII Art. 413 hace referencia al apoyo al uso de tecnologías limpias donde se señala que “el Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas, de bajo impacto...”

2.2.2 Ley de Fomento de Energías no Convencionales

De acuerdo con el Art. 2 de esta ley se exonera del pago de aranceles o impuestos adicionales que afecten la importación de productos o equipos necesarios para la investigación, producción, fabricación e instalación de sistemas energéticos renovables no convencionales.

2.2.3 Ley del Régimen del Rector Eléctrico

El Capítulo IX de los recursos energéticos no convencionales, Art. 63, señala que el “Estado fomentará el desarrollo y uso de los recursos energéticos no convencionales a través de los organismos públicos, la banca de desarrollo, las universidades y las instituciones privadas”.

2.2.4 Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica

En el Título I de las disposiciones fundamentales, en el Art. 1 establece que esta ley se encargará de la regulación de los sectores públicos y privados en la promoción y puesta en marcha de planes y proyectos de fuentes energéticas renovables y mecanismos de eficiencia energética, además en el Art. 11 se establece que la institución encargada de la promoción y ejecución de planes y programas de energías renovables junto con los mecanismos para conseguir la eficiencia energética es el MEER (actualmente MERNNR).

CAPÍTULO III

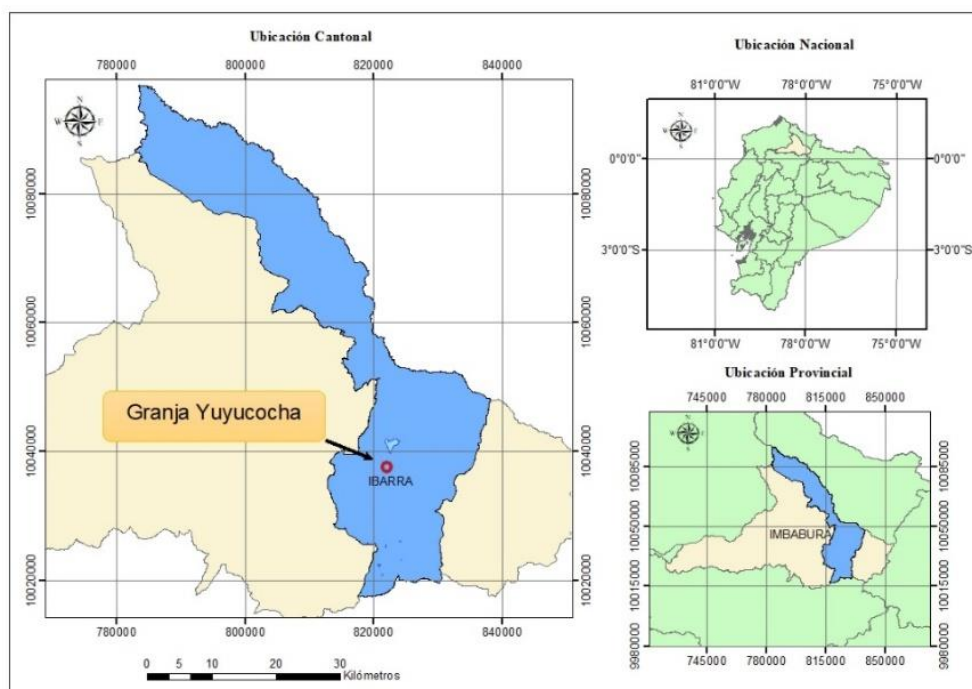
METODOLOGÍA

3.1 Área de estudio

El presente proyecto se ubica en la Granja Yuyucocha que se encuentra ubicada en la Provincia de Imbabura, Cantón Ibarra, Parroquia Caranqui (INEC, 2010), con una altitud de 2.245 msnm; posee un clima seco templado y agradable, y una temperatura promedio de 18°C (GAD, 2015). Forma parte de los campus de la Universidad Técnica del Norte, de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales (FICAYA) a una latitud de 0.327499 y longitud de 78.131389 (Figura 3).

Figura 3

Ubicación de la granja Yuyucocha



3.2 Métodos

3.2.1 Análisis de los valores de radiación

Al igual que en cualquier otra fuente de energía renovable no convencional, la cantidad del recurso energético es de gran importancia para poder establecer si la solución propuesta será viable o no (Bohorquez, 2015), por ello la búsqueda de bases de datos de radiación, mediciones in situ y su análisis, son significativas para establecer procesos complejos como la construcción de modelos matemáticos.

3.2.1.1 Obtención de la base de datos.

Para el desarrollo de la presente investigación se obtuvieron datos satelitales de irradiancia solar del lugar de la investigación detallado en la sección 3.1. Fue necesaria la obtención de una base de datos de un periodo de tiempo de 10 años para que el proyecto se sustente en valores confiables (Rodríguez, 2015).

Los datos de irradiancia solar fueron descargados en la página web National Solar Radiation Database (NSRDB) de National Renewable Energy Laboratory (NREL) de los Estados Unidos de América. Los valores tienen formato .csv, el mismo que puede ser visualizado por software como System Advisor Model y Matlab.

3.2.1.2 Manejo de la base de datos

Los valores de irradiancia solar obtenidos en la base de datos tienen una frecuencia de 30 minutos entre cada uno de ellos, por la gran cantidad de datos de aplicará la siguiente metodología:

- Se tomó el dato o los datos de irradiación satelital de la hora del día que se necesite (h_i) y el dato anterior y posterior (h_{i-1} , h_{i+1}).
- Se realizó el cálculo de la irradiancia promedio en la hora señalada mediante la ecuación 1:

$$h_1 = \frac{\frac{h_{i-1} + h_i}{2} + \frac{h_i + h_{i+1}}{2}}{2} \quad \text{Ec. 1}$$

- Al final se realizó la multiplicación por el intervalo de tiempo de la irradiancia, en este caso 1 hora para obtener la irradiancia horaria específica para dicha hora (Wh/m^2) (Vaca Revelo, 2018).

La validación de los datos de radiación se mantendrán los valores cada 30 min para poder realizar las pruebas estadísticas de correlación entre ambos grupos de datos.

3.2.1.3 Campaña de medición

La validación de la base de datos obtenida del NREL requirió de una campaña de medición de radiación solar global horizontal en el lugar de estudio con el fin de realizar un análisis más acercado a los valores reales. Se utilizó un piranómetro de la marca Hukseflux modelo LP02 el cual cumple con las especificaciones de segunda clase de la norma ISO 9060 y la Guía de la OMM (Hukseflux, 2008) (Figura 4).

Figura 4

Piranómetro Hukseflux LP02.



Nota. Imagen tomada de (Hukseflux, 2008).

3.2.1.3.1 Cálculo de la muestra y elección de técnica de muestreo para toma de datos

Para facilitar el estudio en el campus Yuyucocha se decidió aplicar un muestreo estadístico para establecer un tamaño de muestra representativo de la población total mediante la metodología señalada por (Rodríguez, 2011) descrita a continuación:

- **Definición de la población:** Debido a que la frecuencia de valores obtenida de la base de datos de radiación solar es de 30 minutos tomada durante 1 año, se definió como población al resultado de su multiplicación, es decir 17520.
- **Identificación del marco muestral:** El marco muestral fueron todos los valores de radiación en watios que otorga el sistema durante un año.
- **Selección del tipo de muestreo:** Se determinó un muestreo no probabilístico debido a que la selección de los elementos de muestreo fue realizada en base al criterio del autor debido a las necesidades que existe que los datos sean tomados en el menor tiempo posible (Otzen & Manterola, 2017).
- **Elección del método de muestreo:** El método por conveniencia es el que más representa al estudio debido a que permitió elegir los valores más accesibles para tomar como muestra (Otzen & Manterola, 2017).
- **Cálculo del tamaño de la muestra:** el cálculo de la muestra se basó en la premisa de que la población estudiada es finita, es decir que cuenta con un número límite de datos por lo que se usa la ecuación 2 descrita por (Rodríguez, 2011).

$$n = \frac{N \times Z_{\alpha}^2 \times p \times q}{e^2 \times (N-1) + (p \times q \times Z_{\alpha}^2)} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

n: tamaño de la muestra.

N: tamaño de la población.

Z: parámetro estadístico que depende del nivel de confianza.

p: probabilidad de que ocurra el evento.

q: probabilidad de que no ocurra el evento (1 – p).

e: error de estimación máximo aceptado.

3.2.1.4 Instalación del Piranómetro y toma de datos

Una vez establecido el periodo de muestreo se instaló el piranómetro LP02 de la marca Hukseflux en el bloque principal de aula del campus Yuyucocha, emplazamiento elegido debido a que no se generan sombras ni rayos reflectantes sobre el piranómetro como se observa en la Figura 5; se instaló el dispositivo con el cable de datos orientado al hemisferio norte con el fin de que no existan interferencias en la toma de datos por aumento de temperatura a causa del calentamiento del mismo (Hukseflux, 2008).

Figura 5

Piranómetro



Nota. instalación del piranómetro sobre el bloque principal de aulas del campus Yuyucocha.

3.2.1.5 Predicción de radiación

Debido a que la base de datos de radiación del NREL ofrece valores de radiación hasta el año 2019 se utilizaron dos métodos para pronosticar las mediciones de GHI y poder compararlas estadísticamente con los datos generados por el piranómetro en el lugar de estudio (Mazorra, 2015; Vega, 2016).

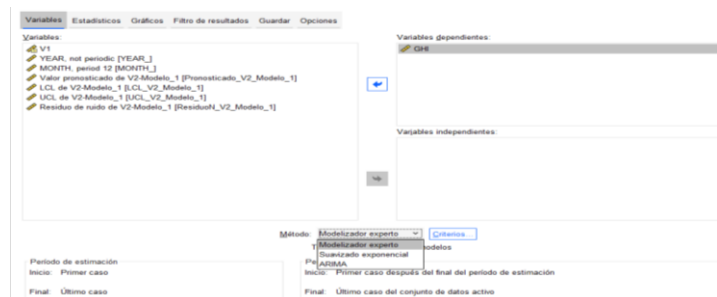
3.2.1.5.1 Aplicación de un modelo autorregresivo integrado de media móvil (ARIMA)

El primer método consiste en la aplicación de un modelo autorregresivo integrado de media móvil (ARIMA) (Sarmiento, 2012) mediante la metodología descrita en el manual de usuario de IBM SPSS usando la herramienta *modelizador de series temporales* (IBM, 2011):

- Antes de aplicar el modelo es necesario saber si la serie de datos es estacional o no, es decir si su varianza permanece constante a lo largo de toda la serie temporal de datos mediante la herramienta gráfico de secuencias. Si la serie temporal no presenta una varianza estacionaria se usan transformaciones estabilizadoras de varianza usando.
- Una vez comprobada la estacionalidad de los datos se ingresó en la pestaña *Analizar, predicciones* y se eligió la herramienta *crear modelos* como se observa en la Figura 6.
- En la ventana se elige las variables dependientes a modelar, en este casoó fue la base de datos de radiación solar global.
- En el cuadro denominado *método* se seleccionó el método de modelado ARIMA.

Figura 6

Ventana modelizador de series temporales



Nota. Tomada del software IBM SPSS.

Finalmente se obtuvieron las predicciones hasta el 31 de diciembre de 2021 en el cuadro de datos que posee el programa para poder ser exportados a Excel o Matlab para ser analizados en la elaboración del modelo matemático.

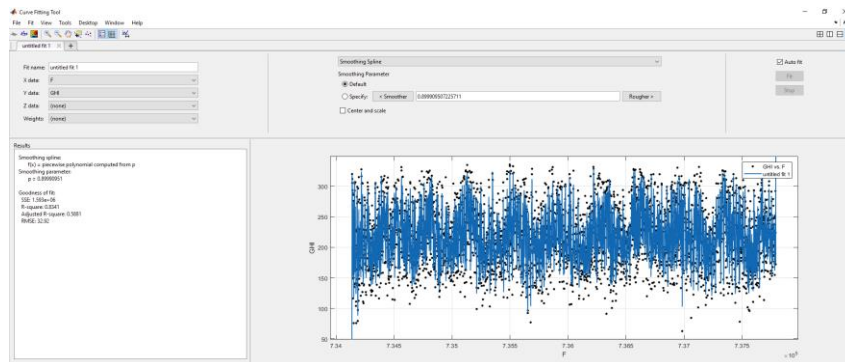
3.2.1.5.2 Aplicación de Smoothings Splines

El segundo método se realizó usando la herramienta computacional MATLAB donde se desarrolló un modelo de pronóstico en base a smoothings splines o curvas de suavizado mediante la herramienta *curve fitting* y la metodología detallada por Gavilanes (Gavilanes, 2020). La secuencia que se siguió para obtener los valores de radiación solar fue la siguiente:

- Se importa la base de datos al programa Matlab en formato columna de vectores mediante el comando *Import data*. Las columnas que se ingresaron corresponden a las fechas y a los valores de radiación solar global con una frecuencia de 30 min.
- Se preparó el vector fecha para poder ser analizado mediante la App *Curve Fitting* (Figura 7).
- En la ventana que se desplegó se eligió la opción *smoothing spline* y se eligió un parámetro del smoothing de tal forma que el coeficiente de correlación o R^2 no sea menor a 0.95 para que el modelo predictivo sea válido.

Figura 7

Curve Fitting Tool



El software Matlab permitió que se pueda trabajar con valores de R^2 de nuestra preferencia debido a que se ajusta al nivel de error con el que se quieren pronosticar los datos.

3.2.1.6 Validación de datos

Una vez obtenidos los valores de la predicción y la toma de datos en el lugar de estudio mediante el piranómetro, se empleó una prueba estadística para establecer si la relación es suficientemente representativa para trabajar con la base de datos del NREL en el desarrollo del modelo matemático.

3.2.1.6.1 Elección de pruebas estadísticas

Los datos fueron sometidos a la prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov debido a que se cuenta con más de 50 datos (Flores et al., 2019); para ello se usó el software estadístico SPSS en donde se estableció la hipótesis nula (H_0) de que ambos grupos de datos presentan una distribución normal y una hipótesis alternativa (H_1) de que los datos no presentan una distribución normal, para esto se estableció un nivel de significancia (p .) de 0.05. Si la prueba de normalidad arroja un valor $p. < 0.05$ se rechaza la H_0 y si se obtiene un valor $p. > 0.05$ se aprueba (IBM, 2011).

Se plantearon dos pruebas para determinar la relación entre las medias de ambos grupos, la prueba ANOVA de un factor para una distribución de datos normal en dos muestras independientes (Amat, 2016). La prueba se realizó en el mismo software estadístico SPSS donde se establecieron dos hipótesis una H_0 que estable la semejanza entre ambos grupos de datos y la H_1 que señala la desigualdad entre grupos. Se utilizará la misma premisa del valor de nivel de significancia (p .) de la prueba de normalidad.

Para establecer el grado de error que existen entre ambos grupos de datos se aplicaron los siguientes parámetros estadísticos:

- **Raíz del error cuadrático medio (RMSE)**

$$RMSE \left(\frac{W}{m^2} \right) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{sat,i} - x_{ins,i})^2} \quad \text{Ec. 3}$$

$$RMSE (\%) = \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{sat,i} - x_{ins,i})^2}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ins,i}^2 \right)}} \times 100 \quad \text{Ec. 4}$$

- **Valor Absoluto Promedio (MAE)**

$$MAE \left(\frac{W}{m^2} \right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{sat,i} - x_{ins,i}| \quad \text{Ec. 5}$$

$$MAE (\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_{sat,i} - x_{ins,i}}{x_{ins,i}} \right| \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

n: número de datos
 xins: irradiación terrestre
 xsat: irradiación satelital

3.2.1.7 Adecuación de datos

Finalizado el proceso de selección y validación de datos se realizó la transformación de unidades para conocer el potencial calorífico aprovechable con la cantidad de radiación solar incidente sobre el área de estudio. Se transformó los valores de wh/m² día a MJ/m² día mediante la ecuación 7.

$$GHI_{MJ} = GHI_{wh} \times 0.0036 \quad \text{Ec. 7}$$

3.2.2 Modelo Matemático

Como ya se estudió en la literatura, el modelo matemático constituye una representación numérica de un suceso, variable, hecho, relación, etc., por lo que se usó el siguiente proceso lógico para su construcción (Cervantes, 2015):

- a. **Estudio de la situación real:** comprender lo mejor posible el proceso de secado solar para madera (leyes que gobiernan el proceso) debido a que suele ser muy

complejo de expresar y entender matemáticamente. Este paso se realizó en la revisión bibliográfica.

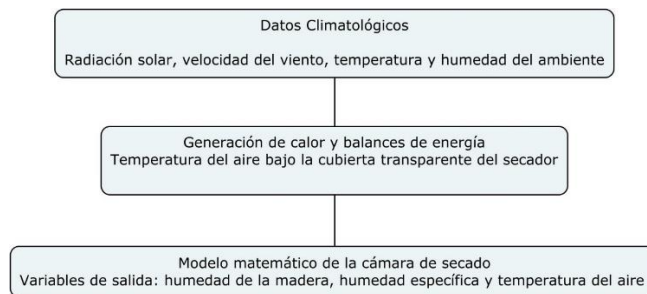
- b. **Elaboración del modelo matemático:** se construyó el modelo extrayendo las variables fundamentales partiendo de un modelo ya conocido en donde se incorporó variables adaptadas al lugar de estudio debido a que los modelos son construcciones temporales e imperfectos sujetas a cambios.
- c. **Solución del modelo:** se realizaron análisis mediante sistemas computacionales.
- d. **Validación del modelo:** se interpretó la solución y se comparó con información ya conocida.

3.2.2.1 Secuencia del secado solar para el modelado matemático

Es posible describir el comportamiento del proceso de secado de la madera a través de las variables como: propiedades del medio de secado (aire precalentado en el colector) y las propiedades de transporte (conductividad térmica, la difusividad térmica, la difusividad de la humedad, y los coeficientes de transferencia de masa) (Vásquez, 2017). En la Figura 8 se representa un esquema para la descripción de las variables que intervienen en el proceso de desarrollo de un modelo matemático adecuado donde se observa la interrelación de todas las variables.

Figura 8

Esquema general de variables que intervienen en el modelado matemático



Nota. Obtenido de (Vásquez, 2017)

3.2.2.2 Humedad en la madera

Para el cálculo de la humedad en la madera (CH) se utiliza la ecuación 8 presentada por (Novoa, 2006).

$$CH = \frac{Ph - Psh}{Psh} \times 100\% \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

CH: Contenido de humedad
Ph: Peso húmedo en gramos (peso de madera verde)
Psh: Peso seco anhidrido en gramos.

3.2.2.3 Gradiente de secado

Mediante el cálculo del gradiente de secado se podrá realizar la comparación entre los niveles de humedad obtenidos mediante el modelo matemático y los gradientes con los que se comparó la efectividad del modelo matemático.

$$GS = \frac{CH \text{ real}}{CHE} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

GS: Gradiente de secado.
CH real: Contenido de humedad de la madera verde.
CHE: Contenido de humedad de madera seca.

3.2.2.4 Peso específico y volumen

Para la preparación de las probetas es necesario establecer el peso y el volumen de estas. El peso de las probetas se establece en una balanza donde se indica el peso en gramos; el volumen viene dado por medición directa mediante la ecuación 10; el peso específico de las probetas permite conocer el porcentaje de humedad o de agua que se ha evaporado de la probeta y se calcula mediante la ecuación 11 (COPANT, 1972).

$$V = b \times h \times l \quad \text{Ec. 10}$$

Dónde:

- V: es el volumen.
- b: es el ancho de la probeta en centímetros.
- h: es la altura de la probeta en centímetros.
- l: es la longitud de la probeta en centímetros.

$$PE = P/V \quad \text{Ec. 11}$$

Dónde:

- PE: es el peso específico.
- P: es el peso en gramos.
- V: es el volumen en centímetros cúbicos.

3.2.2.4.1 Probetas de madera

Los tamaños de las probetas están definidos por la norma panamericana COPANT 458 en donde se indican dimensiones de un prisma rectangular de 5 cm x 5 cm de sección transversal y 10 cm de longitud en el caso de que se vaya a determinar el peso específico aparente bajo diferentes condiciones de contenido de humedad (COPANT, 1972). Además se tiene en la Tabla 1 las dimensiones de las tablas, la separación que deben tener una de otra y el espesor de los separadores.

Tabla 1

Criterios de separación de tablas en el secado

Espesor de tablas a secar (cm)	Espesor de separadores(cm)	Espacio de los separadores (cm)
<2	2	30 a 50
2 a 3	2,5	40 a 50
3 a 4	3	60 a 80
4 a 6	3,5	60 a 80
6 a 8	4	90 a 100
> 8	4,5	100

Nota: Elaboración propia a partir de Peña y Rojas, (2006).

3.2.2.5 Condiciones de humedad en la madera

Para la determinación de condiciones de humedad en la madera se partió de un estudio ya realizado en el campus Yuyucocha sobre el secado de *Alnus nepalensis* D. Don. En la Tabla 2 se detallan las propiedades físicas de la madera en su estado húmedo. Además se trabajará con el contenido de humedad del *Ocotea insularis* (Meins.) Mez, Fresno (*Fraxinus americana* L.) y *Carapa amorphocarpa* W. Palacios.

Tabla 2

Propiedades físicas del Alnus nepalensis D. Don

Especie	Humedad verde (%)	Densidad (g/cm ³)	Contracción (%)				Edad	
			Tang.	Rad.	Long.	T/R		
<i>A. nepalensis</i> D Don.	103	0,34	7,68	3,49	0,39	2,63	10,91	10

Nota. Tomado de (Mediavilla, 2016).

Estos datos serán usados para el desarrollo del modelo matemático donde se tomará el contenido de humedad y densidad inicial de la madera para proyectar tiempos de secado.

3.2.2.6 Diseño del secador solar

Para establecer el comportamiento del secado de madera a través del modelo matemático se procedió a realizar el diseño de un secador solar con el fin de estimar las dimensiones que se usarán en los análisis térmicos.

3.2.2.6.1 Componentes básicos.

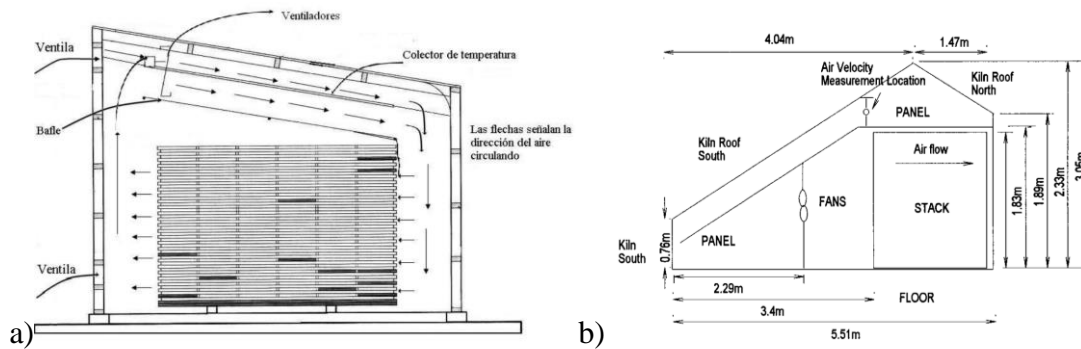
El secador solar que se tomará como base para el desarrollo del modelo tendrá un área efectiva de 18 m² debido a que en el sector de secado de madera del campus Yuyucocha se construyó un secador artesanal con dicha área. Las dimensiones del

secador serán de 2m x 9m de superficie por 2m de altura lo que nos dio un volumen de 36 m³, permitiendo a su vez una carga de madera de 6.4 m³, valor que será aproximado a 6 m³. Se asume que la cámara tendrá los siguientes componentes principales:

- **Techo:** se asumió que el material del techo es de madera, con una inclinación de 15° orientado al hemisferio norte.
- **Colector:** dentro del diseño será ubicado en el techo para el mayor aprovechamiento del área de incidencia del secador de madera.
- **Ventiladores:** se asumió se los ventiladores generaran un flujo de aire con una velocidad de m/s.
- **Ventilas:** se diseñó con 2 ventilas tal y como se observa en la figura 9 (Salas et al., 2008).

Figura 9

Componentes principales del diseño de secador solar para madera.



Nota. Diseños base tomados de a)(Salas et al., 2008) y b) (Bentayeb et al., 2008)

3.2.2.7 Análisis térmico de la cámara de secado

Para establecer los valores de temperatura y humedad en la madera y del aire en el proceso de secado se toma el matemático desarrollado (Haque & Langrish, 2014) el mismo que basa en un balance global tomando en cuenta el intercambio de

transferencia entre la madera, el aire de secado, paredes de la secadora y el medio ambiente.

El aire que se calienta gracias al aprovechamiento de la radiación solar fluye dentro del secador a determinadas condiciones de humedad relativa, específica y temperatura hasta entrar en contacto con la madera en estado verde o húmedo en donde se genera una transferencia de masa y calor, es decir el agua de la madera se transfiere al aire desecante debido a la diferencia de temperaturas entre ambos (Vásquez, 2017).

3.2.2.7.1 Transferencia de humedad desde la madera al aire

Como se definió con anterioridad, la madera es un material higroscópico, pierde humedad y la intercambia con el aire circundante hasta que el contenido de humedad de la pieza de madera sea menor con su entorno. La transferencia de humedad en el secado se produce desde la madera al aire en movimiento. La ecuación clásica para determinar el transporte de humedad en sólidos forma parte de la segunda ley de Fick (Zhao, et al., 2015) (Bentayeb et al., 2008).

3.2.2.8 Desarrollo del modelo

El modelado matemático permite el desarrollo rápido de sistemas dinámicos, es decir, de sistemas que cambian su comportamiento en función del tiempo, además de que permiten conocer su comportamiento en distintas condiciones. Para iniciar fue necesario obtener una relación entre la entrada y salida del componente estudiado mediante cálculos algebraicos o integración de ecuaciones diferenciales, una relación implícita entre las variables del modelo y datos obtenidos del sistema (MathWorks, 2020).

En el secado de productos, la constante K se utiliza para expresar todos los fenómenos de transporte antes mencionados, y pueden ser definidos por una sola ecuación de capa fina. Las ecuaciones de capa fina describen los fenómenos de secado de una forma unificada, independientemente del mecanismo que controla al secado. Se han utilizado para estimar el tiempo de secado de varios productos agrícolas, y para

determinar las curvas de secado. En el desarrollo de modelos de secado de capa fina para productos agrícolas, generalmente se mide y correlaciona el contenido de humedad del producto, en cada instante de tiempo.

3.2.3 Validación del modelo de secado

Mediante el modelo matemático se obtuvieron valores de tiempo de secado; estos fueron comparados con datos existentes en estudios anteriores y en la literatura para establecer la validez del modelo (Bentayeb, 2008).

Los valores de contenido de humedad, densidad y en algunos casos del tiempo de secado de la madera, se obtuvieron mediante las investigaciones realizadas dentro del campus Yuyucocha a 4 especies maderables, generando robustez y confianza en los datos a usar dentro del modelo matemático (Tabla 3)

Tabla 3

Valores de densidad, contenido de humedad (peso en verde) y tiempo de secado

Especie	Densidad (kg/m ³)	CH verde (Kg/Kg)	Tiempo de secado en días (literatura)	Fuente
Alnus nepalensis D. Don	340	103	56	(Yépez, 2021)
Ocotea insularis (Meins.) Mez	640	66.01	14	(Ipiates, 2021)
Fresno (Fraxinus americana L.)	510	65.38		(Ruiz, 2020)
Carapa amorphocarpa W. Palacios	640	63.82		(Sotelo, 2016)

3.3 Materiales y equipos

Para realizar la investigación se utilizaron los equipos, software e insumos que se pueden apreciar enlistados en la Tabla 4, elementos que contribuyeron con el adecuado desarrollo de la investigación.

Tabla 4

Detalle de los materiales

Equipos	Softwares	Insumos
Computador	Matlab	Base de datos 1995-2015 NSRBD
Piranómetro LP02	System Advisor Model	Base de datos proporcionada por el piranómetro
	IBM SPSS	Datos meteorológicos INAHMI
	Excel	

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se muestran los resultados de la metodología usada en cada uno de los objetivos específicos planteados. Los resultados se detallan en base a la metodología detallada en el Capítulo III.

4.1 Análisis de los valores de radiación del polígono de la Granja Yuyucocha con fines de aprovechamiento solar térmico

4.1.1 Descarga de la base de datos

Se descargó la base de datos de radiación solar NSRDB 1998-2015 del NREL mediante la página web www.nsrdb.nrel.gov. El polígono de la granja Yuyucocha se encontró dentro de un mismo píxel o marco de mediciones por lo que no se requirieron ajustes estadísticos para el tratamiento de los datos. Los datos de radiación solar se obtuvieron a una extensión temporal de 10 años y con una frecuencia de 30 min entre cada toma desde el año 2010 hasta el año 2019 (ver Figura 10), con el fin de que la predicción se realice de manera más confiable (Pomares, 2012).

Figura 10

Visualizador para la descarga de datos NSRDB.

The image shows a screenshot of the 'Data Download Wizard' interface on the NSRDB website. The interface is in Spanish and includes several sections for configuring the data download. At the top, there are tabs for different data sources: 'MSG IODC: PSM v3', 'PSM v3 5 Minute', 'Puerto Rico SHR', and 'Spectral TMY India'. Below these, there are more specific tabs: 'SUNY India TMY', 'SUNY India', 'PSM v3 TMY', 'PSM v3', and 'Spectral On-demand'. The main content area is divided into three sections: 'Select Years', 'Select Attributes', and 'Select Download Options'. The 'Select Years' section has checkboxes for years from 2010 to 2019. The 'Select Attributes' section has checkboxes for various solar radiation parameters like DNI, GHI, GHI, etc. The 'Select Download Options' section has checkboxes for 'Include Leap Day', 'Convert UTC to Local Time', and 'Half Hour Intervals'. On the left side, there is a section titled 'Physical Solar Model (PSM3)' with a brief description of the model and a link to 'Documentation'.

Nota. Figura tomada de: www.nsrdb.nrel.gov.

4.1.2 Análisis

Una vez descargada la base de datos se realizó la estimación de la radiación solar horaria con lo que se redujeron a 87600 datos, estos valores a su vez fueron promediados para obtener el promedio de la radiación global diaria por cada año. En la Tabla 5 se puede observar los valores finales de radiación anual desde el año 2010 hasta el año 2019, fecha tope que el NREL tiene el registro de datos.

Tabla 5*Radiación solar global en el polígono de Yuyucocha*

Radiación solar global (GHI)	
Año	(kWh/m²/día)
2010	5.11
2011	5.36
2012	5.28
2013	5.11
2014	5.13
2015	5.11
2016	5.46
2017	5.37
2018	5.26
2019	5.08

*Nota. El año con mayor nivel de radiación es 2016.***4.1.3 Radiación global de la campaña de medición**

Tras la aplicación de la fórmula para el cálculo de la muestra se obtuvo un resultado de 266.5 tomas con una frecuencia de 30 minutos, nivel de confianza del 90%, un error del 5%. Tomando en cuenta que las horas efectivas de sol al día entre los meses de febrero y marzo son de 5.36, se necesitaron de 25 días para cumplir con la muestra, como se puede observar en la Tabla 6.

Tabla 6*Radiación medida con el piranómetro*

Fecha y hora	GHI (W/m²)
24/2/2021 9:00	86.65
24/2/2021 9:30	105.39
24/2/2021 10:00	132.50

24/2/2021 10:30	168.37
24/2/2021 11:00	206.11
24/2/2021 11:30	237.73
24/2/2021 12:00	261.11
24/2/2021 12:30	279.19
24/2/2021 13:00	294.15
24/2/2021 13:30	303.01
24/2/2021 14:00	298.89
24/2/2021 14:30	278.14
24/2/2021 15:00	244.21
24/2/2021 15:30	202.50
24/2/2021 16:00	155.27

Nota. Se muestra como referencia los valores de radiación tomados desde las 09:00 h hasta las 16:00 h del 24 de febrero de 2021.

4.1.4 Pronóstico y validación

4.1.4.1 Proyección de datos mediante ARIMA y Smoothing Splines

Mediante el uso de IBM SPSS se realizó el ARIMA con los valores medios diarios mensuales para pronosticar los valores de radiación desde el 01 de enero de 2020 hasta el 01 de abril de 2021. La herramienta *modelizador de series temporales* ajusta las predicciones a un modelo ARIMA mediante el uso de la serie de datos de GHI o variable dependiente y el espacio temporal, es decir los meses en los que se tomaron los datos. En la Tabla 7 se pueden observar los resultados que arroja el programa tras el análisis del modelo en donde se observa un R^2 o coeficiente de correlación de 0.529, valor que nos indica que la relación de las varianzas entre los datos reales y los que se proyectó es muy baja.

Tabla 7

Resultados del R^2 y el R^2 cuadrado ajustado.

Estadístico del modelo		
GHI	R^2 estacionario	R^2

Modelo_1	0.778	0.529
-----------------	-------	-------

Nota. El R^2 estacionario no se lo tomará en cuenta ya que se cuenta con dos variables independientes.

Una vez comprobada la ineficacia del modelo ARIMA para la predicción de esta base de datos se procede a realizar el análisis en el software MATLAB mediante la herramienta *curve fitting* para lo cual es necesario programar a los datos de GHI y los de fecha como vectores de columna y realizar una serie de análisis para poder crear el modelo predictivo mediante smoothing splines. En este caso se creó un modelo predictivo con un coeficiente de correlación de 0.9667 lo que significa que existe una relación entre las varianzas de los datos reales y los proyectados como se puede observar en la Tabla 8.

Tabla 8

Resultados del R^2 y R^2 cuadrado ajustado Smoothing spline.

GHI-Modelo_2	Estadístico del modelo	
	R^2 estacionario	R^2
	0.8346	0.9667

Con esta premisa se pueden predecir los valores de radiación en el periodo ya establecido para realizar la comparación estadística con los datos tomados en el lugar de estudio. En la Tabla 9 se observa una parte de los datos del pronóstico los cuales serán analizados, junto con los datos de la toma física, mediante una prueba de normalidad para definir el estadístico de validación. En la Figura 12 se observan los datos cargados que corresponden al modelo predictivo con el R^2 sobre el 0.95.

Tabla 9

Valores de radiación global pronosticados

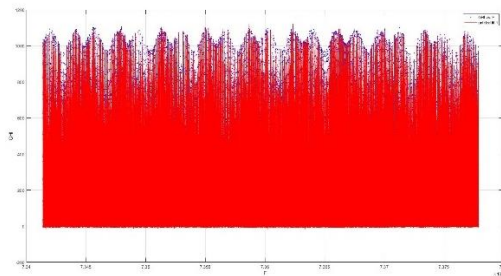
Fecha y hora	GHI (W/m²)
---------------------	------------------------------

24/2/2021 9:00	143.89
24/2/2021 9:30	161.84
24/2/2021 10:00	189.46
24/2/2021 10:30	229.12
24/2/2021 11:00	268.05
24/2/2021 11:30	301.37
24/2/2021 12:00	330.18
24/2/2021 12:30	355.16
24/2/2021 13:00	372.08
24/2/2021 13:30	375.24
24/2/2021 14:00	396.71

Nota. Se muestra como referencia los valores de radiación pronosticados desde las 09:00 h hasta las 14:00 h del 24 de febrero de 2021.

Figura 11

Suavizado de curvas



Nota. Se puede observar como las predicciones se ajustan mediante el suavizado de curvas a los datos reales en el espacio temporal de 10 años.

4.1.4.2 Pruebas de normalidad y correlación

Se aplicó la prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov a ambos grupos de datos que corresponden a los valores tomados directamente y los valores de la predicción con lo que se obtuvo valores de significancia o p. valores menores a 0.05 con lo que la H_0 de normalidad en ambos grupos se acepta como se puede ver en la Tabla 10.

Tabla 10*P. valor de las pruebas de normalidad*

Kolmogorov-Smirnov			
	Estadístico	N° Datos	Sig.
GHI de la toma física	0.251	1200	0.05
GHI valores proyectados	0.276	1200	0.05

Debido a que se manejarán alrededor de 1400 datos se aplicará una prueba estadística establecida en la metodología, el ANOVA de un factor debido a que se tienen dos grupos con más de 30 datos con distribución normal. Al igual que en las pruebas anteriores se usará el software SPSS con la Ho y Hi señaladas en la metodología.

En la tabla 11 se observan los resultados correspondientes al estadístico ANOVA, donde observamos que el valor de significancia es mayor que 0.05 por lo que se establece que la Ho es válida por ende ambos grupos de datos se relacionan entre sí.

Tabla 11*Prueba ANOVA de un factor*

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	Sig.
Entre grupos	264779.248	1	264779.248	0.086

Dentro de grupos	215389398.385	2398	89820.433
Total	215654177.633	2399	

Nota. El valor de significancia es de 0.086, necesario para aprobar la Ho.

Finalmente se calcularon los parámetros estadísticos RMSE y MAE para robustecer la comprobación de la relación entre ambos grupos de datos. El rango de porcentajes en los que deben estar estos dos parámetros para que los datos sean considerados como válidos van de 0 a 30% entendiendo que mientras los valores se acerquen más a cero los datos van a ser más aceptables. El valor porcentual del RMSE fue del 20.16% mientras que el MAE fue del 39.37% lo que indica que existe una relación baja entre ambos grupos.

4.1.5 Adecuación de datos

Debido a que el aprovechamiento de la radiación solar se lo hace en forma de calor se transformaron los valores de radiación solar diaria anuales de Wh/m²/día a MJ/m²/día mediante el uso de la Ec (3) descrita en el capítulo 3 de esta investigación. En la tabla 12 se puede observar el resultado de dicho proceso.

Tabla 12

Radiación solar global

Año	GHI (kWh/m²/día)	GHI (Wh/m²/día)	GHI MJ/m²/día
2010	5.11	5110	18.40
2011	5.36	5360	19.30
2012	5.28	5280	19.01
2013	5.11	5110	18.40
2014	5.13	5130	18.47
2015	5.11	5110	18.40
2016	5.46	5460	19.66
2017	5.37	5370	19.33
2018	5.26	5260	18.94
2019	5.08	5080	18.29
2020	5.29	5290	19.04
2021	5.18	5180	18.65

4.2 Desarrollo del modelo matemático

Como ya se detalló en la metodología, se inició con la determinación de los datos climatológicos del lugar de estudio como temperatura, velocidad del aire, humedad relativa y radiación solar, este último valor ya calculado en el apartado anterior. En la tabla 13 se pueden observar los datos tomados del IHNAMI del año 2020.

Tabla 13

Variables climatológicas del lugar de investigación

Variables	
Humedad Relativa	80.46%
Temperatura del aire	16.3 °C
Velocidad del viento	1.7 m/s

Nota. Elaboración propia tomado de (FONAC, 2021)

Las variables detalladas constituyen los valores de entrada al secador y son relativos a una serie temporal de un año (Bentayeb et al., 2008), es decir que se tomaron los datos promedios diarios del año 2020 de la estación Ibarra M1240 propiedad del INHAMI pero que se encuentra en el interior del campus Yuyucocha dándole un valor agregado a estos datos ya que describen el comportamiento directamente en el lugar de estudio.

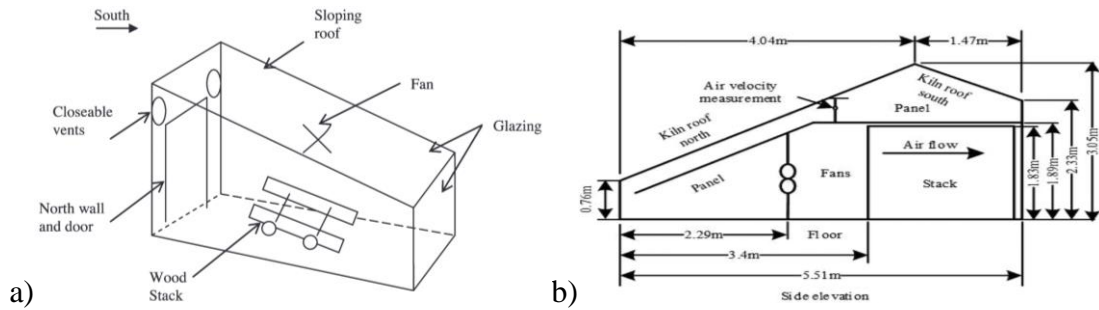
4.2.1 Elección del tipo de secador solar a usar

En función de la literatura, se han desarrollado diversos modelos matemáticos para el secado de madera pero el modelo en el cual se realizan la mayor parte de las investigaciones son los secadores activos o de circulación forzada tipo invernadero. Esta elección se la realizó debido a que el desarrollo de modelos debe partir de una representación del fenómeno de secado que ya exista debido a la complicación que supone el desarrollo de uno desde cero. Los modelos para este tipo de secador fueron desarrollados por Betayeb, et.al., (2008), Bekkioui, et. al., (2009), y Haque, et. Al.,

(2001). En la Figura 12 se observan los 2 secadores que se usaron en las tres investigaciones.

Figura 12

Secadores solares para madera tipo invernadero con circulación forzada.



Nota. Fuente: a) Betayeb, et.al., (2008); b) Haque, et. Al., (2001).

4.2.2 Evolución de la humedad de secado al aire durante el secado de la madera

Para determinar la distribución de temperatura y humedad de la madera y la humedad del aire dentro del secadero se realizó un modelo matemático simple basado en un balance global que tiene en cuenta el intercambio de transferencia entre la madera, el aire de secado, las paredes del secador y el medio ambiente.

4.2.2.1 Evolución de la humedad de secado al aire durante el secado de la madera

Esta relación viene dada por la siguiente relación (Bentayeb, F. et al., 2008):

$$\frac{dY_i}{dt} = -\frac{Q}{V}(Y_i - Y_e) - \frac{m_0}{V}\left(\frac{dX}{dt}\right) \quad \text{Ec.12}$$

Donde:

Y_i : Humedad absoluta dentro del secador (kg de vapor de agua/kg de aire)

t : Tiempo (s)

Q : Caudal de aire (m^3/s)

V: Volumen de aire del secador (m³)
Y_e: Humedad absoluta fuera del secador (kg de vapor de agua/kg de aire)
m_o: masa del aire (kg)
X: Humedad absoluta de la madera (kg de vapor de agua/kg de madera seca)

4.2.2.2 Transporte de humedad

Como la madera es un material higroscópico, absorberá la humedad del aire circundante o la perderá hasta que su contenido de humedad esté en equilibrio con el entorno. La transferencia de humedad en el secado ocurre de la madera al aire en movimiento.

La ecuación clásica para determinar el transporte de humedad en sólidos es análoga a la primera ley de Fick. Especialmente debido a la falta de homogeneidad de la madera y la multitud de mecanismos de transporte de humedad involucrados en el secado de la madera, se utiliza un método empírico para determinar la tasa de secado dX/dt , que resume todos los posibles mecanismos de transporte:

$$m_o \frac{dX}{dt} = -K_{\rho o} S (X - X_e) \quad \text{Ec.13}$$

Donde:

m_o: Masa del aire dentro del secador (Kg)
K: Coeficiente global de transferencia de calor (W/m².K)
 ρ_o : Densidad del aire (Kg/m³)
S: Superficie (m²)
X_e: Humedad absoluta de la madera (kg de vapor de agua/kg de madera seca)

4.2.2.3 Análisis de radiación solar

La entrada de energía solar al secador se deduce de un balance térmico entre la radiación solar que pasa a través de las paredes de vidrio (F_s) y la pérdida de flujo de calor a través de las paredes de vidrio, el suelo y la pared norte (en nuestro caso sería pared sur):

$$\Phi_s = tx(S_o\phi_o + S_{ea}\phi_{ea} + S_{sp}\phi_{sp} + S_v\phi_v) \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

- Φ_s : Energía sobre el secador (W)
- t: Transmitancia
- x: Ambsorbancia
- S_o : Superficie de la pared oeste (m²)
- ϕ_o : Radiación solar sobre la pared oeste (W/ m²)
- S_{ea} : Superficie sobre la pared este (m²)
- ϕ_{ea} : Radiación sobre la superficie este (W/ m²)
- S_{sp} : Superficie del techo (m²)
- Φ_{sp} : Radiación solar sobre el techo (W/ m²)
- S_v : Superficie de la pared vertical (m²)
- Φ_v : Radiación solar sobre la pared vertical (W/ m²)

Pérdida de flujo de calor a través de las paredes de vidrio, suelo y pared:

$$\Phi_{gt} = S_n K_n (T_i - T_e) + S_{sol} K_{sol} (T_i - T_e) + (S_o + S_{ea} + S_{sp} + S_v) K_g (T_i - T_e) \quad \text{Ec. 15}$$

Donde:

- ϕ_{gt} : Perdida de flujo (W)
- T_i : Temperatura interna del secador (K)
- T_e : Temperatura exterior (K)
- S_n : Superficie pared norte (m²)
- K_n : Coeficiente global de transferencia de calor de la pared norte (W/m².K)
- S_{sol} : Superficie del suelo del secador (m²)
- K_{sol} : Coeficiente global de transferencia de calor del suelo (W/m².K)
- K_g : Coeficiente global de transferencia del vidrio (W/m².K)

4.2.2.4 Balance de energía

Una vez realizados los cálculos de la energía solar sobre el secador y las pérdidas se realizó el balance de energía mediante la siguiente ecuación diferencial.

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{m_b c_{pb} + m_s + c_{ps}} x \dots$$

$$\dots \left[\Phi_s - \Phi_{gt} - Q [L_v (Y_i - Y_e) - \rho_a c_{pa} (T_i - T_e)] \right] + W_f \quad \text{Ec. 16}$$

Donde:

Lv: Calor latente de vaporización (J/Kg)
Wf: Calor disipado por el ventilador (W)

4.2.3 Valores resultantes de la solución de ecuaciones diferenciales del modelo matemático

Antes de iniciar con el desarrollo de las ecuaciones que representan el modelo de secado solar de madera se adecuaron los datos para encontrar una solución a través del software MatLab haciendo que el cálculo de los valores de humedad sea más eficiente y con un margen de error menor (Fig.13).

Figura 13

Desarrollo del modelo matemático.

```
%%% Datos radiacion sobre las paredes de vidrio

t=0.9; %%%% Transmitancia del vidrio, adimensional
b=0.7; %%%% Absorbancia del vidrio, adimensional
So=(leo*aeo); %%%% Superficie del vidrio oeste m^2
Ro=4200; %%%% Radiacion solar oeste W/m^2
Sea=So; %%%% Superficie de la pared este m^2
Rea=3980; %%%% Radiacion solar este W/m^2
Ssp=(lv*av); %%%% Superficie del vidrio del techo m^2
Rsp=5180; %%%% Radiacion sobre la superficie del techo W/m^2
Sv=(ls*as); %%%% Superficie de la pared vertical m^2
Rv=2058; %%%% Radiacion sobre la pared vertical W/m^2

D=(t*b)*((So*Ro)+(Sea*Rea)+(Ssp*Rsp)+(Sv*Rv)); %%%%ECUACION
```

4.3 Validación de datos y estimación de tiempo de secado

Mediante los análisis de las ecuaciones resultantes del modelo matemático se obtuvieron valores con un periodo de 1 segundo entre si (Bentayeb, F., Bekkioui, N., & Zeghamati, B., 2008) dando como resultado una serie de datos que representar secado solar en función del tiempo.

El software MatLab permitió la solución del sistema de ecuaciones diferenciales mediante la asignación de valores a cada variable y a la escritura de las

ecuaciones de forma lineal ya que es posible dar solución a problemas rígidos y no rígidos, ecuaciones y distintos problemas matemáticos (García, 2016).

Debido a que la heliofanía de la zona tiene un promedio anual de 1932.2 horas de sol se tomó como referencia 6 horas de radiación directa diaria para el aprovechamiento solar térmico (INHAMI, 2017), de esta forma se garantizará que exista el suministro suficiente de energía pico en el secador solar para madera que se analizó en la zona de estudio (Velasco y Cabrera, 2009).

En el Anexo 3 se detallan los valores de todas las variables que se usaron para la aplicación y validación de los resultados, los datos se obtuvieron de diversas fuentes debido a que el presente estudio se lo hizo de forma teórica.

Al aplicar el modelo matemático a las especies maderables *Alnus nepalensis* D. Don (Yépez, 2021) y *Ocotea insularis* (Meins.) Mez (Ipiales, 2021) se obtuvieron tiempos de secado menores a los establecido en los experimentos ya realizados, obteniendo tiempos de secado mediante el modelo matemático de 50.25 y 12.5 días y de 56 y 14 días respectivamente para las dos especies. Para las otras dos especies Fresno (*Fraxinus americana* L.) (Ruiz, 2020) y *Carapa amorphocarpa* W. Palacios (Sotelo, 2016) los autores recomiendan dentro de sus investigaciones realizar el secado experimental ya que no existen registros de curvas o tiempos de secado preestablecidos debido a la falta de investigación de dichas especies. A pesar de esto se estableció un porcentaje de humedad límite del 33.3 % para estas dos especies, al igual que la primera especie estudiada, y de esta forma aplicar el modelo matemático obteniendo tiempos de secado de 15.4 y 12 días respectivamente.

Tabla 14

Tiempo de secado para las 4 especies estudiadas

Especie	Tiempo de secado en días (literatura)	Número total de iteraciones	Tiempo de secado en días (modelo matemático)
----------------	--	------------------------------------	---

Alnus nepalensis		18091	
D. Don	56		51
Ocotea insularis		4511	
(Meins.) Mez	14		12.5
Fresno (Fraxinus		5551	
americana L.)			15.4
Carapa		4208	
amorphocarpa			
W. Palacios			12

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- La radiación solar medida en el lugar por medio del piranómetro LP02 mostró que los datos provenientes de la base de NREL no tienen diferencia significativa con los datos del periodo de muestreo, por cual son utilitarios en esta zona con una radiación promedio de 5.46 kWh/m²/día en el polígono de Yuyucocha.
- El modelamiento del proceso termodinámico muestra que los factores utilitarios son los flujos de energía, transporte de masa y de calor en las diferentes etapas del secado obteniendo 5 ecuaciones que modelan matemáticamente el secado de madera de las especiales tales.

- En base al modelo matemático se indica que las especies *Alnus nepalensis* D. Don, *Ocotea insularis* (Meins.) Mez, (*Fraxinus americana* L.) y *Carapa amorphocarpa* W. Palacios pueden disminuir su contenido de humedad por medio del secador solar activo en un menor tiempo que va de 5 y 2.5 días en el tiempo de secado para las dos primeras especies y un tiempo de secado total de 15.4 y 12 días para las últimas dos especies.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar mantenimiento periódico de la instrumentación encargada de registrar los valores de radiación solar para evitar errores en el almacenamiento de información.
- Se recomienda realizar la construcción de un secador solar para madera con el modelo y dimensiones detalladas en la investigación para poder determinar con un mayor de exactitud la variabilidad de temperatura, coeficientes de secado y otros valores debido que las condiciones climáticas y características químicas y físicas de las especies maderables estudiadas en el campus Yuyucocha
- Se recomienda que las tablas de secado de madera cuenten con un anexo de las tablas de calibración para cada tipo de especie estudiada detallando la relación CH/tiempo para un análisis del comportamiento del secado de la madera.

Bibliografía

- Aguilar Pozzer, J., & Guzowski, E. (2012). Materiales y Materias primas: Madera. In M. d. E. d. Argentina. (Ed.), *Materiales y Materias primas* (Primera edición ed., Vol. 3, pp. 7). Buenos Aires: Instituto Nacional de Educación Tecnológica.
- Amat, R. (2016). *ANOVA análisis de varianza para comparar múltiples medias* (Cienciadatos.net, Ed.)
- Amat, R. (2017). *Métodos de regresión no lineal: regresión polinómica, regresión splines, smooth splines y GAMs*
- Ayala, M. (2018). *Modelos matemáticos en Matlab*.
<https://www.youtube.com/watch?v=9qx0dX5gLns&t=61s>
- Bentayeb, F., Bekkioui, N., & Zeghmami, B. (2008). Modelling and simulation of a wood solar dryer in a Moroccan climate. *Renewable Energy*, 33(3), 501-506.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.03.030>
- Bohorquez, Á. (2015). *La energía solar térmica*. Centro de innovación energética.
- Bond, B., Espinoza, O., & Araman, P. (2011). Diseño y operación de secadores solares para madera. In E. d. I. Sur (Ed.).

- Cerda, J., & Cifuentes, L. (2012). Uso de curvas ROC en la investigación clínica. Aspectos teórico-prácticos *Revista Chilena de Infectología*, 29, 138-141.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0716-10182012000200003>
- Cervantes, L. (2015). *Modelización Matemática. Principios y aplicaciones* (Primera edición ed.). Benemerita Universidad Autónoma de Puebla.
- Chauhan, P. S., Kumar, A., & Nuntadusit, C. (2018). Heat transfer analysis of PV integrated modified greenhouse dryer. *Renewable Energy*, 121, 53-65.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.017>
- Chocó, A. (2017). Criterios para la elección de una prueba estadística inferencial univariante *The Psychology of Science* 1, 6.
- CONELEC. (2008). Atlas Solar del Ecuador con Fines de Generación Eléctrica. In C. d. I. Energética (Ed.), (Primera Edición ed., pp. 51). Quito, Ecuador.
- Constante, J. (2014). El Recurso Solar para la Generación Eléctrica. In U. P. Salesiana (Ed.).
- COPANT, N. P. (1972). MADERAS: Método de determinación del peso específico aparente. In (Vol. 1).
- Estrada, E., Vega, A., & Rodas, A. (2014). Sistema de control para el secador de madera a escala del laboratorio de energías alternativas y eficiencia energética de la Escuela Politécnica Nacional. In *Facultad de Ingeniería Mecánica* (Vol. 15, pp. 12). Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Farías, H. (2018). *Predicción de radiación solar por series de tiempo*.
<https://cidesi.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1024/350/1/RS-HGFT-2018.pdf>
- Fernández, J., Fernández, J., & López, J. (2001). La Bomba de Calor en el Secado de Madera Aserrada. In (Vol. 1, pp. 7).
- Flores, P., Muñoz, L., & Sánchez, A. (2019). Estudio de Potencia de Pruebas de Normalidad usando distribuciones desconocidas con distintos niveles de no Normalidad. *Perfiles*, 21, 4-11.
- FONAC. (2021). *Sistema de Estandarización de Datos Hidro climatológicos Crudos*.

- Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M. H., Alghoul, M. A., & Sulaiman, M. Y. (2010). Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 1-30.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.032>
- GAD, I. (2015). *ACTUALIZACIÓN PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEL CANTÓN IBARRA 2015-2023*. Ibarra Retrieved from http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/1060000260001_PD%20Y%20OT%20IBARRA%20UNIFICADO%20004_13-03-2015_17-34-44.pdf
- GAD, S. M. d. I. (2013). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Ibarra*. Ibarra Retrieved from http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PDOT/ZONA1/NIVEL_DEL_PDOT_CANTONAL/IMBABURA/IBARRA/INFORMACION_GAD/01%20CANTON%20IBARRA_PDOT/1%20Plan%20de%20Desarrollo%20y%20Ordenamiento%20Territorial%20del%20Cant%C3%B3n%20Ibarra/PARTE%201%20%20PLAN%20IBARRA%202031.pdf
- García, A. (2016). Solución numérica de ecuaciones diferenciales mediante ode45. Recuperado de:
http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/numerico/diferencial/diferencial_1.html
- García Garrido, J. J. (2003). *La madera y materiales derivados en la fabricación de soportes artísticos: Aportación estructural y estética* (H. T. Manuel, Ed. Primera edición ed., Vol. 1). Universidad Complutense de Madrid.
- García Ruiz, J. M. (2017). *Estudio y Construcción de una instalación de secado de madera mediante energía solar térmica*. (Publication Number 1) Universidad Carlos III de Madrid]. Madrid.
- García, V., & Watkins, M. (2011). Simulación de Sistemas de Aprovechamiento Solar Térmico Mixto con Control Automático *Aportes Científicos en PHYMATH*, 1, 79-97

- Gavilanes, A. (2020). *Smoothings Spline en Matlab*.
- Gil, D. (2013). *Caracterización del Proceso de Secado de Madera para Uso Industrial* [Universidad Tecnológica de Pereira]. Pereira, Colombia.
<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/4102/5362012G463.pdf?sequence=1>
- Giménez, A. M., & Moglia, G. (2005). *Anatomía de Madera* (P. Hernández, Ed. Segunda edición ed.).
- Grossi Gallegos, H. (2001). *Medición de la radiación solar en la superficie de la Tierra: instrumental y errores asociados* https://www.researchgate.net/publication/302927153_Medicion_de_la_radiacion_solar_en_la_superficie_de_la_Tierra_instrumental_y_errores_a_sociados
- Gutiérrez, F. (2014). *Predicción espacio-temporal de la irradiancia solar global a corto plazo en España mediante geoestadística y redes neuronales artificiales*. Universidad Politécnica de Madrid]. Madrid, España.
http://oa.upm.es/34145/1/Federico_Vladimir_Gutierrez_Corea.pdf
- Haque, M., & Langrish, T. (2014). Stack-Wide Effects in the Modelling of SolarKilns for Drying. *Drying Technology*, 1, 99-114.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1081/DRT-100001354>
- Haro Velasteguí, A. X. (2017). *Modelo matemático para la simulación del funcionamiento de un secador solar mixto para el altiplano ecuatoriano*. Editorial Universitaria.
- Hasan, M., & Langrish, T. A. G. (2016). Time-valued net energy analysis of solar kilns for wood drying: A solar thermal application. *Energy*, 96, 415-426.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.081>
- Hidalgo Broncano, W. O. (2013). *Diseño de una cámara de secado de madera para fábrica de muebles* [Hidalgo Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Riobamba, Ecuador.
- Hukseflux, (2008). USER MANUAL LP02. Second class pyranometer. In.
- IBM. (2011). Manual del usuario del sistema básico de IBM SPSS Statistics 20. In.

- INEC. (2010). Cantón Ibarra. In F. d. P. d. I. N. Unidas (Ed.), (Vol. 1, pp. 4).
- INHAMI. (2017). Anuario meteorológico N° 53-2013. In I. N. d. M. e. Hidrología (Ed.), (Vol. 53).
- Ipiales, C. (2021). *DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ORGANOLÉPTICAS, PROPIEDADES FÍSICAS Y DE TRABAJABILIDAD DE Ocotea insularis (Meins.) Mez, EN LA PARROQUIA LA CAROLINA – IMBABURA*. Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador.
- Jaluria, Y. (2007). *Desing and Optimization of Thermal Systems* (L. L. Faulkner, Ed. Segunda Edición ed., Vol. 1).
- Kumar, M., Sansaniwal, S. K., & Khatak, P. (2016). Progress in solar dryers for drying various commodities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 346-360. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.158](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.158)
- Leon, W. (2010). Anatomía y densidad o peso específico de la madera Anatomy and specific gravity of wood. *Revista Forestal Venezolana*, 54, 67-76.
- López Cózar, J. M. (2006). *Energía Solar Térmica* (I. p. I. D. y. A. d. energía, Ed. Vol. 4).
- López de Ponce, A. (2013). *Necesidades energéticas y propuestas de instalaciones solares (UF0213)*. IC Editorial.
- Masias Rivera, L. E. (2019). *Diseño de un secador solar directo de circulación natura tipo invernadero para cacao* Universidad de Piura]. Piura.
- MathWorks. (2020). *Model-Based Desing with Simulink*. Retrieved 26/01/2021 from <https://la.mathworks.com/help/simulink/gs/model-based-design.html>
- Mazorra, L. (2015). *Modelo Predictivo de Radiación Solar mediante técnicas de Machine Learnig. Aplicación a la isla de Gran Canaria* Universidad de Las Palmas de Gran Canaria]. Gran Canaria.
file:///C:/Users/HP/AppData/Local/Temp/0552257_00000_0000.pdf
- McMiller, J., & Wengert, E. (1978). Drying Eastern Hardwood Lumber. In F. P. L. F. S. U. S. D. o. Agriculture (Ed.), *Agriculture Handbook*.

- MIDUVI, M. d. D. U. y. V. (2014). *Norma Ecuatoriana de la Construcción: Estructuras de madera*. Quito, Ecuador Retrieved from <https://online.portoviejo.gob.ec/docs/nec8.pdf>
- Molina, G., & Rodrigo, M. F. (2019). Estadística descriptiva en Psicología. In U. d. Valencia (Ed.), (pp. 1-18).
- Moscoso, J., & Gutiérrez, C. (2009). Técnicas de Secado de Madera. In *Competencias básicas para la producción industrial del mueble de madera* (Primera edición ed., Vol. 1, pp. 7-63). Lima, Perú: Centro de Innovación Tecnológico de la Madera (CITEMadera).
- Nandwani, S. (2005). Energía Solar: Conceptos y aplicación. In U. N. H. d. C. Rica (Ed.), (Vol. I, pp. 26). Heredia, Costa Rica: Laboratorio de Energía Solar, Departamento de Física
- Novoa, L. (2006). MANUAL DE BUENAS PRACTICAS DE MANUFACTURA PARA EL SECADO NATURAL Y ARTIFICIAL, DE MADERA ASERRADA; ACORDE A LOS ESTÁNDARES EXPRESADOS EN EL PROYECTO DE NORMAS TÉCNICAS. In (Vol. 1, pp. 71). Lima-Perú.
- Otzen, T., & Manterola, C. (2017). Técnicas de muestreo sobre una población a estudio. *Int. J. Morphol*, 1, 227-232.
- Parra, A., Mejía, G., & Oliveros, C. (2008). Modelamiento y simulación matemática en el secado mecánico de café pergamino. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12, 415-427.
- Paz Fong, J. F. (2008). *Determinación de la composición química de la madera obtenida del primer clareo en árboles de Melina (Gmelina arborea Roxb), de una plantación proveniente del departamento de Izabal* (Publication Number 1) Universidad de San Carlos de Guatemala]. San Carlos, Guatemala.
- Perea-Moreno, A.-J., Juaidi, A., & Manzano-Agugliaro, F. (2016). Solar greenhouse dryer system for wood chips improvement as biofuel. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1233-1241.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.036>

- Pereira González, A. (2010). *Análisis Predictivo de Datos Mediante Técnicas de Regresión Estadística* Universidad Complutense de Madrid]. Madrid. https://eprints.ucm.es/id/eprint/11389/1/Analisis_Predictivo_de_Datos.pdf
- Pomares, L. (2012). *Análisis y predicción de series temporales de irradiancia solar global mediante modelos estadísticos* Universidad de Complutense de Madrid]. Madrid. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/16446/1/T33865.pdf>
- Pérez Carrasco, D. (2015). Medida de la Radiación Solar. In *Procedimiento de Mantenimiento y Calibración de Estación Radiométrica* (pp. 13-42).
- Pérez Peña, N., Valenzuela, L., Diaz-vaz, J. E., & Ananías, R. (2011). Predicción del contenido de humedad de equilibrio de la madera en función del peso específico de la pared celular y variables ambientales. *Maderas, ciencia y tecnología*, 13, 253-266. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2011000300002>
- Ramírez, A., & Polack, A. M. (2019). Estadística inferencial. Elección de una prueba estadística no paramétrica en investigación científica. *Horizonte de la ciencia*, 10, 119-208. <https://doi.org/doi.org/10.26490/uncp.horizonteciencia.2020.19.597>
- Reyes, M., Vargas, Y., Burgos, F., & Navarrete, S. (2018). *Estadística, una herramienta para la Gestión* (C. d. i. y. D. P. CIDEPRO, Ed. Primera edición ed.).
- Roa, G., & Ortega, D. (2011). *Diseño y Construcción de un Secador Solar por Convección de Aire Caliente Automatizado de Pequeña Escala, para el Secado de café para la Universidad Nacional de Loja*. Universidad Nacional de Loja]. Loja, Ecuador. <http://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/12368/1/Ortega%20Torres%20Diego%20Bladimir%20Roa%20Mar%C3%ADn%20Germ%C3%A1n%20Leonardo.pdf>
- Rodríguez, C. (2015). *Determinación del recurso solar sobre fachadas verticales en Castilla y León mediante métodos de interpolación*

https://riubu.ubu.es/bitstream/handle/10259/5120/Rodr%C3%ADguez_Amigo.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Rodríguez, R. J. (2011). Teoría básica del muestreo. In (pp. 1-37).
- Rodríguez Suárez, C. D. (2017). *Estudio del proceso de secado de madera mediante el uso de hornos a gas en la empresa Jam Maderas* (Publication Number 1) Universidad Tecnológica de Pereira]. Pereira.
- Romero, C. (2013). *Simulación de un sistema de secado asistido con energía solar* Centro de Investigación en Materiales Avanzados]. Chihuahua, México.
<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/264/1/Tesis%20de%20Maestria%20de%20Claudia%20Karely%20Romero%20Perez.pdf>
- Ruíz Castillo, J. P. (2020). *Propiedades físicas, mecánicas y trabajabilidad de Fresno (Fraxinus americana L.) proveniente de la estación experimental "La Favorita", Santo Domingo de los Tsáchilas* Universidad Técnica del Norte]. Ibarra, Ecuador.
<http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/10121/2/03%20FOR%20294%20TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf>
- Salas, C., Moya, R., & Córdoba, R. (2008). *Diseño y Construcción de un Secador Solar para Madera* (Tecnología de Productos Forestales, Issue. <file:///C:/Users/HP/Downloads/Dialnet-DISENOYCONSTRUCCIONDEUNSECADORSOLARPARAMADERA-5293047.pdf>
- Sarmiento, E. (2012). Predicción con series de tiempo y regresión. In *Tecnología de sistemas para Pymes*.
- Sengupta, M., Polo, J., Gueymard, C., & Xie, Y. (2017). Modeling Solar Radiation—Current Practices In *Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications: Second Edition* (Second Edition ed., Vol. I, pp. 88-115).
- Simo-Tagne, M., Zoulalian, A., Rémond, R., & Rogaume, Y. (2018). Mathematical modelling and numerical simulation of a simple solar dryer for tropical wood

- using a collector. *Applied Thermal Engineering*, 131, 356-369.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.014>
- SOLAR, G. (2018). Sistemas solares de aire caliente para el secado de productos agrícolas en Chile. In *Introducción* (pp. 474). Chile.
- Solís Rodríguez, L. E., Cerón Cardeña, M. A., & González Ahumada, I. (2006). Diseño y operación de una estufa solar para secar madera.
- Song, M., An, Q., Zhang, W., Wang, Z., & Wu, J. (2012). Environmental efficiency evaluation based on data envelopment analysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 4465-4469.
- Sotelo, E. (2016). *PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y DE TRABAJABILIDAD DE Carapa amorphocarpa W. Palacios, EN EL NOROCCIDENTE DEL ECUADOR*. Ibarra, Ecuador.
- Vaca Revelo, D. G. (2018). *Validación de datos satelitales de radiación solar utilizando mediciones terrestres para el Ecuador* (Publication Number 1) [Universidad Politécnica Nacional del Ecuador]. Quito, Ecuador.
- Vega, J. (2016). *Generación de Series Sintéticas de Recursos Renovables variables para estudios de operación y planificación de sistemas eléctricos* [Universidad de Chile].
<http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/140413/Generacion-de-series-sinteticas-de-recursos-renovables-variables-para-estudios-de-operacion-y-planificacion-de-sistemas-electricos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vignote Peña, S. (2016). Maderas aserradas I: Características y propiedades *ResearchGate*, 1-42.
- Vásquez Calero, F., Urdiales Flores, L., Espinoza Abad, J., & García Renté, M. (2015). Energía Solar en el Ecuador. In M. R. Peláez Samaniego & J. L. Espinoza Abad (Eds.), *Energías renovables en el Ecuador. Situación actual, tendencias y perspectivas* (Vol. I, pp. 330-383). Universidad de Cuenca.

- Vásquez Correa, Á. M., & Ramírez Arango, A. M. (2011). Curso anatomía e identificación de maderas. In U. N. d. Colombia (Ed.), (Primera edición ed., Vol. 1, pp. 70). Medellín: Laboratorio de productos forestales.
- Vásquez, G. (2017). *Modelación matemática, Simulación, Análisis Paramétrico y Financiero de una cámara de secado solar para cacao* Universidad de Piura]. Piura, Perú.
https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3234/IME_227.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Vélez, A., Vergara, E., Barraza, W., & Agudelo, D. (2015). Evaluación de un modelo estadístico para estimar la radiación solar en Magdalena, Colombia. *Tecno Lógicas*, 18, 35-44.
- Wang, K., Wei, Y.-M., & Zhang, X. (2012). A comparative analysis of China's regional energy and emission performance: Which is the better way to deal with undesirable outputs? *Energy Policy*, 46, 574-584.
- WorldClim. Free climate data for ecological modeling and GIS. In.
- Yang, D. (2018). A Correct Validation of the National Solar Radiation Data Base (NSRDB). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97, 152-155.
<https://doi.org/doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.023>
- Yépez, E. (2021). *EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL SECADO DE MADERA DE *Alnus nepalensis* D. Don, PROVENIENTE DE LA ZONA DE INTAG*. Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador.
- Zavala Zavala, D. (2000). Secado de maderas tropicales en estufas convencionales. *Madera y Bosques*.6(1), 41-54.

ANEXOS

Anexo 1. Lugar de Instalación del Piranómetro Hukseflux modelo LP02



Anexo 2. Muestra de los valores obtenidos mediante el smoothing spline

Fecha y Hora	2016	2017	2018	2019	2020
6:30	36	33	20	42	8
7:0	146	138	72	150	18
7:30	170	243	99	277	102
8:0	251	88	103	407	156
8:30	526	213	191	532	179
9:0	642	501	146	649	248
9:30	747	245	139	752	388
10:0	834	464	152	841	551
10:30	909	903	165	914	699
11:0	727	708	137	969	785
11:30	1005	827	215	1006	711

12:0	1025	611	284	1022	440
12:30	1024	632	229	1022	502
13:0	1002	407	269	999	235
13:30	963	692	270	920	272
14:0	903	698	253	863	311
14:30	516	827	289	752	338
15:0	736	580	306	684	454
15:30	632	550	208	596	329
16:0	514	296	112	476	242
16:30	391	394	74	383	177
17:0	264	267	80	266	125
17:30	141	144	58	143	36
18:0	37	39	16	41	10
6:30	10	19	18	33	7
7:0	45	84	67	140	26
7:30	85	160	118	207	79
8:0	188	313	180	305	154
8:30	236	397	377	521	182
9:0	286	295	464	562	243
9:30	390	341	480	658	328
10:0	472	440	573	834	436
10:30	190	419	500	908	528
11:0	575	619	484	964	653
11:30	301	806	685	1003	896
12:0	435	798	699	1022	951
12:30	173	1018	773	946	990
13:0	350	745	847	886	971
13:30	67	961	452	816	932
14:0	130	742	228	624	692
14:30	84	659	329	725	317
15:0	50	662	176	577	128
15:30	35	530	168	562	122
16:0	106	340	140	515	230
16:30	81	260	136	399	169
17:0	55	178	180	261	111
17:30	29	97	68	148	23
18:0	8	27	19	44	12
6:30	29	32	25	15	6

Valores representativos de la predicción de datos correspondientes a dos días de predicciones.

Anexo 3. Variables del modelo matemático.

Variables	Unidades	Símbolo	Valor	Fuente
Caudal de aire	m ³ /s	Q	0.16	Taylor, 1985
Volumen de aire del secador	m ³	V	1.5	Bentayeb, 2008
Humedad absoluta fuera del secador	kg de vapor de agua/kg de aire	Y _e	0.15	Arias, 2016
Masa del madera	kg	m _o	217.18	Yépez, 2021
Masa del aire dentro del secador	kg	m _o	12.7	Bentayeb, 2008
Coefficiente global de transferencia de calor	W/m ² .K	K	5.899	
Densidad del aire	Kg/m ³	ρ_o	1010	Taylor, 1985
Transmitancia	Adimensional	t	0.9	Haque, 2001
Ambsorbancia	Adimensional	x	0.7	Taylor, 1985
Superficie de la pared oeste	m ²	S _o	5.625	Bentayeb, 2008
Radiación solar sobre la pared oeste	W/ m ²	ϕ_o	4200	NREL
Superficie sobre la pared este	m ²	S _{ea}	5.625	Bentayeb, 2008
Radiación sobre la superficie este	W/ m ²	ϕ_{ea}	3980	NREL
Superficie del techo	m ²	S _{sp}	4.716	Bentayeb, 2008
Radiación solar sobre el techo	W/ m ²	Φ_{sp}	5180	NREL
Superficie de la pared vertical	m ²	S _v	4.05	Bentayeb, 2008
Radiación solar sobre la pared vertical	W/ m ²	Φ_v	2058	NREL
Temperatura interna del secador	K	T _i	290	Taylor, 1985
Temperatura exterior	K	T _e	289.45	INHAMI
Superficie pared norte	m ²	S _n	4.41	Bentayeb, 2008
Coefficiente global de transferencia de calor de la pared norte	W/m ² .K	K _n	0.85	Taylor, 1985
Superficie del suelo del secador	m ²	S _{sol}	4.5	Bentayeb, 2008
Coefficiente global de transferencia de calor del suelo	W/m ² .K	K _{sol}	1.28	Yépes, 2021
Coefficiente global de transferencia del vidrio	W/m ² .K	K _g	5.7	Taylor, 1985
Calor latente de vaporización	J/kg	L _v	2406000	Taylor, 1985
Calor disipado por el ventilador	W	W _f	0.019	Bentayeb, 2008

Anexo 4. Código fuente el modelo matemático.

```
%%% Datos %%%  
  
Densidad1=640; %%%% Densidad base humeda de la madera Kg/m^3  
X1=63.82 ; %%%% humedad absoluta de la madera inicial kg/kg  
mo=217.1818; %%%% Masa madera del secador kg (Bentayeb, 2008)  
  
%%% Superficie de probeta %%%  
l=1.2; %%% largo de la probeta m  
a=0.1; %%% ancho de la probeta m  
e=0.025; %%% grosor de la probeta m  
  
%%% Dimensiones del techo de vidrio  
  
lv=2.62; %%%% Largo del techo  
av=1.8; %%%% Ancho del techo  
ev=0.06; %%%% Grosor del vidrio  
  
%%% Dimensiones de los lados Este y Oeste de vidrio  
  
leo=2.5; %%%% Largo de la pared este y oeste  
aeo=2.25; %%%% Ancho de la pared este y oeste  
eao=0.06; %%%% Grosor de la pared este y oeste  
  
%%% Dimensiones de la pared sur  
  
ls=2.25; %%%% Largo de la pared sur  
as=1.8; %%%% Ancho de la pared sur  
es=0.06; %%%% Grosor de la pared sur  
  
%%% Dimensiones de la pared norte  
  
ln=2.45; %%%% Largo de la pared norte  
an=1.8; %%%% Ancho de la pared norte  
en=0.1; %%%% Grosor de la pared norte
```



```

%%%% Dimensiones del suelo

lg=2.5; %%% Largo del suelo
ag=1.8; %%% Ancho del suelo
eg=0.1; %%% Grosor del suelo

format short

%while
  for i=1:5000

      %%% Tasa de secado

      %%% Datos tasa de secado

K=5.899; %%% coeficiente de transferencia de la humedad en la
madera W/m^2.K
S=2*((1*a)+(e*a)+(1*e)); %%% Superficie total de la probeta m^2

      Xe=X1-0.00008;
      X2=((-K*Densidad1*S)*(X1-Xe))/mo)+X1; % ECUACION
      X1=X2;

      %%% Evolucion de la humedad

      %%% Datos evolucion de la humedad

Q=0.16; %%% caudal volumetrico m^3/s (Taylor, 1985)
V=1.5; %%% volumen del secador m^3 (Bentayeb, 2008)
Ye=0.15; %%% humedad absoluta fuera del secador kg/kg (Arias, 2016)
Yi1=0.14; %%% humedad absoluta inicial dentro del secador (Haque,2011)
mo=12.7; %%% Masa de aire dentro del secador kg (Bentayeb, 2008)
Xo=1.03; %%% Humedad absoluta de la madera Kg/kg

      Yi2=((-Q/V)*(Yi1-Ye))-((mo/V)*(X2-X1))+Yi1; %%% ECUACION

      %%% Velocidad de secado

      %%% Datos Velocidad de secado

```

```
f=1; %%% Coeficiente de saturacion, se toma siempre un valor aproximado a 1
(Taylor 1985)
```

```
%X2b=(-(f*K*(X1-Xe))/e)+X1 %%% ECUACION PENDIENTE
```

```
%% Radiacion sobre las paredes de vidrio
```

```
%% Datos radiacion sobre las paredes de vidrio
```

```
t=0.9; %%% Transmitancia del vidrio, adimensional
```

```
b=0.7; %%% Absorbancia del vidrio, adimensional
```

```
So=(leo*aeo); %%% Superficie del vidrio oeste m^2
```

```
Ro=4200; %%% Radiacion solar oeste W/m^2
```

```
Sea=So; %%% Superficie de la pared este m^2
```

```
Rea=3980; %%% Radiacion solar este W/m^2
```

```
Ssp=(lv*av); %%% Superficie del vidrio del techo m^2
```

```
Rsp=5180; %%% Radiacion sobre la superficie del techo W/m^2
```

```
Sv=(ls*as); %%% Superficie de la pared vertical m^2
```

```
Rv=2058; %%% Radiacion sobre la pared vertical W/m^2
```

```
D=(t*b)*((So*Ro)+(Sea*Rea)+(Ssp*Rsp)+(Sv*Rv)); %%% ECUACION
```

```
%% Radiacion global sobre el piso y la pared norte
```

```
%% Datos de radiacion global sobre el piso y la pared
```

```
Sn=(ln*an); %%% Superficie de la pared norte
```

```
Kn=0.85; %%% Coeficiente de transferencia de calor W/m^2.K
```

```
Ti=290; %%% Temperatura interior de la pared K
```

```
Te=289.45; %%% Temperatura exterior de la pared K
```

```
Ssol=(lg*ag); %%% Superficie del suelo m^2
```

```
Ksol=1.28; %%% Coeficiente de transferencia de calor del suelo W/m^2.K
```

```
Kg=5.7; %%% Coeficiente de transferencia de calor del vidrio W/m^2.K (Tecno
House, web)
```

```
Dg=((Sn*Kn)*(Ti-Te))+((Ssol*Ksol)*(Ti-Te))+((So+Sea+Ssp+Sv)*Kg*(Ti-Te));
%% ECUACION
```

```
%% Balance de Energia
```

```
%% DATos del balance de energia
```

```

mb=334; %%% Masa de la madera Kg
Cpb=1760; %%% Calor especifico de la madera J/Kg.K
ms=750; %%% Masa de la estructura del secador Kg
Cps=840; %%% Calor especifico de la estructura J/Kg.K
Lv=2406000; %%% Calor latente de vaporizacion J/Kg
Densidad2=1.41; %%% Densidad del aire Kg/m^3
Cpa=1010; %%% Calor especifico del aire J/Kg.K
Wf=0.019; %%% Calor discipado por el ventilador W
Ti1=290;
Yi=Yi2;

P1=(1/((mb*Cpb)+ms+Cps));
P2=D-Dg;
P3=(Lv*(Yi-Ye)-((Densidad2*Cpa)*(Ti1-Te)));

T2=(P1*(P2-(Q*P3)))+Wf+Ti1; %%% ECUACION
Yi1=Yi2;
D=D;
Dg=Dg;
X2=X2

end

%end

```

Anexo 5. Muestra de los resultados del secado de madera al aplicar el modelo matemático.

Especie	Valores			
	Alnus nepalensis D. Don	Ocotea insularis (Meins.) Mez	Fresno (Fraxinus americana L.)	Fresno (Fraxinus americana L.)
	102.9998	66.0096	65.3797	63.8196
	102.9959	66.0023	65.3739	63.8123
	102.9921	65.9951	65.3681	63.8051
	102.9882	65.9878	65.3623	63.7978
	102.9844	65.9806	65.3565	63.7906
	102.9805	65.9733	65.3508	63.7833
	102.9767	65.9661	65.345	63.7761
	102.9728	65.9588	65.3392	63.7688
	102.9689	65.9515	65.3334	63.7615
	102.9651	65.9443	65.3276	63.7543
	102.9612	65.937	65.3219	63.747
	102.9574	65.9298	65.3161	63.7398
	102.9535	65.9225	65.3103	63.7325
	102.9497	65.9153	65.3045	63.7253
	102.9458	65.908	65.2987	63.718
	102.942	65.9008	65.293	63.7108
	102.9381	65.8935	65.2872	63.7035
	102.9343	65.8863	65.2814	63.6963
	102.9304	65.879	65.2756	63.689
	102.9266	65.8718	65.2698	63.6818
	102.9227	65.8645	65.2641	63.6745
	102.9189	65.8573	65.2583	63.6673
	102.915	65.85	65.2525	63.66
	102.9111	65.8427	65.2467	63.6527
	102.9073	65.8355	65.2409	63.6455
	102.9034	65.8282	65.2352	63.6382
	102.8996	65.821	65.2294	63.631
	102.8957	65.8137	65.2236	63.6237
	102.8919	65.8065	65.2178	63.6165
	102.888	65.7992	65.212	63.6092
	102.8842	65.792	65.2063	63.602
	102.8803	65.7847	65.2005	63.5947

102.8765	65.7775	65.1947	63.5875	
102.8726	65.7702	65.1889	63.5802	
102.8688	65.763	65.1831	63.573	
102.8649	65.7557	65.1774	63.5657	
102.8611	65.7485	65.1716	63.5585	
102.8572	65.7412	65.1658	63.5512	
102.8533	65.7339	65.16	63.5439	
102.8495	65.7267	65.1542	63.5367	
102.8456	65.7194	65.1485	63.5294	
102.8418	65.7122	65.1427	63.5222	
102.8379	65.7049	65.1369	63.5149	
102.8341	65.6977	65.1311	63.5077	
102.8302	65.6904	65.1253	63.5004	
102.8264	65.6832	65.1196	63.4932	
102.8225	65.6759	65.1138	63.4859	
102.8187	65.6687	65.108	63.4787	
102.8148	65.6614	65.1022	63.4714	
102.811	65.6542	65.0964	63.4642	
...	
Total de iteraciones	18091	4511	5551	4208
Tiempo de secado (días)	50.2527778	12.5305556	15.4194444	11.6888889