

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA QUÍMICA**



**“MODELAMIENTO DEL PROCESO DE SECADO DE  
SEMILLA DE UVA QUEBRANTA (*Vitis vinifera*) DE ICA  
USANDO SECADOR ROTATORIO CON AIRE CALIENTE A  
NIVEL PILOTO”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERIA  
QUIMICA**

**AUTORES: VICTOR HUGO AVALOS JACOBO**

**MIGUEL ANGEL CARRILLO HERNANDEZ**

**Asesor: DR. LUIS AMERICO CARRASCO VENEGAS**

**Callao, 2019**

## **HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO**

DR. OSCAR JUAN RODRIGUEZ TARANCO	PRESIDENTE
DR. JULIO CESAR CALDERON CRUZ	SECRETARIO
DR. JUAN TAUMATURGO MEDINA COLLANA	MIEMBRO
MG. CESAR GUTIERREZ CUBA	MIEMBRO

ASESOR: Dr: LUIS AMERICO CARRASCO VENEGAS

N° de Libro 01 Folio N° 007

N° de Acta 005

Fecha de aprobación de Tesis: 26 de Abril del 2019

Resolución de Sustentación de la Unidad de Posgrado N°004 - 2019-CD-UPG-FIQ-UNAC

## **DEDICATORIA**

*A mis padres Esperanza y Víctor como un homenaje Póstumo a su abnegada entrega por un futuro mejor. También dedico mi tesis de maestría con mucho amor a Charo, Sandra, Paolo, Cintia, Brisa, Santino.*

**VICTOR HUGO AVALOS JACOBO**

*A mis hijas Andrea y Luciana que fueron la motivación para lograr este objetivo.*

*A mis padres Julia y Humberto, a mi hermana Carmen Rosa y a mi esposa Esperanza por el apoyo que me brindaron en todo momento.*

**MIGUEL ANGEL CARRILLO HERNANDEZ**

## **AGRADECIMIENTO**

*A todas las personas de buena voluntad que nos apoyaron en el desarrollo de la presente Tesis de Maestría, ya sea con los equipos, reactivos, pepitas de uva, bibliografía, conocimientos y de manera muy especial un reconocimiento a nuestro asesor Dr. Luis Carrasco Venegas por su orientación y motivación.*

## INDICE

TABLA DE CONTENIDO .....	3
RESUMEN .....	9
ABSTRACT .....	10
I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN .....	10
1.1 Identificación del Problema .....	11
1.2 Formulación del problema .....	15
1.2.1 Problema general .....	15
1.2.2 Problemas específicos .....	15
1.3 Objetivos de la Investigación .....	15
1.3.1 Objetivo general .....	15
1.3.2 Objetivos específicos .....	15
1.4 Justificación .....	16
1.4.1 Justificación Ambiental .....	16
1.4.2 Justificación Tecnológica .....	16
1.4.3 Justificación Económica .....	17
1.4.4 Justificación Práctica .....	17
II. MARCO TEÓRICO .....	19
2.1 Antecedentes del estudio .....	19
2.2 Bases científicas .....	24
2.2.1 Métodos de secado .....	24
2.2.2 Equipos de secado .....	26
2.2.3 Mecanismo de transferencia de calor y masa .....	29
2.2.4 Mecanismo de transferencia de calor .....	31
2.2.5 Cinética de secado .....	33
2.2.6 Carta psicrométrica de humedad .....	37
2.2.7 Modelamiento .....	40
2.3 Definición de términos básicos .....	44
III. VARIABLES E HIPÓTESIS .....	47
3.1 Definición de Variables .....	47
3.1.1 Variable dependiente .....	47
3.1.2 Variables independientes .....	47
3.2 Operacionalización de las Variables .....	47
3.3 Definición de Hipótesis .....	49

3.3.1 Hipótesis General.....	49
3.3.2 Hipótesis Específicas.....	49
IV. METODOLOGÍA.....	50
4.1 Tipo de investigación.....	50
4.2 Diseño de la Investigación.....	50
4.3 Población y muestra.....	57
4.3.1 Determinación del universo.....	57
4.3.2 Determinación de la muestra.....	57
4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	59
4.4.1 Materiales y equipos.....	59
4.5 Procedimientos de recolección de datos.....	67
4.6 Procesamiento estadístico y análisis de datos.....	72
V. RESULTADOS.....	74
5.1 Resultados para la determinación del modelo del proceso de secado en el secador rotatorio metálico.....	76
5.2 Modelos matemáticos aplicados a la cinética de secado.....	98
5.3 Esfericidad de las pepitas de uva.....	107
5.4 Modelo difusivo.....	111
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	116
6.1 Contrastación de hipótesis con los resultados.....	116
6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares.....	116
VII. CONCLUSIONES.....	118
VIII. RECOMENDACIONES.....	121
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122

ANEXOS.....	
ANEXO 1 MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	128
ANEXO 2 MODELO LINEAL PROCESO DE SECADO EN SECADOR ROTATORIO METALICO.....	130
ANEXO 3 MODELO SEMILOGATITMICO PROCESO DE SECADO EN SECADOR ROTATORIO METALICO.....	131
ANEXO 4 MODELO HIPERBOLICO PROCESO DE SECADO EN SECADOR ROTATORIO METALICO.....	132
ANEXO 5 MODELO INVERSO PROCESO DE SECADO EN SECADOR ROTATORIO METALICO.....	133
ANEXO 6 MODELO EXPONENCIAL PROCESO DE SECADO EN SECADOR ROTATORIO METALICO.....	134
ANEXO 7 REPRESENTACION DEL MODELO DE NEWTON.....	135
ANEXO 8 REPRESENTACION DEL MODELO DE PAGE.....	136
ANEXO 9 REPRESENTACION DEL MODELO DE HENDERSON.....	137
ANEXO 10 REPRESENTACION DEL MODELO LOGARITMICO.....	138
ANEXO 11 REPRESENTACION DEL MODELO PELEG.....	139
ANEXO 12 REPRESENTACION DEL MODELO DOS TERMINOS.....	140
ANEXO 13 REPRESENTACION DEL MODELO DOS TERMINOS EXPONENCIAL.....	141
ANEXO 14 REPRESENTACION DEL MODELO HENDESON Y PABIS MODIFICADO.....	142
ANEXO 15 REPRESENTACION DEL MODELO VERMA.....	143
ANEXO 16 REPRESENTACION DEL MODELO MIDILLI.....	144

## TABLA DE CONTENIDO

### Tablas

1.1 DISTRIBUCION DE LAS HECTAREAS DE UVA PISQUERA.....	12
2.1 SISTEMA DE ECUACIONES DIFERENCIALES PARA EL DESARROLLO DEL MODELO DIFUSIVO EN EL INTERIOR DE LA PEPITA DE UVA.....	43
4.1 FACTORES Y NIVELES PARA EL EXPERIMENTO.....	52
4.2 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	53
4.3 DISEÑO EXPERIMENTAL TAGUCHI PARA EL PROCESO DE SECADO..	54
4.4 RESUMEN DE EXPERIMENTOS REALIZADOS PARA LA DETERMINACION DE LA CINETICA DEL SECADO.....	55
4.5 ANÁLISIS DE MALLAS DE LAS SEMILLAS DE UVA QUEBRANTA.....	69
5.1 HUMEDAD DE SALIDA DE LA PRIMERA CORRIDA DE EXPERIMENTOS.....	76
5.2 HUMEDAD DE SALIDA DE LA SEGUNDA CORRIDA DE EXPERIMENTOS.....	77
5.3 HUMEDAD DE SALIDA DE LA TERCERA CORRIDA DE EXPERIMENTOS.....	77
5.4 RESUMEN DE LOS VALORES PROMEDIO DE LOS EXPERIMENTOS.....	78
5.5 RESUMEN DE REGRESION LINEAL DE LOS MODELOS DEL PROCESO DE SECADO.....	79
5.6 REGRESION LINEAL DEL MODELO POTENCIAL PARA EL PROCESO DE SECADO EN SECADOR ROTATORIO METALICO.....	81
5.7 COMPARACION DE LOS VALORES EXPERIMENTALES DE LA HUMEDAD DE SALIDA VS EL VALOR CALCULADO CON EL MODELO DEL PROCESO.....	82
5.8 PRUEBA DE SECADO A 70°C CON FLUJO DE 350 L/min DE AIRE CALIENTE Y 5g DE MUESTRA.....	85
5.9 PRUEBA DE SECADO A 70°C CON FLUJO DE 350 L/min DE AIRE CALIENTE Y 3g DE MUESTRA.....	85
5.10 PRUEBA DE SECADO A 60°C CON FLUJO DE 350 L/min DE AIRE CALIENTE Y 3g DE MUESTRA.....	86
5.11 PRUEBA DE SECADO A 60°C CON FLUJO DE 350 L/min DE AIRE CALIENTE Y 5g DE MUESTRA.....	86
5.12 PRUEBA DE SECADO A 80°C CON FLUJO DE 350 L/min DE AIRE CALIENTE Y 3g DE MUESTRA.....	87

5.13 PRUEBA DE SECADO A 80°C CON FLUJO DE 350 L/min DE AIRE CALIENTE Y 5g DE MUESTRA.....	87
5.14 PRUEBA DE SECADO A 80°C CON FLUJO DE 500 L/min DE AIRE CALIENTE Y 5g DE MUESTRA.....	88
5.15 PRUEBA DE SECADO A 80°C CON FLUJO DE 500 L/min DE AIRE CALIENTE Y 3g DE MUESTRA.....	88
5.16 PRUEBA DE SECADO A 70°C CON FLUJO DE 500 L/min DE AIRE CALIENTE Y 3g DE MUESTRA.....	89
5.17 PRUEBA DE SECADO A 70°C CON FLUJO DE 500 L/min DE AIRE CALIENTE Y 5g DE MUESTRA.....	89
5.18 PRUEBA DE SECADO A 60°C CON FLUJO DE 500 L/min DE AIRE CALIENTE Y 3g DE MUESTRA.....	90
5.19 PRUEBA DE SECADO A 60°C CON FLUJO DE 500 L/min DE AIRE CALIENTE Y 5g DE MUESTRA.....	90
5.20 TABLA DE SECADO DE LA MUESTRA A FLUJO DE 350 L/min PARA a) 3g y b) 5g A LA TEMPERATURA DE 60°C.....	92
5.21 TABLA DE SECADO DE LA MUESTRA A FLUJO DE 350 L/min PARA a) 3g y b) 5g A LA TEMPERATURA DE 70°C.....	93
5.22 TABLA DE SECADO DE LA MUESTRA A FLUJO DE 350 L/min PARA a) 3g y b) 5g A LA TEMPERATURA DE 80°C.....	94
5.23 TABLA DE SECADO DE LA MUESTRA A FLUJO DE 500 L/min PARA a) 3g y b) 5g A LA TEMPERATURA DE 60°C.....	95
5.24 TABLA DE SECADO DE LA MUESTRA A FLUJO DE 500 L/min PARA a) 3g y b) 5g A LA TEMPERATURA DE 70°C.....	96
5.25 TABLA DE SECADO DE LA MUESTRA A FLUJO DE 500 L/min PARA a) 3g y b) 5g A LA TEMPERATURA DE 80°C.....	97
5.26 RESUMEN DE LOS COEFICIENTES DE CORRELACION PARA LOS DIFERENTES MODELOS EN CADA EXPERIMENTACION.....	105
5.27 VELOCIDAD DE SECADO CON 5 g.....	106
5.28 VELOCIDAD DE SECADO CON 3 g.....	106
5.29 MEDIDAS DE LAS PEPITAS DE UVA.....	107
5.30 CANTIDAD DE AGUA EN EL INTERIOR DE LA PEPITA O SEMILLA DE UVA QUEBRANTA.....	112

## Gráficos

4.1 DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA DE LAS SEMILLAS DE UVA QUEBRANTA.....	69
5.1 CURVA DE SECADO DE SEMILLAS DE UVA QUEBRANTA EN LAS CONDICIONES ESTABLECIDAS EN LA TABLA 5.20 a y b.....	92
5.2 CURVA DE SECADO DE SEMILLAS DE UVA QUEBRANTA EN LAS CONDICIONES ESTABLECIDAS EN LA TABLA 5.21 a y b.....	93
5.3 CURVA DE SECADO DE SEMILLAS DE UVA QUEBRANTA EN LAS CONDICIONES ESTABLECIDAS EN LA TABLA 5.22 a y b.....	94
5.4 CURVA DE SECADO DE SEMILLAS DE UVA QUEBRANTA EN LAS CONDICIONES ESTABLECIDAS EN LA TABLA 5.23 a y b.....	95
5.5 CURVA DE SECADO DE SEMILLAS DE UVA QUEBRANTA EN LAS CONDICIONES ESTABLECIDAS EN LA TABLA 5.24 a y b.....	96
5.6 CURVA DE SECADO DE SEMILLAS DE UVA QUEBRANTA EN LAS CONDICIONES ESTABLECIDAS EN LA TABLA 5.25 a y b.....	97
5.7 ANALISIS DEL COEFICIENTE DE CORRELACION USANDO MINITAB.....	105
5.8 CURVA DE SECADO CON 5g.....	106
5.9 CURVA DE SECADO CON 3g.....	106
5.10 CURVAS DE CANTIDAD DE AGUA EN EL INTERIOR DE LA PEPITA DE UVA EN FUNCIÓN DEL RADIO.....	113

## Figuras

2.1 MODELO DE INTERACCIÓN GAS-LÍQUIDO.....	25
2.2 SECADOR TIPO BANDEJA.....	26
2.3 ESQUEMA DE UN SECADOR ROTATORIO EN CONTRACORRIENTE	27
2.4 TIPOS DE ELEVADORES.....	28
2.5 ESQUEMA DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA EN EL SECADO. .....	30
2.6 HUMEDAD LIBRE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.....	34
2.7 CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO.....	35
2.8 CARTA PSICROMÉTRICA.....	38
2.9 LÍNEAS CORRESPONDIENTES AL DIAGRAMA DE PSICROMETRICO.....	39
2.10 ESQUEMA DEL SECADO DE UNA PARTÍCULA EN UN GAS INERTE.....	40
4.1 DISEÑO TAGUCHI CON MINITAB 17.....	53
4.2 EL DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA CINETICA DEL SECADO.....	55
4.3 RESIDUOS DE LA PRODUCCION DE VINOS Y PISCOS.....	59
4.4 SEPARANDO LAS SEMILLAS DE LOS ORUJOS EN LA BODEGA.....	60
4.5 MUESTRA DE SEMILLAS DE UVA.....	60
4.6 TAMICES CON SISTEMA VIBRATORIO LOPU-FIQ-UNAC.....	61
4.7 SECADOR ROTATORIO DE VIDRIO UTILIZADO PARA EL ESTUDIO DE LA CINETICA DEL SECADO.....	61
4.8 SOPLADOR DE AIRE CALIENTE.....	62
4.9 SECADOR ROTATORIO METALICO.....	62
4.10 EXHAUTOR PARA REMOCION DE VAHOS.....	63
4.11 VERNIER PARA MEDIR LOS DIAMETROS INTERNOS.....	64
4.12 PARTE INTERIOR DEL SECADOR ROTATORIO CONSTRUIDO.....	64
4.13 DESECADOR DE VIDRIO.....	65
4.14 INTERFACE DATA LOGGER ENTRE LAS 3 TERMOCUPLAS ACOPLADAS AL SECADOR ROTATORIO Y LA COMPUTADORA.....	66
4.15 BALANZA A LA SALIDA DEL SECADOR ROTATORIO METALICO.....	66
4.16 BALANZA DE HUMEDAD ADAM AMB 50.....	67
4.17 TAMIZADO DE LAS PEPITAS DE UVA QUEBRANTA.....	68
4.18 REGISTRO DE TEMPERATURA CON TERMOCUPLAS Y DATA LOGGER .....	71
4.19 DISEÑO TAGUCHI CON MINITAB PARA LA CINETICA DEL SECADO.....	73

5.1 SISTEMA DE SECADO.....	75
5.2 ANALISIS DE MEDIAS CON MINITAB.....	78
5.3 DETERMINANDO LA CINETICA DE SECADO.....	83
5.4 AJUSTE AL MODELO DE HENDERSON.....	99
5.5 REPRESENTACIÓN DE AJUSTE LOGARITMICO.....	100
5.6 REPRESENTACIÓN DE AJUSTE DE PELEG.....	101
5.7 REPRESENTACIÓN DE AJUSTE DE DOS TERMINOS.....	102
5.8 REPRESENTACIÓN DE AJUSTE DE HENDERSON-PABIS.....	103
5.9 REPRESENTACIÓN DE AJUSTE DE MIDILLI.....	104
5.10 MEDIDAS DE LAS PEPITAS DE UVA QUEBRANTA.....	108
5.11 FORMA DE LAS PEPITAS DE UVA QUEBRANTA.....	109
5.12 PROGRAMACIÓN EN POLYMATH.....	111

## RESUMEN

El objetivo principal de la presente tesis es establecer un modelo matemáticos que explique el proceso de secado de semillas o pepitas de uva quebranta de Ica usando un secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto.

Las variables que rigen el proceso de secado son: la temperatura de secado, el flujo de aire caliente, la velocidad de rotación del secador, así como el peso de semillas que se procesa. Luego de los experimentos y los análisis de regresión, el modelo potencial multivariable con índice de correlación de 0,976 es el que mejor explica el proceso de secado de las semillas de uva quebranta.

En la optimización, se ha considerado la humedad de salida de las semillas secas como variable dependiente resultando que la temperatura de 80°C, flujo de 425 L/min, velocidad de rotación de 15 RPM y un peso de 50g. a nivel piloto, permitieron minimizar la humedad de las semillas a la salida del secador a 5.8198 %.

Para el estudio de la cinética del secado, se desarrollaron 12 experimentos, resultando que los valores experimentales se ajustan mejor a los modelos de Midilli y Henderson-Pabis modificado con índices de correlación de 0.999 y 0.998 respectivamente.

Siendo importante conocer de qué manera se elimina el agua de la semillas, se evaluó la difusividad de la humedad en las semillas de uva quebranta resultando un valor de 0.0108mm<sup>2</sup>/seg lo cual indica que la perdida de humedad es mayor cerca de la superficie de la pepita comparada con el centro de la misma.

Palabras Clave: Adsorción, Secado, semillas de uva, Modelamiento

## ABSTRACT

The main objective of this thesis is to establish mathematical models that explain the process of drying seeds or grape nuggets broken by Ica using a rotary dryer with hot air at pilot level.

The variables that govern the drying process are: the drying temperature, the flow of hot air, the speed of rotation of the dryer, as well as the weight of pips that is processed. After the experiments and the regression analysis, the potential multivariate model with a correlation index of 0.976 is the one that best explains the drying process of the crushed grape seeds.

In the optimization, the moisture content of the dried seeds was considered as a dependent variable, resulting in a temperature of 80 ° C, a flow of 425 L/min, a rotation speed of 15 RPM and a weight of 50 g at the pilot level minimize the humidity of the pips at the dryer outlet to 5.8198%

For the study of the kinetics of drying, 12 experiments were developed, resulting that the experimental values are better adjusted to the models of Midilli and Henderson-Pabis with correlation indexes equal 0.999 y 0.998 respectively.

Being important to know how the water is removed from the nugget, the diffusivity of the moisture in the grape seeds was evaluated, resulting in a value of 0.0108 which indicates that the loss of humidity is greater near the surface of the compared nugget with the center of it.

Key Words: Adsorption, Drying, Seeds of grapes, Modeling.

## I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.1 Identificación del Problema

El incremento de la producción de piscos y vinos en el Perú, implica un mayor uso de uvas, luego de la etapa del prensado de las uvas, se genera aproximadamente 16% de residuos no aprovechables por la industria vitivinícola, y que están compuesto de hollejos y semillas.

Considerando que la mayor producción de uvas es de la cepa o variedad denominada uva quebranta, la cual abunda en Ica y Chincha debido a su clima cálido, la presente investigación está orientada al proceso de secado de pepitas de uva quebranta de dicha zona, utilizando un secador rotatorio con aire caliente de manera que se posibilite un secado rápido para evitar que se deteriore por la presencia de humedad a través del tiempo y poder darle usos alternativos.

Dentro del marco de la norma ISO 14001 orientada al sistema de gestión ambiental se hace necesario desarrollar un manejo eco eficiente de los residuos que se generan, como es el caso de los residuos de la industria pisquera y vitivinícola. Siendo en la actualidad que tales residuos vitivinícolas originados, se suelen arrojar en las zonas aledañas a las bodegas productoras de vinos y piscos.

El uso principal de la uva está dirigido a la elaboración del vino (de 70 a 80 %), y el resto se utiliza para el consumo de frutas y usos nutracéuticos o farmacéuticos. El orujo de la uva, residuo de la elaboración del vino, representa el 20 por ciento de la uva (w/w); se compone de semillas 38-52 por ciento en base a materia seca. Más de 3 millones de toneladas de semillas de uva se desechan anualmente en todo el mundo.” según menciona Moya García, C. 2017 [22].

La uva quebranta es una de las cepas más fuertes y resistentes, y proviene de la mutación de la uva de la variedad negra criolla traída por los españoles, se ha adaptado al clima y terreno de los valles del sur del Perú, perteneciendo además a la familia de uvas pisqueras no aromáticas.

En 2016, Perú exportó 285 600 Tm /año de uvas siendo la productividad en Ica de 20 150 Kg de uva/ Ha en el mismo año.

Tabla 1.1  
DISTRIBUCION DE LAS HECTAREAS DE UVA PISQUERA

Departamento	Participación
Lima	25 %
Ica	64%
Arequipa	3%
Moquegua	4%
Tacna	4%

Fuente: Ministerio de la producción

Reporta el Diario Gestión (22 julio 2018), que “Para el año 2018 se estima que el consumo del pisco ascendería a dos millones de litros, resultado que es superior en 5% con relación al 2017, informó el ministro de la Producción, Raúl Pérez-Reyes. Agregó que en los últimos diez años, el consumo nacional del pisco se duplicó pasando de 955 000 litros en el 2008 a 1.9 millones de litros en el 2017. En promedio ha ido creciendo 7.8% de forma anual en el último decenio.”

Por otro lado, Marcelo D. [16] señala que: “los granos de uvas pisqueras están conformados por hollejo de (6% a 12%), Pepitas (2% a 5%), Pulpa (83% a 92%).”

La generación de residuos de la industria vitivinícola en Ica

Actualmente las uvas se prensan usando un sistema de compresión neumática de manera que se logre un mecanizado del proceso para tener una mayor eficiencia del mismo. Seguidamente se separa el mosto de los residuos sólidos, de los cuales se obtienen las pepitas materia de estudio de esta tesis.

Según señala Martínez Saiz. [19] “Aproximadamente el 16% de la uva es material no aprovechable, este porcentaje varía según el método de prensado empleado para la obtención del mosto y la variedad de materia prima. Entre los subproductos que se generan se encuentran: El raspon (de 5 a 6%), el hollejo (7%) y las pepitas (4%).”

Agrega Martínez Saiz [19] que “Además las pepitas son muy ricas en aceites, cuya cantidad oscila entre 13% y 20%. Estos aceites tienen importantes propiedades nutricionales como por ejemplo, están libres de colesterol, exentas de grasas saturadas, contienen ácido linoleico.”

Se sabe que para producir un litro de pisco, se requieren 7.5 Kg de uva pisquera, y sabiendo que el 4% de la uva son semillas, se podría calcular que en 2018 se podrían generar aproximadamente 600 000 Kg de semillas, si se considera además que el 64% de la uva pisquera procede de Ica, en dicho departamento se tendría un aproximado de 384 TM/año de semillas de uva que resulta conveniente procesarlo y de este modo darle un uso adecuado para la sociedad, en vez de actuar como agente contaminante.

Por otro lado, los tradicionales métodos de extracción de aceites vegetales utilizan como solvente el hexano, del cual se ha encontrado información que lo señala como una neurotoxina, permitiendo que se desarrollen investigaciones tendientes a sustituir al solvente hexano para la extracción de aceites. Es así como se ha conocido la tecnología de fluido supercrítico (FSC), basada en la utilización de fluidos por encima de su punto crítico, en estas condiciones el fluido se comporta como líquido, logrando así la extracción de los aceites, para luego al reducir adecuadamente los rangos

de presión, el fluido se comporta como gas facilitando de este modo la separación del aceite extraído.

Una de las condiciones más importantes en dicha tecnología es que la humedad debe estar por debajo del 6%, lo cual se debe lograr a temperaturas entre 60° y 80°C con la finalidad de que las pepitas de uva no sufran deterioro por erosión, ni tampoco haya un efecto de la temperatura sobre la calidad del ácido linoleico y oleico contenidos en el aceite de las semillas de uva.

Dicho lo anterior, la humedad de salida luego del proceso de secado, constituye una variable crítica que debe ser minuciosamente tratada, por lo que la presente investigación está orientada fundamentalmente al proceso de secado de las pepitas o semillas de uva quebranta de Ica, utilizando un secador rotatorio con aire caliente, lo cual podrá ser extendido por otros investigadores al secado ecoeficiente de otras semillas como pepitas de girasol, de tomate, anís, ajonjolí, sachá inchi y otros.

Desde el punto de vista de la Ingeniería Química, es conveniente establecer un modelamiento matemático del proceso de secado de las semillas de uva quebranta en un secador rotatorio con aire caliente que permita lograr la humedad exigida y que se debe lograr en condiciones favorables de temperaturas, flujos adecuados de aire caliente, velocidad de rotación del secador así como el peso de las pepitas, que eviten se afecte la calidad del aceite contenido en las pepitas de uva.

La importancia de un modelo matemático que explica un proceso o fenómeno, dentro del marco de la Ingeniería Química radica en que posibilita pronosticar resultados frente a variaciones de las condiciones de operación lo cual es de gran ayuda para tomar decisiones con antelación en los procesos industriales.

## 1.2 Formulación del problema

### 1.2.1 Problema general

¿Cómo debe ser el modelo matemático que explique el proceso de secado de semillas de uva quebranta de Ica usando secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto?

### 1.2.2 Problemas específicos

- a. ¿Cuáles son las características del secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto que permita el secado eficiente de semillas de uva quebranta de Ica?
- b. ¿Cuáles son las variables que intervienen en el proceso de secado de semillas de uva quebranta de Ica usando secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto para determinar el modelo matemático del proceso de secado?
- c. ¿Cómo debe ser el proceso de secado de semillas de uva quebranta de Ica usando un secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto?

## 1.3 Objetivos de la Investigación

### 1.3.1 Objetivo general

Establecer un modelo matemático que explique el proceso de secado de semillas de uva quebranta de Ica usando un secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto.

### 1.3.2 Objetivos específicos.

- a. Describir las características de un secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto que permita el secado eficiente de semillas de uva quebranta de Ica.

- b. Especificar las variables que intervienen en el proceso de secado de semillas de uva quebranta de Ica usando secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto para determinar el modelo matemático del proceso de secado.
- c. Describir el proceso de secado de semillas de uva quebranta de Ica usando un secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto.

## 1.4 Justificación

### 1.4.1 Justificación Ambiental

Actualmente el mayor porcentaje de semillas de uva son arrojadas en los lugares aledaños a las bodegas que producen piscos y vinos, constituyendo un foco infeccioso. La investigación propone el rápido secado de dichos residuos para evitar que se generen microorganismos debido a la humedad y la temperatura ambiente que predomina en las fechas de cosecha o vendimia que generalmente es en marzo.

En concordancia con la norma ISO 14001, se amerita un sistema de gestión ambiental y manejo eco eficiente de los residuos en la industria vitivinícola.

### 1.4.2 Justificación Tecnológica

Desde el punto de vista de la ingeniería química, es necesario que el proceso de secado de pepitas de uva sea planteado a través de un modelo matemático que permita la simulación del proceso de secado y predecir los valores que se obtendrían a determinadas condiciones de operación. Es decir, dado la temperatura de entrada y flujo de aire caliente, predecir la humedad final de las semillas de uva.

No existe información del modelamiento del secado de semillas de uva quebranta en secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto, siendo necesario establecer, el perfil de temperaturas del secado, flujo de aire caliente que se debe alimentar para la remoción de la humedad de las semillas de uva quebranta, así como la velocidad de rotación del secador rotatorio.

### 1.4.3 Justificación Económica

El proceso de secado de las semillas de uva en el secador rotatorio con aire caliente permite un rápido secado evitando que se deterioren por la presencia de microorganismos que pudiesen aprovechar la humedad. Las semillas se pueden someter a posterior extracción de aceite de mejor calidad lo que facilitaría su colocación en el mercado, especialmente para la preparación de productos relacionados con la belleza, enfermedades cardiovasculares, tratamientos de la piel, etc.

En términos económicos se podrá decir que se le da un valor agregado a los desechos de la industria vitivinícola y pisquera del departamento de Ica.

Por otro lado, se estarían generando puestos de trabajo de manera directa en la planta de secado, así como se pueden prestar servicios de secado a otros productos agroindustriales.

### 1.4.4 Justificación Práctica

La presente investigación orientada al proceso de secado de semillas de uva en un secador rotatorio con aire caliente, se justifica porque está orientado a resolver de manera práctica diversos problemas entre los cuales se reducirían los riesgos para la salud de la población aledaña, ya que el secado de las semillas de manera oportuna evita la proliferación de microorganismos o vectores por la humedad y temperatura ambiente que en promedio es de 30°C.

De acuerdo con lo señalado por el Diario Gestión (22Julio 2018) en el presente año el consumo de pisco será de 2 millones de litros, lo que generaría aproximadamente 384 TM/año de semillas de uva quebranta de Ica, generada en cada campaña de vendimia o cosecha anual, ello permitirá su posterior procesamiento para la extracción de aceites, contribuirá al manejo responsable de los residuos de la industria vitivinícola.

Es decir, dada las variables del proceso de secado, como la temperatura, flujo de aire, peso de la muestra y velocidad de rotación del secador, se puede predecir la humedad final de salida de las semillas, así como será posible una optimización del proceso de secado.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes del estudio

Si bien no se ha encontrado información sobre modelamiento del proceso de secado de semillas de uva quebranta en secador rotatorio con aire caliente, si se ha encontrado información que de alguna manera se relacionan de forma indirecta, por ejemplo la caracterización de las semillas de uva, tipos de secado y secadores, métodos de secado, modelamiento matemático en general y que sirven como referencia para el modelamiento del proceso de secado de semillas de uva quebranta en un secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto y que es el objetivo general de la presente tesis.

Martínez Saiz Carmen [19] en su artículo titulado “INFLUENCIAS DE LAS CONDICIONES DE SECADO EN LA CINÉTICAS DE DESHIDRATACIÓN DE PEPITAS DE UVA” señala que “Se obtuvieron cinéticas de deshidratación de pepitas de uva a diferentes condiciones de temperatura, velocidad y con aplicaciones o no de ultrasonidos. Las cinéticas fueron modelizadas mediante el modelo de Peleg y un modelo difusivo, obteniendo resultados satisfactorios en ambos casos. Se observó que, al aumentar la temperatura, aumentaba la velocidad de deshidratación. Se calculó la energía de activación a partir de los resultados obtenidos mediante el modelo de Peleg y el modelo difusivo. El modelo de Peleg presentó la ventaja de ser más sencillo matemáticamente.”

Cabe señalar que Martínez Saiz en su trabajo dispuso un arreglo de bandejas en forma vertical, donde colocó sus muestras de manera fija, haciendo pasar un determinado flujo de aire en forma perpendicular a dichas bandejas. A diferencia de esta tesis que trabajó en un secador rotatorio con aire caliente en posición horizontal con inclinación.

Por otro lado, según Martinello Miriam [17] en su tesis doctoral “MODELADO DEL SECADO DE GRANOS EN LECHO FIJO A BAJAS TEMPERATURAS DE AIRE” menciona que “Se estudió el proceso de secado de maíz a bajas temperaturas para proponer un método más ecológico y que conduzca a granos de mayor calidad y valor. Se abordó el modelado matemático de la transferencia de calor y materia y su implementación numérica. Los balances de masa y de energía se propusieron tanto para el aire inter-granular como para los granos. Se consideraron variantes de modelización: equilibrio térmico y másico y no equilibrio; inclusión de términos de acumulación en el aire (no estacionario) y modelo sin términos de acumulación en el aire (pseudoeestacionario). Además, se estudiaron tres métodos numéricos para la resolución: diferencias finitas explícitas, diferencias finitas implícitas y método de las líneas. Las comparaciones entre modelos se basaron en la respuesta característica del sistema (condiciones constantes del aire) y en la influencia de las condiciones meteorológicas sobre parámetros de desempeño como tiempo de secado, consumo específico de energía y pérdida de materia seca. Se consideraron los efectos del caudal volumétrico específico de aire, temperatura del aire, humedad relativa del aire, humedad inicial de los granos y espesor del lecho...”

Martinello concluye “...que el modelo no estacionario de no equilibrio representa mejor el proceso, siendo el método de las líneas el esquema numérico más apropiado para su resolución. El uso de ventilador por soplado precalienta y baja la humedad relativa del aire, conduciendo a menores tiempos de secado y reducciones en el consumo de energía.”

En el trabajo de investigación realizado por Parra Coronado, Alfonso; Gonzalo Roa, Mejía y Carlos E. Oliveros-Tascón [26] denominado: “*MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN MATEMÁTICA EN EL SECADO MECÁNICO DE CAFÉ PERGAMINO*” mencionan que “Cuando el café pergamino después de cosechado se deja por más de 48 horas con su

contenido inicial de humedad (52 al 56% bh (base húmeda) por retraso en el proceso de secado, o cuando éste se almacena con contenidos de humedad superiores al 12% bh debido a un proceso de secado deficiente), el riesgo de ser atacado por hongos y de ser contaminado con micotoxinas es muy alto...”

La oficina regional de la FAO para América Latina y el Caribe en su publicación “*SECADO DE GRANOS: NATURAL, SOLAR Y A BAJAS TEMPERATURAS*” menciona “El secado de granos se puede definir de distintas maneras, según el enfoque que se desee adoptar. En los estudios más teóricos se pone el énfasis en los mecanismos de transferencia de energía y de materia. Así, el secado se puede definir como un proceso en que hay intercambio simultáneo de calor y masa, entre el aire del ambiente de secado y los granos. En cambio, en los casos generales, se define el secado como la operación unitaria responsable de la reducción del contenido de humedad de cierto producto, hasta un nivel que se considera seguro para el almacenamiento de éste.”

Para Chaves, María G. et al. [6] En la investigación denominada “*ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE BERENJENAS DESHIDRATADAS*” reportan que: “El conocimiento de las isotermas de adsorción de alimentos es de gran importancia para el desarrollo en la industria alimentaria, ya que brindan información útil para la optimización del proceso de secado y el diseño de secaderos, la selección del material de empaquetamiento, la predicción de la vida útil del producto y de la evolución en el contenido de humedad durante el almacenamiento. (Gal, 1987). Uno de los parámetros más importantes en alimentos deshidratados es la condición de equilibrio que determina el límite del proceso, siendo este una parte importante del gradiente que provoca el movimiento del agua...”

Además concluyen que “La temperatura de secado no influye en las isotermas de adsorción de las rodajas de berenjenas deshidratadas, lo que

nos indicaría que la estructura del material seco no se ve afectado por la temperatura de secado...”

Hernández Bautista, Emilio [11] en la tesis de maestría titulada *“MODELADO MATEMATICO DEL SECADO DE MADERA SUBTROPICAL POR CONVECCIÓN DE AIRE CALIENTE”* señala que “En los últimos años el modelado de los procesos de secado ha sido una herramienta eficaz para su optimización, pues acopla la física del secado de los materiales con las condiciones propias del secador. Los modelos asocian, balance de energía, de masa y de momento, que pueden ser expresados como ecuaciones diferenciales y resueltos numéricamente, para obtener soluciones específicas en cada problema”.

También, Hernández [11] indica que “Estos modelos matemáticos aplicados al secado de materiales están divididos principalmente en tres grupos; modelos empíricos aplicados a procesos específicos, modelos difusivos de transferencia de masa y calor que llevan ecuaciones simultaneas y modelos conocidos como comprensivos, los cuales involucran ecuaciones diferenciales de transporte de masa, calor y momentum, con fundamentos termodinámicos, estos modelos son también conocidos como fenomenológicos (Turner y Perré,2004)”.

López Herrera, Jorge y Carlos Pereyra, Leonardo [14] en la tesis presentada para optar el grado de Maestro en Ingeniería Química denominada *“OPTIMIZACIÓN DE SECADO DEL YAWUARCHUNKA (Pleysalis Peruviana Linnaeus) EMPLEANDO LA TECNICA DE UN PROCESO COMBINADO AIRE CALIENTE-MICROONDAS”* mencionan que “mediante la técnica del proceso combinado aire caliente y microondas se verifica el incremento de la velocidad en comparación con el método tradicional”.

Espinoza Lenis, Brenda y Vega Córdova, Jhonatan [7] en el trabajo de investigación titulado *“RE-INGENIERIA DE UN SECADOR ROTATORIO*

DIDACTICO PARA EL LABORATORIO DE OPERACIONES” señalan que “En este tipo de secadores se fundamenta en la transferencia de calor y la necesidad de solucionar el problema de alto contenido de humedad, se realizó la reingeniería del secador con el fin de obtener mejoras en el proceso a realizar, para sus pruebas utilizaron cacao, café y alverja dando a notar la efectividad de este proceso cuando se trata de productos granulares. Teniendo en cuenta que la capacidad de producto dentro del secador es de 271 kg., sabiendo que este tipo de secadores solo trabaja con un 10% a 15% de su capacidad total, y que en tiempos de aproximadamente 1 hora reducirá el porcentaje de humedad del cacao de un 50 % a un 7% aproximadamente”.

## 2.2 Bases científicas

### 2.2.1 Métodos de secado.

Para lograr extraer la humedad contenida en un material existen diversas alternativas de secado, tales como los equipos de secado según sea la carga de material que recibe, conociéndose de este modo el secado por lotes, en el cual el material es colocado en el secador y luego de un determinado periodo de tiempo se retira el material secado, así mismo existe el secado tipo continuo, en el cual se alimenta el material al equipo de secado de forma permanente obteniéndose el producto secado de forma ininterrumpida.

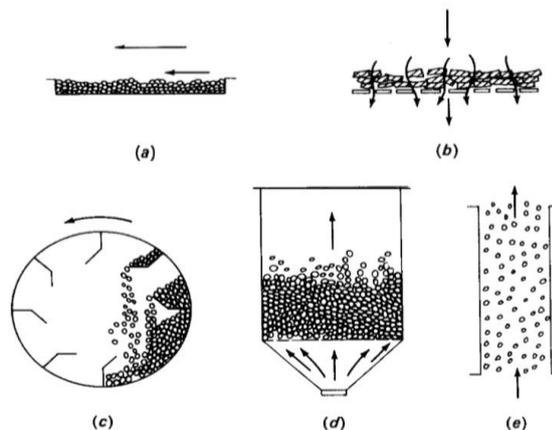
Por otro lado como menciona Geankoplis [10] (p. 580) “Los procesos de secado se clasifican también de acuerdo con las condiciones físicas usadas para adicionar calor y extraer vapor de agua: (1) en la primera categoría, el calor se añade por contacto directo con aire caliente a presión atmosférica, y el vapor de agua formado se elimina por medio del mismo aire; (2) en el secado al vacío, la evaporación del agua se verifica con más rapidez a presiones bajas, y el calor se añade indirectamente por contacto con una pared metálica o por radiación (también pueden usarse bajas temperaturas con vacío para ciertos materiales que se decoloran o se descomponen a temperaturas altas); (3) en la liofilización, el agua se sublima directamente del material congelado.”

También señala Mc Cabe W. et al. [20] (p. 822) que se debe tener en cuenta “los diferentes modelos de movimiento de partículas de sólidos a través de secaderos, a fin de comprender los fundamentos del secado. Es así que presenta las siguientes formas: En primer lugar, el gas circula sobre la superficie de un lecho o una lámina del sólido, o bien sobre una o ambas caras de una lámina o película continua. Este proceso se llama secado con circulación superficial como se muestra en la figura 2.1a. Luego indica también que el gas puede circular a través de un lecho de sólidos

granulares gruesos que están soportados sobre una rejilla. Esta operación recibe el nombre de secado con circulación a través. Como en el caso del secado con circulación superficial, la velocidad del gas se mantiene baja para evitar el arrastre de partículas sólidas, como se indica en la figura 2.1b. En otro de los casos los sólidos descenden en forma de lluvia a través de una corriente gaseosa que se mueve lentamente, con frecuencia dando lugar a un arrastre no deseado de las partículas finas, véase la figura 2.1c por otro lado el gas pasa a través de los sólidos con una velocidad suficiente para fluidizar el lecho. Inevitablemente se produce arrastre de las partículas más finas tal como se ve en la figura 2.1d y finalmente mencionan Mc Cabe W et al. “Que los sólidos son totalmente arrastrados por una corriente gaseosa de alta velocidad y neumáticamente transportados desde un dispositivo de mezcla hasta un separador mecánico, como se aprecia en la figura 2.1e.”

En la siguiente ilustración tomada del mismo autor se puede distinguir las diferentes formas del movimiento de las partículas dentro del secador:

Figura 2.1  
MODELO DE INTERACCIÓN GAS-LÍQUIDO



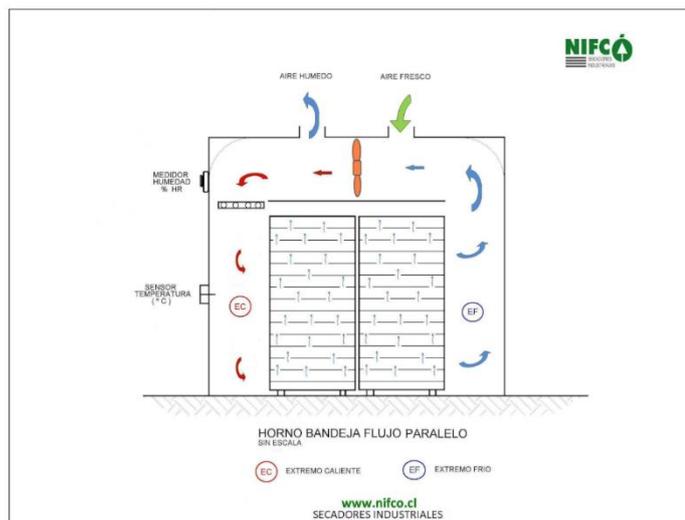
Fuente: Mc. Cabe, et al [20] (p. 823)

## 2.2.2 Equipos de secado

### Secado de bandejas

Llamado también de compartimentos, en este caso el secador es un recinto aislado en donde circula aire con vapor por medio de un ventilador, tal como señala Geankoplis [10] “Un ventilador recircula aire calentado con vapor paralelamente sobre la superficie de las bandejas. También se usa calor eléctrico, en especial cuando el calentamiento es bajo. Más o menos del 10 al 20% del aire que pasa sobre las bandejas es nuevo, y el resto es aire recirculado.”

Figura 2.2  
SECADOR TIPO BANDEJA



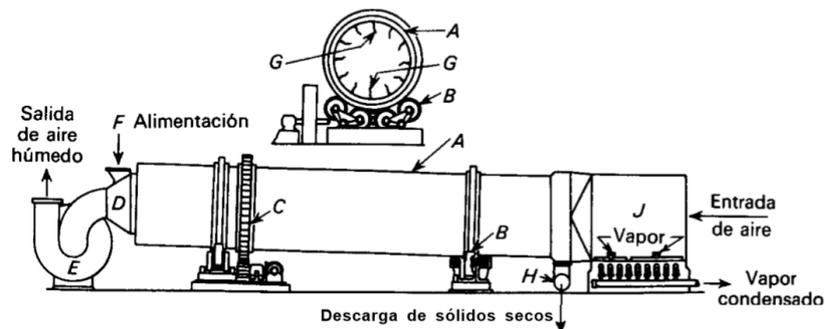
Fuente: Nifco [36]

### b. Secador rotatorio

Un secador rotatorio, como su nombre lo indica, trabaja con revoluciones haciendo que el cilindro gire constantemente y el material en el interior se mueva paulatinamente. Estas revoluciones hacen posible que el material

en estudio o tratado este en contacto con el fluido caliente en toda su dimensión. Se indica además que la alimentación puede llevarse a cabo en forma paralela o en contracorriente, siendo en el primer caso cuando la alimentación y el fluido caliente tienen la misma dirección y para el segundo caso es lo inverso. Señala asimismo Mc.Cabe, et al [20] “Un secadero rotatorio consiste en una carcasa cilíndrica giratoria, dispuesta horizontalmente o ligeramente inclinada hacia la salida. Al girar la carcasa, unas pestañas levantan los sólidos para caer después en forma de lluvia a través del interior de la carcasa. La alimentación entra por un extremo del cilindro y el producto seco descarga por el otro...”

Figura 2.3  
ESQUEMA DE UN SECADOR ROTATORIO



Fuente: Mc.Cabe, et al. [20] (p 851)

A diferencia de la gráfica anterior, el tipo de secador empleado en la presente investigación presenta al aire caliente fluyendo de manera paralela con la corriente de alimentación de las semillas de uva quebranta. La calefacción está conformada por un soplador de aire caliente que trabaja en el rango de flujos de 350 a 500 L/min.

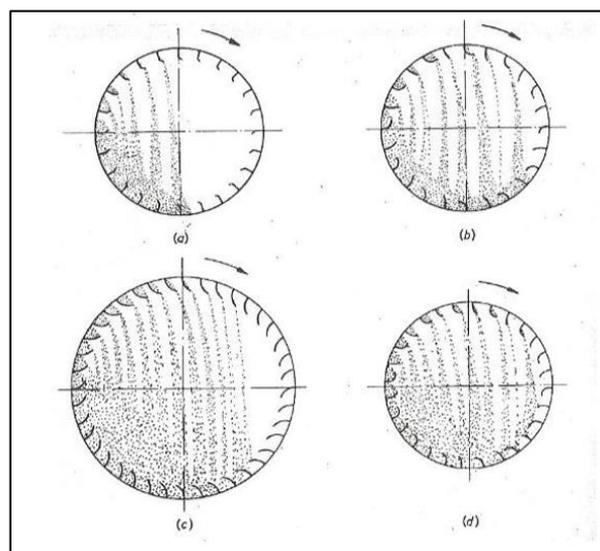
En los secadores rotatorios se adapta elevadores en la parte interior del cilindro, tal como lo recomiendan Espinoza Lenis y Vega Córdova [7] ya que “permite un máximo de transferencia de calor y materia cuando todo el

material en el proceso cae en cascada” y señalan arreglos como se muestran en la figura 2.4

Además cabe indicar que según esta disposición, el arreglo con elevadores, el producto o la muestra tratada están expuesta al flujo de aire caliente en toda su área superficial lo que lleva consigo a una mayor área de transferencia. Ello se traduce en una mayor rapidez en el secado.

La introducción de las semillas de uva quebranta se realiza a través de una tolva por donde hace el ingreso al interior del secador rotatorio.

Figura 2.4  
TIPOS DE ELEVADORES



Fuente: Espinoza Lenis y Vega Córdova [7]

#### c. Secador de lecho fluidizado

En relación al secado en lecho fluidizado, Mc Cabe, et al. [20] señalan que “las partículas a secar se fluidizan por medio de aire o gas en una unidad de lecho hirviente, en este caso la transmisión de calor es muy rápida, siendo muy breve el tiempo de secado para la humedad en la parte superficial del sólido, así como en la parte interior del mismo. Para poder

recuperar las partículas finas es necesario instalar ciclones y filtros de manga para su recuperación”.

#### d. Secadores Solar

El secado solar usado desde tiempos ancestrales es aplicado a diversos productos con mayor incidencia para la preservación de los alimentos, ya que como menciona el Centro Tecnológico Nacional de la Conserva y la Alimentación-C.T.C. “Los microorganismos que provocan la descomposición de la materia orgánica no pueden crecer y desarrollarse en ausencia de agua”, razón por la cual es necesario que el secado se inicie tan pronto como sea posible.

#### 2.2.3 Mecanismo de transferencia de calor y masa

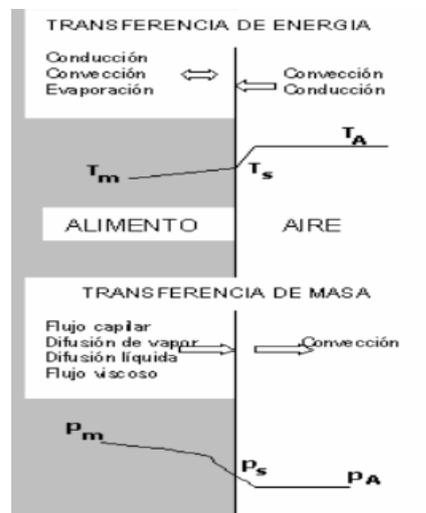
En el secado de productos, se deben considerar tres mecanismos de transferencia de masa y calor tal como menciona Martínez de la Cuesta [18] (p 809) “En primera instancia la transmisión de calor desde el seno del aire a la superficie del sólido a través de la sub capa laminar. Luego de ello la evaporación del líquido superficial y transferencia del mismo como vapor desde la superficie del sólido al seno del gas a través de la subcapa laminar y finalmente el transporte del líquido desde el interior del sólido hasta su superficie para reemplazar el líquido evaporado”.

En la figura.2.5 tomado de Orrego Alzate, Carlos E. [24] (p 187) “se muestran los dos fenómenos de transporte que caracterizan al secado: transferencia del calor desde los alrededores hacia el alimento, conducción de calor dentro de él y evaporación en la superficie (a veces dentro del material), y transferencia de masa desde el interior hacia la superficie del material seguido del transporte de la humedad desde allí hacia los alrededores. Dentro del producto, la transmisión de calor se debe a la

conducción por la presencia de gradientes internos de temperatura y, en menor medida, a la convección originada por la migración de la humedad. De manera similar la energía se transfiere al material alimenticio a secar por convección y conducción generalmente, aunque hay excepciones importantes en donde la radiación y la absorción de energía (secado dieléctrico o por microondas) son preponderantes”.

También menciona Orrego [24] “el flujo de humedad dentro del material se origina por una combinación de distintos mecanismos de transporte: flujo capilar debido a gradientes presión de succión capilar. Difusión líquida por gradientes de concentración. Difusión de vapor causada por gradientes de presiones de vapor. Flujo viscoso consecuencia de gradientes totales de presión externos o altas temperaturas”

Figura 2.5  
ESQUEMA DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA EN EL SECADO.



Fuente: Orrego Alzate, Carlos E. (p 188)

#### 2.2.4 Mecanismo de transferencia de calor

Como ya es ampliamente conocido en el campo de la ingeniería, la transmisión del calor se realiza básicamente bajo tres formas: conducción, convección y radiación.

La transmisión o transferencia de calor se produce por medio de un gradiente de temperatura, es decir de un punto de mayor a menor temperatura.

##### **Conducción:**

Cengel, Yunus A. [4] (p.017) precisa que la conducción “Es la que se presenta cuando hay una diferencia o gradiente de temperatura en un cuerpo sólido, manifestándose la transferencia de calor desde el punto más caliente al punto menos caliente”. Agrega que “la conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una retícula y al transporte de energía por parte de los electrones libres”.

Cengel, Yunus A. [4] también indica que “La rapidez o razón de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de éste, su espesor y el material de que esté hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él”

Para el caso de un sólido, la transferencia de calor viene representada por la ley de Fourier.

$$Q_{cond.} = -K * A * \frac{dT}{dX} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde:

Qcond: Es la razón de la transferencia de calor por conducción (W).

K: Conductividad térmica del material (W/m.°C).

A: Área perpendicular a la dirección de la transferencia de calor (m<sup>2</sup>).

$\frac{dT}{dX}$ : Gradiente de temperatura (°C/m).

### **Convección:**

La convección es otro mecanismo de transporte del calor que se realiza entre un medio fluido y un sólido. Cengel, Yunus A. [4] (p 25) define que “la convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. La presencia de movimiento masivo del fluido acrecienta la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido, pero también complica la determinación de las razones de esa transferencia”.

Asimismo como sigue señalando Cengel “se observa que la rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente por la ley de Newton del enfriamiento como:

$$Q_{conv.} = h * A_s * (T_s - T_{amb.}) \dots \text{Ecuación 2.2}$$

Donde:

- Q<sub>conv.</sub> : Es la razón de la transferencia de calor por convección.  
h : Coeficiente de transferencia de calor (W/m<sup>2</sup>.°C).  
A<sub>s</sub>: Área superficial a la transferencia de calor (m<sup>2</sup>).  
T<sub>s</sub>: Temperatura de la superficie del sólido (°C).  
T<sub>amb.</sub> : Temperatura del medio circundante (°C)”.

### ***Radiación:***

Con respecto al transporte de calor por radiación, Cengel Yunus, A. [4] señala que “la radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio interventor. De hecho, la transferencia de calor por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en un vacío. Ésta es la manera en la que la energía del Sol llega a la Tierra”.

#### 2.2.5 Cinética de secado.

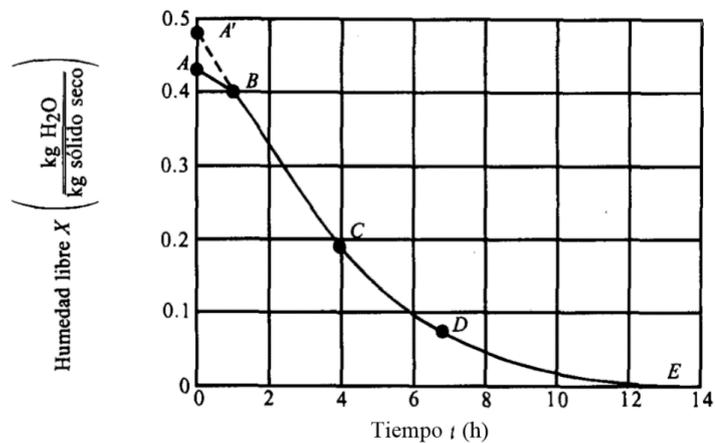
La velocidad con la cual se desarrolla el secado esto es, la variación de la humedad con respecto al tiempo, es la denominada cinética del secado y depende del material que se desee trabajar así como también del tipo de mecanismo de secado que se utilice. Para poder obtener las curvas de secado se tiene que desarrollar pruebas experimentales en el equipo objeto de estudio y con expresiones de humedad en base húmeda y seca además la ecuación de velocidad de secado, se puede trazar las gráficas de la cinética del secado.

Para apreciar el comportamiento de la humedad que se encuentra en un determinado material, se presenta la figura 2.6 y figura 2.7 en donde respectivamente se señala la curva de la humedad en función al tiempo

además de la curva de velocidad del secado respecto de la humedad presente en el material. Cabe indicar que para generar estas curvas, el punto de partida es medir las variaciones del peso de muestra conforme transcurre el tiempo. Para la presente investigación, esta técnica se describe en los capítulos correspondientes donde además se señala las tablas generadas de dichas mediciones.

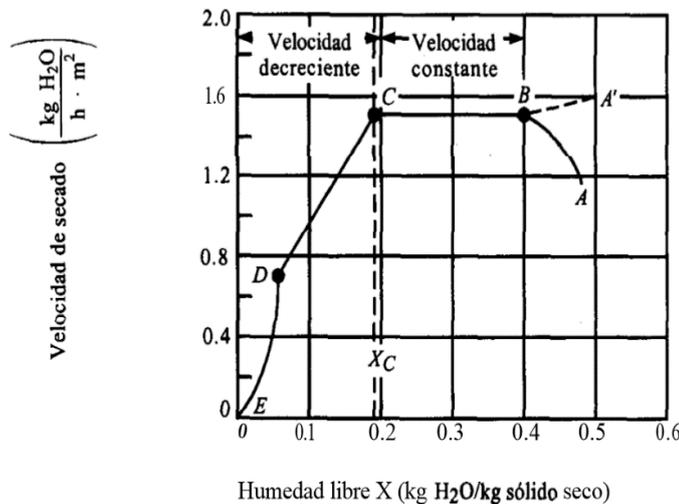
Estas curvas, característica del secado, están conformadas por zonas en las cuales se interpreta el proceso de secado de algún producto en particular. Si bien es cierto que es una curva común en el proceso de secado de toda muestra tratada sin embargo su interpretación depende del producto en particular que se trabaje.

Figura 2.6  
HUMEDAD LIBRE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO



Fuente: Geankoplis (p 598)

Figura 2.7  
CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO.



Fuente: Geankoplis (p 598)

Mc Cabe, et al [20] indica que “después de un corto periodo de tiempo durante el que se calienta la alimentación hasta la temperatura de vaporización, la representación gráfica se hace lineal, posteriormente se curva hacia el eje de abscisas y finalmente se hace horizontal”.

Las curvas que se muestran en las figuras 2.6 y 2.7, contiene zonas de las cuales Geankoplis [10] señala que “en el tiempo cero del secado (al iniciar la operación) se aprecia los puntos A y A' que representan las humedades en las que el sólido tendrá una temperatura menor que el sistema de secado y una temperatura mayor respectivamente. Este periodo inicial de ajuste en estado no estacionario suele ser bastante corto y por lo general se pasa por alto en el análisis de los tiempos de secado”.

Además, Geankoplis [10] agrega que “entre los puntos B y C la curva es una recta por lo que la pendiente y la velocidad son constantes durante este periodo. En el punto C, de ambas gráficas la velocidad de secado comienza a disminuir en el periodo de velocidad decreciente hasta llegar al punto D este tramo por lo general es lineal. En el punto D la velocidad de secado

disminuye con más rapidez aún, hasta que llega al punto E, donde el contenido de humedad de equilibrio es  $X^*$  y  $X = X^* - X^* = 0$ ".

Según indican los diversos autores consultados, la velocidad de secado en el periodo de velocidad constante, se verifica bajo la siguiente expresión:

$$N = -\frac{Ls}{A} * \frac{dX}{dt} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

En donde:

N: Velocidad del secado Kg H<sub>2</sub>O/(m<sup>2</sup> s).

Ls: Cantidad de sólido seco (m<sup>2</sup>).

A: Área de exposición al fluido de secado (m<sup>2</sup>).

$\frac{dX}{dt}$ : Variación de la humedad respecto al tiempo (Kg H<sub>2</sub>O/ Kg SS . s)

La ecuación 2.3, como lo indica Treybal, R. [34] se "reordena e integra en el intervalo de tiempo en que el contenido de humedad cambia de su valor inicial  $X_1$ , a su valor final  $X_2$ ", siendo  $X_1$  el contenido de humedad en el tiempo  $t=0$  y  $X_2$  es el contenido de humedad en el tiempo  $t=t$ . Llegando a la siguiente expresión:

$$\int_0^t dt = \frac{Ls}{A} * \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{N} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Asimismo, desarrollando la expresión:

$$t = \frac{Ls*(X_1-X_2)}{A*N} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

La ecuación anterior se cumple en el periodo de velocidad constante donde  $X_1$  y  $X_2$  sean mayores que la humedad crítica siendo además  $X_1 > X_2$ , tal como lo señala Geankoplis, C.J. [10].

Por otro lado, como indican Martínez y Rus [18] también se puede determinar el tiempo de secado por integración, mediante la siguiente expresión:

$$t = \int_0^t dt = \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{\left(-\frac{dX}{dt}\right)} = \int_{X_1}^{X_2} \left(\frac{dt}{dX}\right) dX \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Por lo que se debe conocer  $-\frac{dt}{dX}$  en función de X

En el periodo de velocidad constante se representa de la siguiente manera:

$$t = \frac{X_0 - X_c}{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_c} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Y en el caso en el que la velocidad es decreciente, Martínez y Rus [18], formula la siguiente expresión:

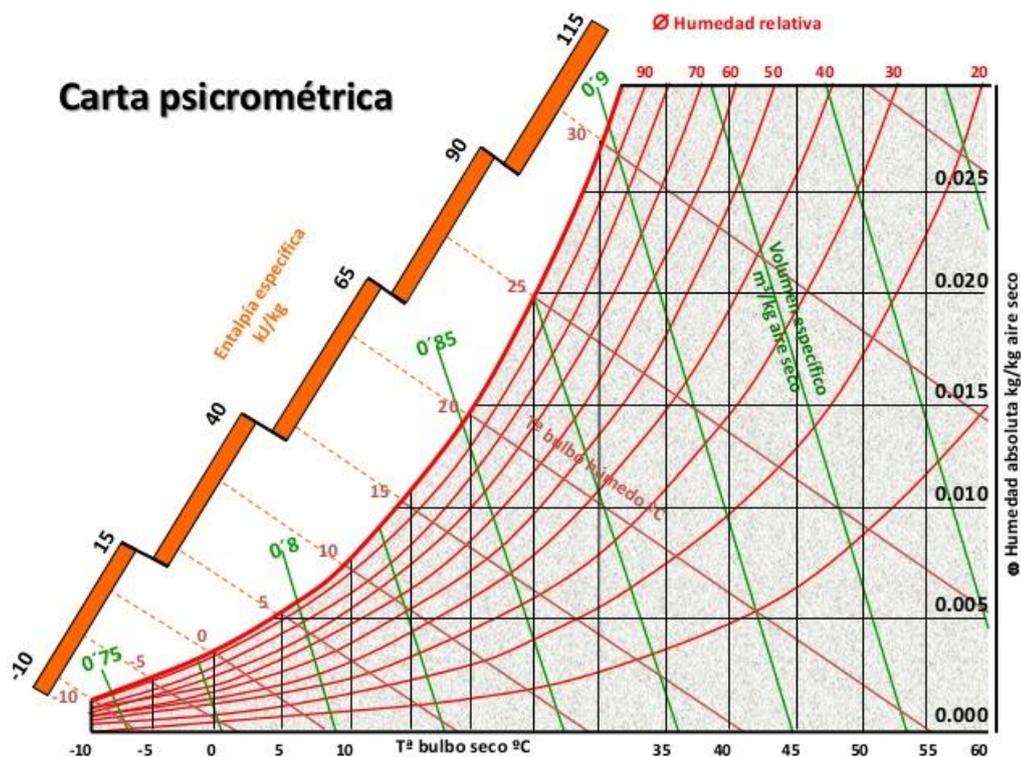
$$t = \frac{dX}{\left(-\frac{dX}{dt}\right)} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

### 2.2.6 Carta psicrométrica de humedad

Conocido también como cartas de humedades de Grosvenor, en este diagrama como señala Mc Cabe-Smith [20], “Un método muy empleado para medir la humedad, consiste en determinar simultáneamente las temperaturas del bulbo seco y del bulbo húmedo. A partir de estas lecturas se obtiene la humedad, localizando la intersección de la línea psicrométrica con la línea de saturación para el valor observado de la temperatura del bulbo húmedo y siguiendo la línea psicrométrica hasta su intersección con

la ordenada correspondiente a la temperatura del bulbo seco. se representan las líneas de humedades relativas o porcentuales, de humidificación adiabática, de temperatura húmeda, entre otros”.

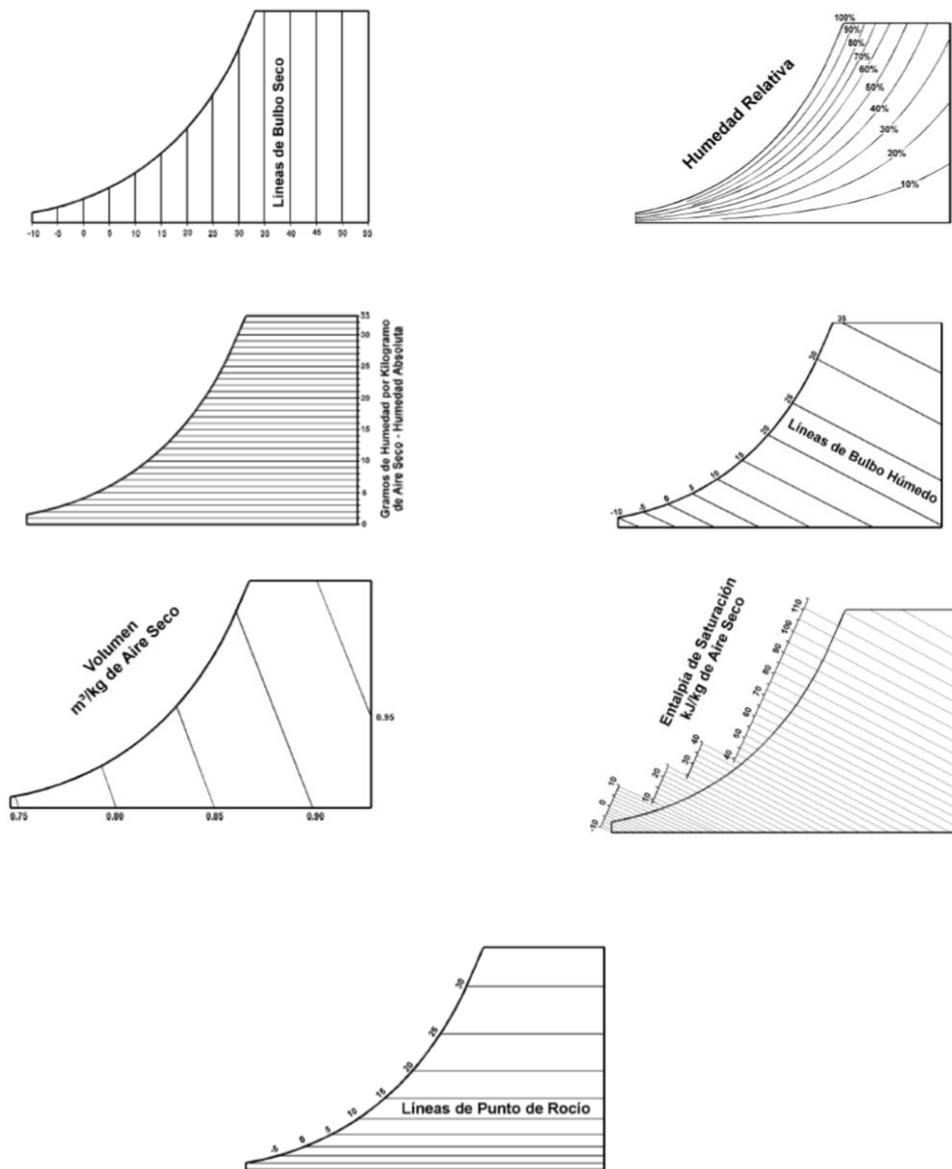
Figura 2.8  
CARTA PSICROMÉTRICA



Fuente: *Manual de practica de laboratorio de física de fluidos* [35]

Por medio de este diagrama se puede conocer las condiciones termodinámicas del aire como son principalmente: temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo, el volumen específico, la temperatura del punto de rocío, la humedad específica, la humedad relativa, la humedad absoluta, calor total o entalpia. Indicar además que conociendo dos de estos puntos se puede determinar todos los demás. En caso de la investigación se partió de los puntos de temperatura de bulbo seco y temperatura de bulbo húmedo.

Figura 2.9  
LÍNEAS CORRESPONDIENTES AL DIAGRAMA PSICROMETRICO



Fuente: *Manual de practica de laboratorio de física de fluidos* [35]

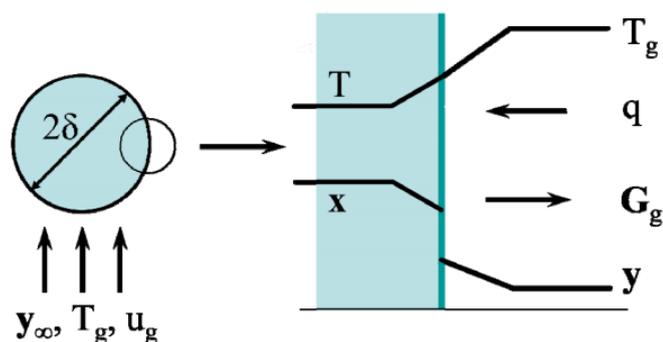
### 2.2.7 Modelamiento

Con la ayuda de las matemáticas y sus expresiones que en ella están implícitas, se relacionan las variables de interés en las investigaciones desarrolladas, para tener un sentido más claro de lo que suceda en el interior de algún equipo o dispositivo de operación.

De acuerdo con Maldonado Granados [15], Luis; “Comprender y entender los procesos del mundo real a partir de la interacción entre múltiples componentes y predecir lo que puede pasar es una poderosa motivación para el desarrollo del conocimiento en la sociedad contemporánea. En este proceso, la matemática incorpora tanto los desarrollos algebraicos como la representación gráfica”.

En el secador de lecho vibro-fluidizado desarrollado por Picado, A. y Martínez. J. [28] desarrollan el modelado y simulación basado en los fenómenos de transporte de masa y calor tal como se muestra a continuación:

Figura 2.10  
ESQUEMA DEL SECADO DE UNA PARTÍCULA EN UN GAS INERTE.



Fuente: Picado, A. y Martínez, J.

En donde aplica “las ecuaciones de modelo basado en la ecuación de difusión para el caso de la transferencia de masa y la ecuación de

conducción y la expresión de conducción en el caso de la transferencia de calor, tal como muestra en la siguiente expresión:

$$v * \frac{\partial x}{\partial z} = D \left( \frac{\partial^2 x}{\partial r^2} + \frac{2}{r} * \frac{\partial x}{\partial r} \right) \quad \text{Ecuación 2.9}$$

$$v * \frac{\partial T}{\partial z} = Dh \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} * \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Puente Diaz et al. [29] desarrollan el modelo matemático al proceso de secado asistido por infrarrojos de descartes de limón en donde basado en modelos matemático establecidos logra encontrar la humedad del producto para distintos tiempos con los parámetros indicados. Ello ajustando a determinados modelos matemáticos los cuales presentan parámetros y constantes que determinó por medio de pruebas experimentales y decidiendo el mejor modelo a través de un estudio estadístico.

En la presente investigación se partió del balance de materia en estado no estacionario considerando la semilla de uva quebranta de forma esférica y aplicando la ley de Fick para la transferencia de masa, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = D_{AB} * \left( \frac{1}{r} * \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 * \frac{\partial m}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \text{sen}\theta} * \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \text{sen}\theta * \frac{\partial m}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 * \text{sen}^2 \theta} * \frac{\partial^2 m}{\partial \phi^2} \right)$$

Ecuación 2.11

Considerando el movimiento de la humedad dentro de la semilla de uva en la dirección radial:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = D_{AB} * \left( \frac{\partial^2 m}{\partial r^2} + \frac{2}{r} * \frac{\partial m}{\partial r} \right) \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Siendo  $D_{AB}$  es el coeficiente de difusividad.

Considerando la evaporación de la humedad como una extracción del agua, se puede representar como lo indica Carrasco Venegas, Luis en su libro Modelamiento de los Fenómenos de transporte [3].

$$\frac{\partial m}{\partial t} = D_e * \left( \frac{\partial^2 m}{\partial r^2} + \frac{2}{r} * \frac{\partial m}{\partial r} \right) - K * m^n \quad \text{Ecuación 2.13}$$

La discretización es un proceso matemático mediante el cual se obtienen resultados aproximados de ecuaciones diferenciales de un fenómeno o proceso, asimismo como indica Chapra [5] en su libro de métodos numéricos.

Discretizando la ecuación 2.13, queda la siguiente expresión:

$$\frac{dmi}{dt} = D_e \left( \frac{m_{i+1} - 2m_i + m_{i-1}}{(\Delta r)^2} + \frac{2}{r} * \frac{m_i - m_{i-1}}{(\Delta r)} \right) - k * mi^n \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Como se puede observar en la ecuación anterior, para  $r=0$  la ecuación se vuelve indeterminada, sin embargo esta indeterminación se levanta mediante:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{1}{r} * \frac{dm}{dr} = \frac{d^2 m}{dr^2} \quad \text{Ecuación 2.15}$$

Por lo que la ecuación 2.13 queda de la siguiente manera:

$$\frac{dm}{dt} = 3D_e * \frac{\partial^2 m}{\partial r^2} - k * m^n \quad \text{Ecuación 2.16}$$

Aplicando el método de Lines a la ecuación se obtiene:

$$\frac{dmi}{dt} = 3D_e \left( \frac{m_{i+1} - 2m_i + m_{i-1}}{(\Delta r)^2} \right) - k * mi^n \quad \text{Ecuación 2.17}$$

Considerando 10 puntos para segmentar el radio de la semilla de uva y evaluando en la ecuación 2.14 se generó el siguiente grupo de ecuaciones que se desarrolla en forma simultánea por medio del programa Polymath.

Tabla 2.1  
SISTEMA DE ECUACIONES DIFERENCIALES PARA EL DESARROLLO DEL MODELO DIFUSIVO EN EL INTERIOR DE LA SEMILLA DE UVA.

i=0	$\frac{dm_0}{dt} = 3De \left( \frac{m_1 - m_0}{(\Delta r)^2} \right) - k * m_0^n$
i=1	$\frac{dm_1}{dt} = De \left( \frac{m_2 - 2m_1 + m_0}{(\Delta r)^2} + \frac{2}{\Delta r} * \frac{m_1 - m_0}{(\Delta r)} \right) - k * m_1^n$
i=2	$\frac{dm_2}{dt} = De \left( \frac{m_3 - 2m_2 + m_1}{(\Delta r)^2} + \frac{2}{2\Delta r} * \frac{m_2 - m_1}{(\Delta r)} \right) - k * m_2^n$
i=3	$\frac{dm_3}{dt} = De \left( \frac{m_4 - 2m_3 + m_2}{(\Delta r)^2} + \frac{2}{3\Delta r} * \frac{m_3 - m_2}{(\Delta r)} \right) - k * m_3^n$
i=4	$\frac{dm_4}{dt} = De \left( \frac{m_5 - 2m_4 + m_3}{(\Delta r)^2} + \frac{2}{4\Delta r} * \frac{m_4 - m_3}{(\Delta r)} \right) - k * m_4^n$
i=5	$\frac{dm_5}{dt} = De \left( \frac{m_6 - 2m_5 + m_4}{(\Delta r)^2} + \frac{2}{5\Delta r} * \frac{m_5 - m_4}{(\Delta r)} \right) - k * m_5^n$
i=6	$\frac{dm_6}{dt} = De \left( \frac{m_7 - 2m_6 + m_5}{(\Delta r)^2} + \frac{2}{6\Delta r} * \frac{m_6 - m_5}{(\Delta r)} \right) - k * m_6^n$
i=7	$\frac{dm_7}{dt} = De \left( \frac{m_8 - 2m_7 + m_6}{(\Delta r)^2} + \frac{2}{7\Delta r} * \frac{m_7 - m_6}{(\Delta r)} \right) - k * m_7^n$
i=8	$\frac{dm_8}{dt} = De \left( \frac{m_9 - 2m_8 + m_7}{(\Delta r)^2} + \frac{2}{8\Delta r} * \frac{m_8 - m_7}{(\Delta r)} \right) - k * m_8^n$
i=9	$\frac{dm_9}{dt} = De \left( \frac{m_{10} - 2m_9 + m_8}{(\Delta r)^2} + \frac{2}{9\Delta r} * \frac{m_9 - m_8}{(\Delta r)} \right) - k * m_9^n$
i=10	$\frac{dm_{10}}{dt} = De \left( \frac{m_{11} - 2m_{10} + m_9}{(\Delta r)^2} + \frac{2}{10\Delta r} * \frac{m_{10} - m_9}{(\Delta r)} \right) - k * m_{10}^n$

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

$m_i$  = masa del agua (g) en el intervalo de radio  $i=0,1,2,3,\dots,10$  para un determinado tiempo

$D_e$  = Difusividad efectiva ( $m^2/g$ )

$k$  = constante cinética de extracción (1/s)

### 2.3 Definición de términos básicos

#### **Humedad en base húmeda:**

Según indica Treybal [34] “el contenido de humedad de un sólido o solución generalmente se describe en función del porcentaje en peso de humedad; a menos que se indique otra cosa, se sobreentiende que está expresado en base húmeda” además señala la siguiente expresión:

$$\frac{Kg \text{ humedad}}{Kg \text{ sólido húmedo}} * 100 = \frac{Kg \text{ humedad}}{Kg \text{ sólido húmedo} + Kg \text{ sólido seco}} * 100$$

Expresa además de la siguiente forma:

$$\frac{Kg \text{ humedad}}{Kg \text{ sólido húmedo}} * 100 = \frac{100X}{1 + X}$$

#### **Humedad en base seca:**

Treybal [34] señala la humedad de un producto en base seca mediante la siguiente expresión:

$$X = \frac{Kg \text{ de humedad}}{Kg \text{ sólido seco}}$$

**Humedad de equilibrio:  $X^*$** 

Asimismo señala Treybal [34] “es el contenido de humedad de una sustancia que está en el equilibrio con una presión parcial dada del vapor.” A la vez señalan Martínez y Rus [18] la humedad de equilibrio “es pues el límite al que puede llevarse el contenido de humedad de un material sólido por contacto con el fluido de humedad y temperatura determinadas, hasta alcanzar las condiciones de equilibrio”

**Humedad libre:**

“La humedad libre es la humedad contenida por una sustancia en exceso de la humedad en el equilibrio:  $X - x^*$ . Sólo puede evaporarse la humedad libre; el contenido de humedad libre de un sólido depende de la concentración del vapor en el gas.” Señala Treybal [34]

**Humedad Ligada:**

Como indican Martínez y Rus [18] “el valor de la humedad de equilibrio del sólido en contacto con el gas saturado. Los sólidos con humedad ligada son los higroscópicos.” Entendiéndose por cuerpo higroscópico como señalan los mismos autores “Cuando la presión de vapor del líquido que acompaña al sólido es menor que la tensión de vapor del líquido a la misma temperatura se dice que el sólido es higroscópico.”

**Temperatura de rocío**

Representa la temperatura a la cual el contenido de agua que hay en el aire empieza a condensarse, este punto se alcanza cuando el vapor de agua contenida en el aire llega a su nivel de saturación. Esto es posible presenciarlo en ocasiones como por ejemplo en los vidrios o espejos dentro de la ducha o cuando estamos en el interior de un auto. Este punto también se puede conocer a través del diagrama psicrométrico.

### **Temperatura de bulbo seco**

La temperatura de bulbo seco es aquella temperatura que se mide con un termómetro común de mercurio o un dispositivo equivalente, el cual nos permite conocer la temperatura del aire seco y el vapor de agua en las condiciones de operación que se opere. La característica importante de esta medida es que el bulbo del termómetro o sensor tiene que estar seco.

### **Temperatura de bulbo húmedo**

La temperatura de bulbo húmedo se mide con un termómetro convencional de mercurio o un dispositivo equivalente nos permite determinar la temperatura del aire húmedo. Particularmente para esta medida el bulbo del dispositivo tiene que estar envuelto en un paño húmedo o algodón humedecido. Esta temperatura resulta ser más baja que la temperatura de bulbo seco, ello se debe a la evaporación del agua produciendo así un enfriamiento en el bulbo del dispositivo, además mientras la humedad relativa del ambiente sea mucho menor, más rápido se produce el enfriamiento del termómetro por lo que registra una temperatura inferior a la temperatura del bulbo seco.

### **Humedad relativa**

La humedad relativa del aire expresa la razón entre la cantidad de vapor de agua que contiene cierta masa de aire y lo máxima de vapor de agua que podría tener esa misma cantidad de aire.

### III. VARIABLES E HIPÓTESIS

#### 3.1 Definición de Variables

##### 3.1.1 Variable dependiente

Como variable dependiente se ha considerado el porcentaje de humedad de la semilla de uva quebranta a la salida del secador rotatorio con aire caliente luego del proceso de secado del mismo.

INDICADORES: Ecuaciones y modelos teóricos y experimentales que establecen la relación entre el secado y las variables independientes.

##### 3.1.2 Variables independientes

X: Proceso del secado de semillas de uva quebranta en un secador rotatorio.

#### INDICADORES

X1=Temperatura de entrada del aire.

X2=Flujo de aire caliente.

X3=Velocidad de rotación del secador

X4=Peso de la materia a secar

#### 3.2 Operacionalización de las Variables

La operacionalización de las variables se logra cuando se descomponen las variables en dimensiones y estas a su vez son traducidas en indicadores que permitan la observación directa y la medición.

La operacionalización de las variables del proceso de secado se describe en la cuadro 3.1, así como su interrelación, indicadores e índices. Que sirven para realizar el modelamiento del proceso de secado de las semillas de uva en un secador rotatorio con aire caliente.

**CUADRO 3.1**  
**MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES**

<b>VARIABLE</b>	<b>DEFINICION CONCEPTUAL</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>INDICE</b>
<p><b>Variable dependiente.</b></p> <p>El porcentaje de humedad de la semilla de uva quebranta a la salida del secador rotatorio con aire caliente en el proceso de secado del mismo.</p>	<p>La humedad es el porcentaje de agua contenida en las semillas de uva quebranta.</p>	<p>Y1=Humedad de las semillas secas a la salida del secador.</p>	<p>%</p>
<p><b>Variables independientes</b></p> <p>Proceso de secado de la semilla de uva quebranta en un secador rotatorio con aire caliente.</p>	<p>El secado es un proceso unitario que extrae el agua presente en un determinado cuerpo.</p>	<p>X1=Temperatura de secado.</p> <p>X2=Flujo de aire.</p> <p>X3=Velocidad de rotación del secador.</p> <p>X4=Peso de las pepitas en el secador.</p>	<p>°C</p> <p>L/min</p> <p>RPM</p> <p>g</p>

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la variable Independiente se presenta los valores óptimos para el proceso de secado como: el flujo de aire caliente, temperatura de secado, velocidad de rotación del secador, el peso de las semillas de uva quebranta.

En cuanto a la variable Dependiente:

La operacionalización de las variables independientes con la dependiente se ha realizado previo diseño experimental siguiendo la metodología de Taguchi , luego de nueve corridas experimentales con replica para una mayor precisión, habiéndose logrado establecer el modelo matemático multivariable que explica el proceso de secado en relación a la temperatura, flujo de aire, velocidad rotacional del secador rotatorio a nivel piloto.

### 3.3 Definición de Hipótesis

#### 3.3.1 Hipótesis General

En el proceso de secado de las semillas de uva quebranta en un secador rotatorio, es posible obtener una humedad final menor al 6%, si se trabaja con temperatura de secado de 80°C, flujo de aire de 425 L/min, velocidad rotacional de 15 RPM y un peso de muestra de 50g.

#### 3.3.2 Hipótesis Específicas

- a. Un secador rotatorio de aire caliente, debidamente enchaquetado permite optimizar el secado de las semillas de uva quebranta.
- b. La temperatura de secado, el flujo de aire caliente, la velocidad de rotación del secador y el peso dosificado de semillas de uva, permiten obtener semillas con humedad final menor a 6%.
- c. El establecimiento de las variables que describan el proceso de secado de semillas de uva usando un secador rotatorio con aire caliente, permiten determinar las ecuaciones de comportamiento del proceso de secado.

## IV. METODOLOGÍA

### 4.1 Tipo de investigación

Diversos autores de Metodología de la Investigación han clasificado la investigación con diversos enfoques, de acuerdo con Namakforosh [23] (2013 pg. 93), la presente tesis se enmarca en Investigación Causal dado que “se espera que una variable independiente produzca ciertos cambios en la variable dependiente, así como en la dirección y magnitud especificada por la teoría.”

Agrega Namakforosh [23] que “una investigación causal tiene por objetivo proporcionar evidencia suficiente sobre las relaciones causales, por lo general, este tipo de estudio se realiza por medio de diseño experimental”.

El tipo de Investigación es Aplicada, ya que sus resultados podrán ser aplicados a procesos de secado, específicamente se considera como investigación experimental, por cuanto fue necesario realizar corridas en el Laboratorio para conocer la influencia de la Temperatura, flujo del aire caliente, velocidad de rotación del secador rotatorio, sobre el secado de la semilla de uva, es decir experimentos puros desde la perspectiva de la Metodología de la Investigación. Hernández Sampieri [12].

Además, se establecerán correlaciones entre el secado y las variables independientes, esto es, se deben establecer relaciones de causa efecto

### 4.2 Diseño de la Investigación

La palabra diseño en metodología de la investigación científica, se refiere a la estrategia que se utilizará para obtener la información que se necesita para responder a las preguntas formuladas y por lo tanto lograr el desarrollo de la investigación. Hernández Sampieri [12]. Estrategia es el conjunto de acciones para lograr los objetivos.

Para el diseño de experimentos se conocen los diseños Factoriales y el diseño de Genichi Taguchi, sin embargo es menester definir previamente: Factor “Los fenómenos que potencialmente causan variaciones, y que son controlados por el experimentador, se denominan factores”. Kavanaugh C.F. [13] 2002.

Diseño robusto, “es la búsqueda por el juego de condiciones para lograr un comportamiento del proceso óptimo” Kavanaugh C.F. [13] 2002

En Ingeniería Química a los Factores se les denomina variables independientes y que son considerados por ambos métodos señalados en el párrafo anterior.

En el diseño experimental de la presente tesis se han establecido cuatro variables relevantes al proceso de secado en el secador rotatorio con aire caliente, habiéndose precisado tres niveles o valores que han de tomar, así como el número de ensayos o experimentos realizados en el laboratorio de investigación de la FIQ-UNAC.

## DISEÑO EXPERIMENTAL TAGUCHI

De acuerdo con Kavanaugh C.F. [13] el diseño Taguchi enfatiza en “Diseños robustos y Minimización de la función de pérdida económica debido a las corridas en condiciones no óptimas”, es decir minimiza costos de la experimentación, comparado con los métodos factoriales clásicos.

En el diseño Taguchi se utiliza la simbología con la letra L seguida de un número que indica la cantidad de experimentos que se deberán realizar en nuestro caso será L9.

Por otro lado se definen:

a= el número de pruebas que se realizaran, es decir el número de filas.

b= el número de valores o niveles que toman las variables independientes, en esta tesis es 3.

c= representa el número de variables independientes o factores que se analizan, en la presente investigación son 4 factores: temperatura, flujo de aire caliente, velocidad rotacional y peso de la materia.

En la presente tesis, se usó el diseño ortogonal Taguchi con 4 Factores y 3 Niveles para cada factor, como se detalla en la siguiente tabla.

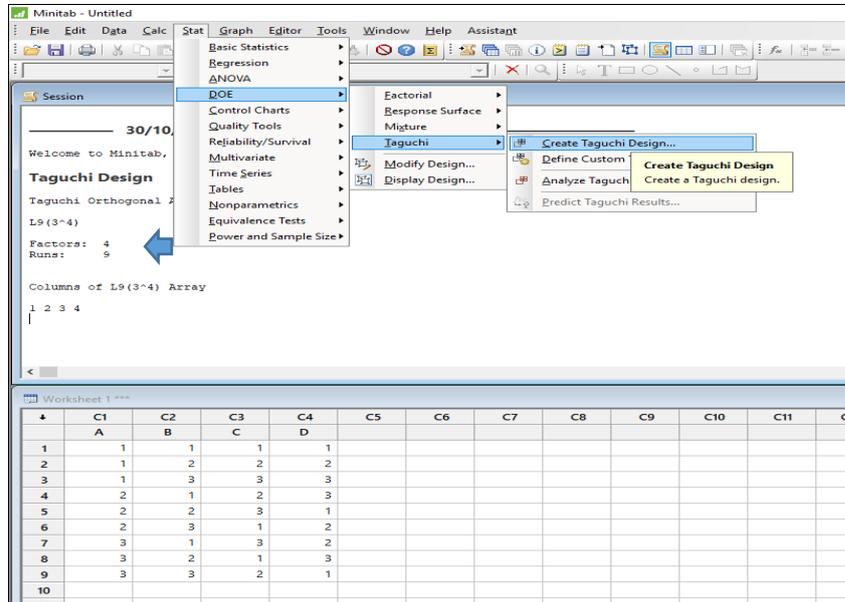
Tabla 4.1  
FACTORES Y NIVELES PARA EL EXPERIMENTO

NIVELES 3	FACTORES 4			
	X1 TEMPERATURA	X2 FLUJO	X3 RPM	X4 PESO
1	60	350	5	50
2	70	425	10	75
3	80	500	15	100

Fuente: Elaboración propia

Se procedió al diseño experimental de Taguchi usando el software MINITAB 17 siendo el resultado como se muestra a continuación

Figura 4.1  
DISEÑO TAGUCHI CON MINITAB 17



Fuente: Elaboración propia usando Minitab 17

En forma más detallada, el diseño experimental es de la forma:

Tabla 4.2  
DISEÑO EXPERIMENTAL

Nº	FACTORES O VARIABLES INDEPENDIENTES			
	X1	X2	X3	X4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Fuente: Elaboración propia

Los experimentos que se han desarrollado siguiendo el presente diseño experimental fueron como se detalla a continuación:

Tabla 4.3  
DISEÑO EXPERIMENTAL TAGUCHI PARA EL PROCESO DE SECADO

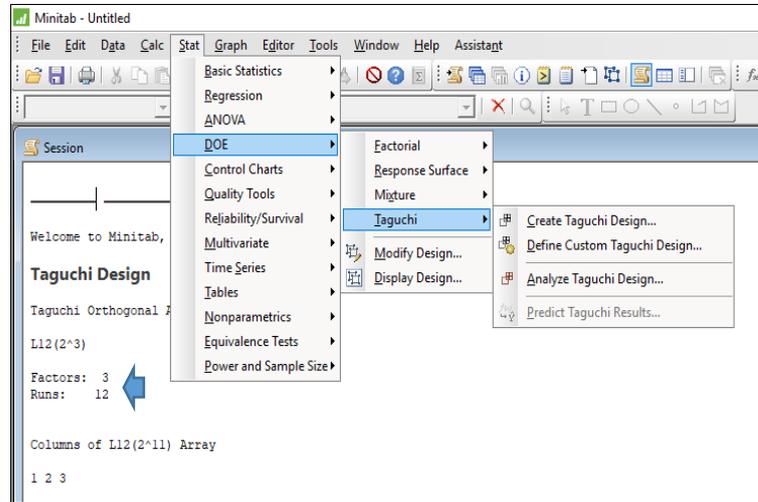
N°	X1 TEMPERATURA AIRE °C	X2 FLUJO AIRE Lt/min	X3 RPM SECADOR	X4 PESO gr
1	60	350	5	50
2	60	420	10	75
3	60	500	15	100
4	70	350	10	100
5	70	420	15	50
6	70	500	5	75
7	80	350	15	75
8	80	420	5	100
9	80	500	10	50

Fuente: Elaboración propia

Es importante destacar que con la finalidad de trabajar con una mayor precisión y menor variabilidad se realizaron experimentos con dos replicas adicionales basadas en este diseño experimental para poder establecer el modelo matemático que explique el proceso de secado en el secador rotatorio continuo con aire caliente a nivel piloto.

Adicionalmente se ha realizado el estudio de la cinética de secado de las semillas de uva quebranta, por lo cual se consideró pertinente desarrollar un diseño experimental Taguchi para trabajar con las variables Temperatura, Flujo de aire caliente y peso de semillas de uva, utilizando la función estadística de Minitab 17, se tuvieron que realizar 12 corridas experimentales para el caso de la cinética de secado.

Figura 4.2  
EL DISEÑO TAGUCHI PARA LA CINETICA DEL SECADO



Fuente: Elaboración propia usando MINITAB 17

Los experimentos realizados para la evaluación de la cinética del secado se detallan en la tabla 4.4

Tabla 4.4  
RESUMEN DE EXPERIMENTOS REALIZADOS PARA LA DETERMINACION DE LA CINETICA DEL SECADO

EXPERIMENTO	TEMPERATURA	FLUJO	Peso
N°	°C	lt/min	gr
1	70	350	5
2	70	350	3
3	60	350	3
4	60	350	5
5	80	350	3
6	80	350	5
7	80	500	5
8	80	500	3
9	70	500	3
10	70	500	5
11	60	500	3
12	60	500	5

Fuente: Elaboración propia

A los resultados experimentales obtenidos se les analiza en relación a modelos matemáticos teóricos conocidos de la cinética de secado, como los que se presentan a continuación:

**MODELO DE PAGE :**

$$X = \text{EXP}(-kt^n)$$

**MODELO DE HENDERSON:**

$$X = a \cdot \text{EXP}(-kt)$$

**MODELO LOGARITMICO:**

$$X = a \cdot \text{EXP}(-kt) + c$$

**MODELO DE PELEG:**

$$X = X_0 - t / (k_1 + k_2 \cdot t)$$

**MODELO DE DOS TERMINOS:**

$$X = a \cdot \text{EXP}(-kt) + b \cdot \text{EXP}(-g \cdot t)$$

**MODELO DE DOS TERMINOS EXPONENCIAL:**

$$X = a \cdot \text{EXP}(-kt) + (1-a) \cdot \text{EXP}(-k \cdot a \cdot t)$$

**MODELO DE DOS TERMINOS EXPONENCIAL:**

$$X = a \cdot \text{EXP}(-k \cdot t) + b \cdot \text{EXP}(-g \cdot t) + c \cdot \text{EXP}(-h \cdot t)$$

**MODELO DE VERMA:**

$$X = a \cdot \text{EXP}(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \text{EXP}(-g \cdot t)$$

**MODELO DE MIDILLI:**

$$X = a \cdot \text{EXP}(-k \cdot t^n) + b \cdot t$$

Siendo

X = humedad

t= tiempo de secado

De modo tal que los datos experimentales, se probaron para conocer a que modelos se ajustan mejor la cinética de secado de semillas de uva quebranta.

### 4.3 Población y muestra

#### 4.3.1 Determinación del universo

La cobertura de la investigación básicamente se relaciona con la disponibilidad de semillas de uva, pero al mismo tiempo con la capacidad de producción del secador rotatorio con aire caliente.

Se considera como unidad muestral 1 g de semillas de uva, en tal sentido se calcula primero la capacidad de producción del secador rotatorio piloto, luego se determina el tamaño de la muestra.

Cálculo del volumen interno del secador rotatorio:

Longitud  $L = 62 \text{ cm}$

Radio  $R = 6.25 \text{ cm}$

Volumen  $V = \pi \cdot R^2 \cdot L = 3.1416 \cdot 6.25^2 \cdot 62 = 7\,608.5 \text{ cm}^3$ .

Se considera una capacidad de carga de 15% para el secador rotatorio

Capacidad de carga  $= 0.15 \cdot 7\,608.5 = 1\,141.3 \text{ cm}^3$

La capacidad de carga del secador en peso es:

Masa = densidad \* volumen

La densidad aparente de la pepita de uva se determinó con ayuda de una probeta y una balanza de precisión.

Densidad de las semillas = 1.05 g/cc

De esta manera resulta la capacidad de carga  $= 1.05 \cdot 1\,141.3 = 1\,198.3 \text{ g}$ . lo cual se considera como la Muestra experimental.

Es decir,  $N = 1\,198 \text{ g}$ .

#### 4.3.2 Determinación de la muestra

La ciencia de la Estadística define como población finita cuando se tienen menos de 100 000 unidades muestrales, que es el caso en la presente

investigación porque N= 1198, por lo que la fórmula correspondiente para el cálculo del tamaño de la muestra es:

$$n = \frac{Z^2 * P * Q * N}{(N - 1) * E^2 + Z^2 * P * Q} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Siendo:

N= Población estadística= 1198 g.

Hernández Sampieri [12] señala (pg 179) que “asumimos que “p” y “q” serian de 50% y que resulta lo más común, particularmente cuando seleccionamos por vez primera una muestra en una población”, situación que se da en la presente investigación.

En términos estadísticos y matemáticos se podrá verificar que cuando se considera P = 50% y Q= 50% se tendrá el mayor tamaño de muestra.

P= 50% favorable a los objetivos de la investigación

Q= 50% no favorable

E= máximo error permisible 6%

Z= 1,96 por trabajar con 95% de confiabilidad.

n = tamaño de la muestra

Reemplazando datos en la Ecuación 4.1

$$n = \frac{1198 * 1.96^2 * 0.5 * 0.5}{0.06^2 * (1198 - 1) + 1.96^2 * 0.5 * 0.5}$$

n = 218 g. de semilla de uva quebranta.

Este tamaño se obtuvo a partir de las semillas de uva quebranta procedente de Ica, para lo cual se utilizó el muestreo aleatorio simple complementado por la técnica de cuarteo. Dicho tamaño de muestra se utilizó para el desarrollo de los diversos experimentos según el diseño experimental explicado líneas arriba.

#### 4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

##### 4.4.1 Materiales y equipos

###### A.- Materia prima

Para la obtención de las semillas de uva quebranta se realizaron visitas previas a diversos productores de piscos y vinos en el departamento de Ica, para conocer la fecha exacta de vendimia, así como del prensado de las uvas para poder recoger oportunamente las semillas frescas para su secado inmediato, el acopio de las semillas de uva quebranta se pudieron realizar en la segunda quincena de marzo del 2018, periodo en el cual se realizó la vendimia.

Figura 4.3  
RESIDUOS DE LA PRODUCCION DE VINOS Y PISCOS



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.4  
SEPARANDO LAS SEMILLAS DE LOS ORUJOS EN LA BODEGA



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.5  
MUESTRA DE SEMILLAS DE UVA



Fuente: Elaboración propia

## B.- Equipos

A continuación, se detallan los principales equipos utilizados en la presente Tesis

Figura 4.6  
TAMICES CON SISTEMA VIBRATORIO LOPU-FIQ-UNAC



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.7  
SECADOR ROTATORIO UTILIZADO PARA EL ESTUDIO DE LA  
CINETICA DEL SECADO



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.8  
SOPLADOR DE AIRE CALIENTE



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.9  
SECADOR ROTATORIO METALICO



Fuente: Elaboración propia

El sistema que se ha utilizado en el estudio del proceso de secado para su correspondiente modelamiento comprende:

Soplador de aire caliente de 350 a 500 lt/min.

3 Válvulas de paso de ½ pulgada para las purgas y regulaciones del flujo.

Medidor de flujo utilizando placa de orificio.

Tolva de dosificación de semillas con reducción en la válvula de descarga.

Secador rotatorio con aislamiento térmico de ¾”

Motor para la rotación del secador de 0.75 HP.

Variador de velocidad.

Canal o chute de descarga.

Exhaustor de 1 pulgada para los vahos.

Angulo de inclinación 3° respecto a la horizontal.

Figura 4.10  
EXHAUSTOR PARA REMOCION DE VAHOS



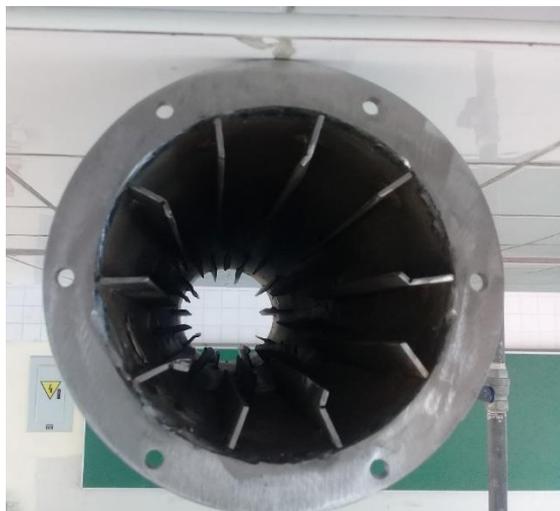
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.11  
VERNIER PARA MEDIR LOS DIAMETROS INTERNOS



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.12  
PARTE INTERIOR DEL SECADOR ROTATORIO CONSTRUIDO



(a)

Fuente: Elaboración propia



(b)

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.13  
DESECADOR DE VIDRIO



. Fuente: Elaboración propia

Figura 4.14  
INTERFACE DATA LOGGER ENTRE LAS 3 TERMOCUPLAS  
ACOPLADAS AL SECADOR ROTATORIO Y LA COMPUTADORA



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.15  
BALANZA A LA SALIDA DEL SECADOR ROTATORIO METALICO



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.16  
BALANZA DE HUMEDAD ADAM AMB 50



Fuente: Elaboración propia

#### 4.5 Procedimientos de recolección de datos

Los procedimientos utilizados para la recolección de datos, se describen por etapas de la investigación, los mismos que están relacionados con cada uno de los objetivos específicos planteados.

Para el objetivo a.- “Describir las características de un secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto que permita el secado eficiente de semillas de uva quebranta de Ica.”

Se acondicionó el secador rotatorio con aire caliente para el secado de semillas de uva quebranta en el Laboratorio de Investigación de la FIQ-UNAC.

Los parámetros que se han tenido que establecer para caracterizar el secador rotatorio con aire caliente son:

Longitud  
Diámetro externo  
Diámetro interno  
Material de construcción  
Potencia del motor de accionamiento  
Características del variador de velocidad

Procedimientos para lograr el objetivo b.- Especificar las variables independientes del proceso de secado de semillas de uva quebranta de Ica usando secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto para determinar el modelo matemático del proceso de secado.

Las variables que se han evaluado para el proceso de secado de las semillas de uva en el secador rotatorio son:

Flujo de aire caliente  
Temperatura de secado  
Velocidad de rotación del secador en RPM  
Peso de la muestra dentro del secador.

Por otro lado, el tiempo de residencia de secado de las semillas de uva quebranta, que en la presente investigación actúa como variable interviniente.

Procedimientos para lograr el objetivo c.- “Describir el proceso de secado de semillas de uva quebranta de Ica usando un secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto.”

1.- Se realizó la remoción de las impurezas de las semillas de uva, tales como los palillos, partículas sólidas, etc.

2.- Luego del correspondiente muestreo en campo y previa separación de impurezas, se procedió a determinar la distribución del tamaño de partícula utilizando el juego de tamices concordantes con la norma técnica ASTM E11 disponibles en el Laboratorio de Operaciones y Procesos Unitarios de la Facultad de Ingeniería Química, siendo los resultados los que se presentan a continuación:

Figura 4.17  
TAMIZADO DE LAS SEMILLAS DE UVA QUEBRANTA



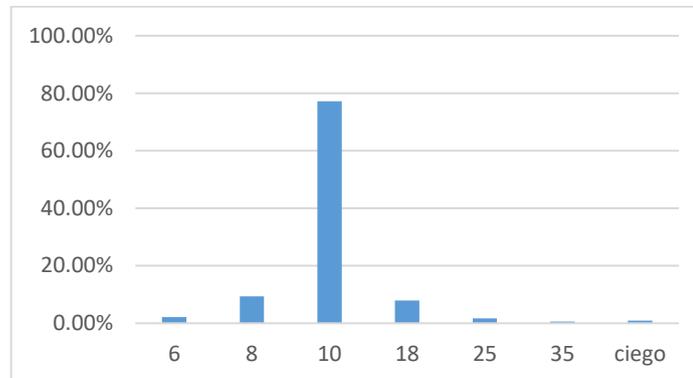
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.5  
ANÁLISIS DE MALLAS DE LAS SEMILLAS DE UVA QUEBRANTA

N° Malla	mm	pulgada	gr	%
6	3.35	0.132	2.29	2.17%
8	2.36	0.0937	9.83	9.33%
10	2	0.0787	81.39	77.23%
18	1	0.0394	8.36	7.93%
25	710 micron	0.0278	1.84	1.75%
35	500 micron	0.0197	0.64	0.61%
ciego			1.03	0.98%
		TOTAL	<b>105.38</b>	<b>100.00%</b>

Fuente: Elaboración propia

Grafica 4.1  
DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA DE LAS SEMILLAS DE  
UVA QUEBRANTA



Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar una distribución normal, semejante a la campana de Gauss, consecuentemente la investigación se ha centrado en semillas con malla ASTM N° 10, por ser el tamaño predominante, lo que equivale a decir con diámetro promedio de 2 mm de las semillas de uva, para efectos del proceso secado en el secador rotatorio metálico con aire caliente.

3.- Con el medidor de humedad ADAM AMB 50 se midió la humedad con la cual ingresan las semillas de uva quebranta al secador rotatorio y que en promedio es de 24%.

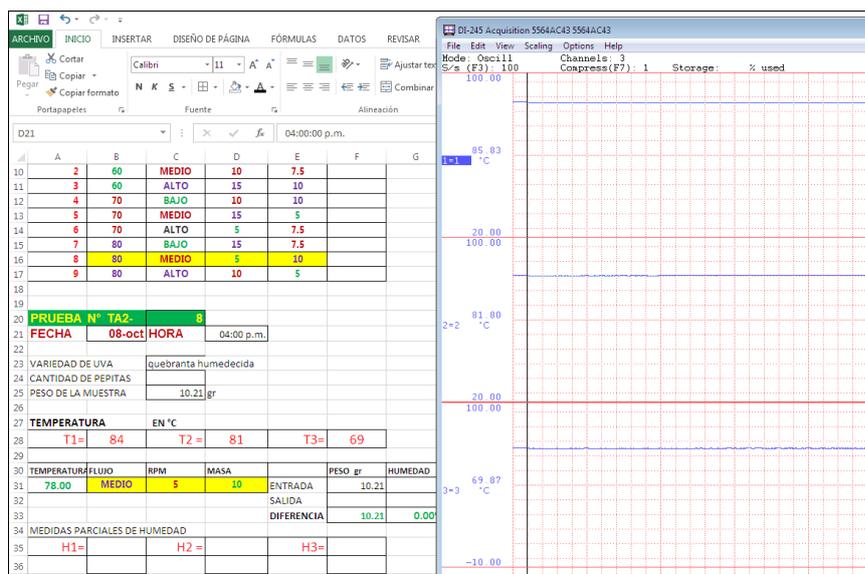
4.- Muestreo usando el método de cuarteo para tener las muestras de semillas de uva que se alimentaran al secador rotatorio. Se determinó la humedad de las semillas en la entrada al secador

5.-Se puso en funcionamiento el secador rotatorio así como el soplador de aire caliente.

6.-Se Introdujo la muestra a través del canal o “chute” de entrada al secador rotatorio.

7.- Se registraron las temperaturas en tres secciones del secador rotatorio utilizando las termocuplas tipo J, dado el rango de temperatura de secado que será entre 60° a 80°C, las cuales fueron debidamente acondicionadas en el interior del secador rotatorio para la elaboración del perfil de temperatura, así como para establecer la cinética del secado. Estas termocuplas para tal efecto fueron conectadas con una interface Data Logger (Data manager hardware), lo cual permitió traducir los pulsos a temperaturas en °C , como se ilustra en la parte derecha de la figura 4.18

Figura 4.18  
REGISTRO DE TEMPERATURA CON TERMOCUPLAS Y DATA LOGGER



Fuente: Elaboración propia

8.- Se midieron los tiempos de secado, siendo necesario expresar que en este caso el tiempo es una variable interviniente, más no dependiente, dado que en el proceso lo que se desea establecer es la humedad de salida de las semillas a la salida del secador.

9.- Se recepcionó las semillas secadas en el canal de descarga y de inmediato se introdujeron en un desecador de vidrio para evitar que se humedezca

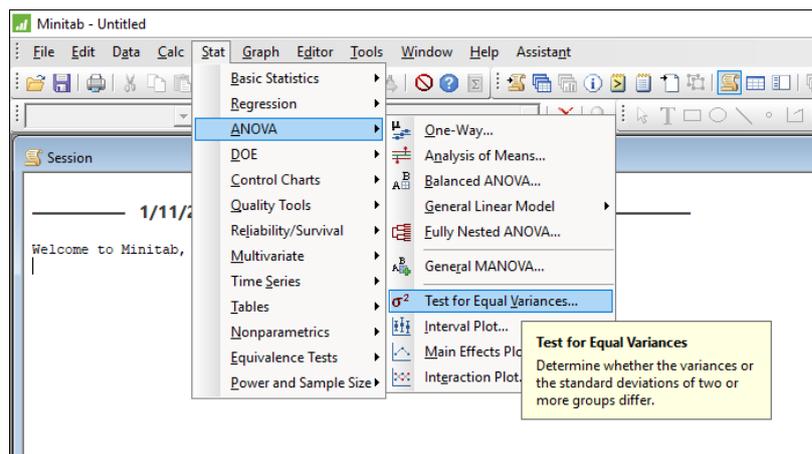
10.- Se determinó la humedad final de las semillas a la salida del secador rotatorio.

#### 4.6 Procesamiento estadístico y análisis de datos

El procesamiento estadístico de los resultados se ha realizado utilizando las diversas funciones de software especializados como es el caso de Minitab 17, Polymath y las funciones estadísticas de Excel, tal como Solver, regresión lineal y otros.

Así mismo se ha realizado un análisis de varianza ANOVA con ayuda del Minitab 17

Figura 4.19  
DISEÑO TAGUCHI CON MINITAB PARA EL SECADO



Fuente: Elaboración propia usando Minitab 17

Para la determinación del modelo que describe el proceso de secado se han realizado análisis de regresión de funciones multivariantes por cuanto la humedad final o de salida depende del flujo de aire caliente, temperatura dentro del secador, velocidad de rotación del secador, así como de la masa de semillas de uva a secar.

## V. RESULTADOS

Si bien es cierto que los objetivos específicos y el objetivo general de la tesis se focalizan en el modelamiento del proceso de secado de las semillas de uva en el secador rotatorio con aire caliente, es importante señalar la necesidad de conocer previamente el comportamiento cinético del secado de las semillas de uva, lo cual se ha realizado en un secador discontinuo y de allí se ha focalizado ya en el proceso de secado de las semillas de uva en el secador metálico rotatorio continuo, razón por la cual los resultados que se presentan en este capítulo serán presentados para ambas etapas.

El resultado respecto al objetivo específico a.- “Describir las características de un secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto que permita el secado eficiente de semillas de uva quebranta”.

Para la presente tesis se ha implementado en el laboratorio de Investigación de la Facultad de Ingeniería Química de la UNAC un sistema de secado con las características que se describen a continuación:

### SECADOR ROTATORIO:

Longitud = 62 cm

Diámetro interno = 12.5 cm

Angulo de inclinación = 3° con respecto a la horizontal.

Material = Acero inoxidable ASTM 306

Bridas laterales con espesor de 5mm

Tolva de dosificación de materia l a secar de 8 cm \* 8 cm \* 9 cm

Chute o canal de entrada de 2.5 cm

Chute de salida de 3.3 cm para la descarga de material seco

Sistema de rotación del secador con:

Motor marca Siemens de 0.75 HP, 60 Hz; 220 V, con factor de potencia de 0.77

Variador de velocidad, marca Siemens de 10 Amperios, 60 HZ, 220V

Pistola de aire caliente, marca Crown de 2000 Watts, 8,6 Amperios, con los siguientes rangos de operación

I.- Temperatura 50°C                      Flujo 350 L/min

II.- Temperatura 50° a 500°C        Flujo 350 L/min

III.- Temperatura 50 a 500 °C      Flujo 500 L/min

Figura 5.1  
SISTEMA DE SECADO UTILIZADO



Fuente: Elaboración propia

Con respecto al objetivo específico estipulado en el objetivo b. “Especificar las variables que intervienen en el proceso de secado de semillas de uva quebranta de Ica usando secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto para determinar el modelo matemático del proceso de secado”. Se detalla como sigue:

#### 5.1 Resultados para la determinación del modelo del proceso de secado en el secador rotatorio metálico.

Por la naturaleza del mismo proceso, se ha investigado en qué medida influyen la temperatura de secado, el flujo de aire caliente, la velocidad de rotación del secador y el peso de las semillas de uva quebranta, sobre la humedad final del material seco a la salida del equipo, habiéndose utilizado el secador rotatorio continuo con aire caliente en medio adiabático, toda vez que se implementó un aislamiento térmico con lana de vidrio para evitar que se disipe calor.

Los nueve experimentos según el diseño experimental Taguchi se realizaron con dos réplicas, dando en total tres corridas experimentales con la finalidad de trabajar con la mayor precisión posible, siendo los resultados para cada corrida como se detalla a continuación:

Tabla 5.1  
HUMEDAD DE SALIDA DE LA PRIMERA CORRIDA DE EXPERIMENTOS

	<b>X1</b>	<b>X2</b>	<b>X3</b>	<b>X4</b>	<b>HUMEDAD DE SALIDA</b>
<b>Experimento</b>	<b>temperatura</b>	<b>flujo</b>	<b>rpm</b>	<b>peso</b>	
1	60	350	5	50	11.00%
2	60	425	10	75	10.65%
3	60	500	15	100	11.98%
4	70	350	10	100	6.30%
5	70	425	15	50	5.36%
6	70	500	5	75	7.81%
7	80	350	15	75	5.28%
8	80	425	5	100	6.82%
9	80	500	10	50	5.36%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.2  
HUMEDAD DE SALIDA DE LA SEGUNDA CORRIDA DE EXPERIMENTOS

	X1	X2	X3	X4	HUMEDAD
Experimento	temperatura	flujo	rpm	peso	DE SALIDA
1	60	350	5	50	14.30%
2	60	425	10	75	13.69%
3	60	500	15	100	11.33%
4	70	350	10	100	7.29%
5	70	425	15	50	8.46%
6	70	500	5	75	8.56%
7	80	350	15	75	5.47%
8	80	425	5	100	6.43%
9	80	500	10	50	6.85%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.3  
HUMEDAD DE SALIDA DE LA TERCERA CORRIDA DE EXPERIMENTOS

Experimento	X1	X2	X3	X4	HUMEDAD
	temperatura	flujo	rpm	peso	DE SALIDA
1	60	350	5	50	15.44%
2	60	425	10	75	11.60%
3	60	500	15	100	14.07%
4	70	350	10	100	11.67%
5	70	425	15	50	7.63%
6	70	500	5	75	11.35%
7	80	350	15	75	10.04%
8	80	425	5	100	8.26%
9	80	500	10	50	8.34%

Fuente: Elaboración propia

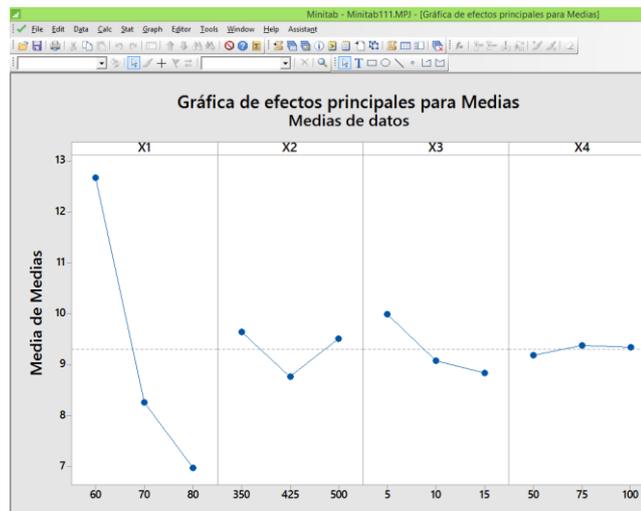
Tabla 5.4  
RESUMEN DE LOS VALORES PROMEDIO DE LOS EXPERIMENTOS

					<b>HUMEDAD DE SALIDA</b>			
	X1	X2	X3	X4	PRUEBA	REPLICA1	REPLICA2	PROMEDIO
Exper.	Tempe.	flujo	rpm	peso				
1	60	350	5	50	11.00%	14.30%	15.44%	13.58%
2	60	425	10	75	10.65%	13.69%	11.60%	11.98%
3	60	500	15	100	11.98%	11.33%	14.07%	12.46%
4	70	350	10	100	6.30%	7.29%	11.67%	8.42%
5	70	425	15	50	5.36%	8.46%	7.63%	7.15%
6	70	500	5	75	7.81%	8.56%	11.35%	9.24%
7	80	350	15	75	5.28%	5.47%	10.04%	6.93%
8	80	425	5	100	6.82%	6.43%	8.26%	7.17%
9	80	500	10	50	5.06%	6.05%	7.04%	6.05%

Fuente: Elaboración propia

Se realizó un análisis al diseño Taguchi considerando los valores de los 4 factores así como sus niveles con MINITAB 17 resultando el siguiente gráfico de medias.

Figura 5.2  
ANALISIS DE MEDIAS CON MINITAB



Fuente: Elaboración propia

De la figura 5.2 sobre la **gráfica de efectos principales para medias obtenidas** con Minitab, se concluye que los valores de las variables independientes que minimizan la humedad de salida de las semillas de uva, son:

Temperatura :80°C

Flujo :425 L/min

Velocidad de rotación del secador 15 RPM

Peso de muestra :50 g.

Como una forma de verificar la confiabilidad del modelo potencial seleccionado, se reemplazaron los valores de las variables señaladas en el párrafo anterior y se comprobó que la humedad de salida estimada con el modelo es de 5.8198%, lo que resulta menor al 6% señalado en la hipótesis general, lo cual corrobora la validez de la misma.

Con los valores de las variables señaladas en la tabla 5.4 y considerando el valor promedio de la humedad de salida se procedió a realizar las regresiones con los diversos modelos matemáticos vía Excel y se seleccionaron los que ofrecían mayor índice de correlación con una confiabilidad de 95% y que muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.5  
RESUMEN DE REGRESION LINEAL DE LOS MODELOS DEL  
PROCESO DE SECADO

MODELO	R	r2	b0	b1	b2	b3	b4
LINEAL	0.951389	0.905141	0.316978	-0.002978	-0.000026	-0.001150	0.000085
SEMILOGARITMICO	0.964463	0.930188	1.049304	-0.209066	-0.012123	-0.011174	0.006446
HIPERBOLICO	0.973794	0.948275	-14.027775	0.352821	0.003793	0.143614	-0.026864
INVERSO	0.974876	0.950384	-0.136070	14.522919	5.465487	0.093577	-0.460714
EXPONENCIAL	0.965377	0.931952	-0.072499	-0.031809	-0.000287	-0.012552	0.001648
<b>POTENCIAL</b>	<b>0.976566</b>	<b>0.953680</b>	<b>1886.366431</b>	<b>-2.226342</b>	<b>-0.130682</b>	<b>-0.122047</b>	<b>0.125507</b>

Fuente: Elaboración propia

El modelo que mejor explica los resultados experimentales obtenidos es el potencial y que matemáticamente se representa de la siguiente forma

$$Y = b_0 * X_1^{b_1} * X_2^{b_2} * X_3^{b_3} * X_4^{b_4}$$

En dicha ecuación se puede apreciar que  $b_0$  es el coeficiente adimensional que afecta a la expresión potencial, asimismo  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$  son coeficientes adimensionales las cuales influyen en las variables ya mencionadas:  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_4$  respectivamente.

De manera específica, el modelo experimental para el proceso de secado usando secador rotatorio con aire caliente para las semillas de uva quebranta a nivel piloto resultó:

$$Y = 1886.366431 * T^{(-2.226342)} * F^{(-0.130682)} * RPM^{(-0.122047)} * M^{(0.125507)}$$

Con índice de correlación  $R = 0.9765$

En este modelo  $Y$  es la humedad final de las semillas de uva quebranta a la salida del secador rotatorio.

Por ser el modelo potencial, estadísticamente establecido, seguidamente se presenta de manera detallada la regresión realizada en Excel sobre el modelo potencial, previamente linealizado.

Tabla 5.6  
REGRESION LINEAL DEL MODELO POTENCIAL PARA EL PROCESO  
DE SECADO EN SECADOR ROTATORIO METALICO

**MODELO POTENCIAL**

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.97656562
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.9536804
R <sup>2</sup> ajustado	0.9073608
Error típico	0.0894314
Observaciones	9

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	4	0.65868555	0.16467139	20.5891332	0.006237758
Residuos	4	0.0319919	0.00799798		
Total	8	0.69067745			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>
Intercepción	7.54240773	1.70471705	4.42443379	0.01147138	2.80935
Variable X 1	-2.22634233	0.25360633	-8.77873323	0.00092845	-2.93046
Variable X 2	-0.13068179	0.20445751	-0.63916357	0.55748323	-0.69834
Variable X 3	-0.12204693	0.06571924	-1.8570958	0.1368599	-0.30451
Variable X 4	0.12550707	0.10484288	1.19709673	0.2973625	-0.16558

Fuente: Elaboración propia

Con el modelo potencial para el proceso de secado de semillas de uva quebranta en un secador metálico rotatorio con aire caliente, se procedió a estimar el valor de la humedad final o de salida para compararla con el valor real experimental y luego hallar el error estadístico que nos conduce a una variabilidad del 0,024% como se puede apreciar en la tabla 5.7.

Tabla 5.7  
COMPARACION DE LOS VALORES EXPERIMENTALES DE LA HUMEDAD DE SALIDA VS EL VALOR CALCULADO CON EL MODELO MATEMATICO DEL PROCESO

A	B	C	D	E	F	G	H	I
	X1	X2	X3	X4	Y= humedad	Y estimado con modelo	Error	ERROR <sup>2</sup>
Exp.	Temper.	flujo	rpm	masa	Exp.			
1	60	350	5	50	13.58%	12.951%	0.63%	0.004%
2	60	425	10	75	11.98%	12.208%	-0.23%	0.001%
3	60	500	15	100	12.46%	11.793%	0.67%	0.004%
4	70	350	10	100	8.42%	9.211%	-0.79%	0.006%
5	70	425	15	50	7.15%	7.835%	-0.68%	0.005%
6	70	500	5	75	9.24%	9.228%	0.01%	0.000%
7	80	350	15	75	6.93%	6.281%	0.65%	0.004%
8	80	425	5	100	7.17%	7.260%	-0.09%	0.000%
9	80	500	10	50	6.05%	5.987%	0.06%	0.000%

Parámetros  
de modelo potencial

B0=	188636.64
B1=	-2.226342
B2=	-0.130682
B3=	-0.122047
B4=	0.1255071

Variabilidad	0.024%
--------------	--------

r= 0.97656562

Confiabilidad 95%

Fuente: Elaboración propia

Puede observarse el alto grado de precisión del valor de la humedad de salida de la semillas de uva quebranta pronosticado por el modelo matemático cuando se le compara con los valores experimentales obtenidos en el laboratorio.

De esta manera se ha cumplido con el objetivo general de la presente Tesis.

Por otro lado la cinética del secado de las semillas de uva quebranta se realizó empleando un secador como se muestra en la siguiente figura:

Figura 5.3

#### DETERMINANDO LA CINÉTICA DE SECADO



Fuente: Elaboración propia

Se determinó la cinética de secado de las semillas de uva, bajo las variables descritas en las tablas 5.8 a 5.19, donde se indican que las velocidad de flujo de aire caliente se manipularon entre 350 y 500 L/min. Asimismo se trabajaron en 3 condiciones de temperatura 60°C, 70°C y 80°C para 3 y 5 gramos de semilla de uva quebranta.

Las pruebas experimentales, llevadas a cabo en el secador rotatorio con aire caliente, arrojaron los datos que se muestran en las tablas 5.8 a 5.19. Para ello se registró el peso de la muestra cada 5 minutos, obteniéndose en cada instante pesos menores al tiempo anterior prosiguiendo de esta manera hasta lograr pesos constantes. Cabe indicar que las muestras se colocaron también en el desecador de vidrio con silica-gel para evitar de

esta forma que absorba la humedad del ambiente. Cada experimentación se llevó a cabo por triplicado tomándose en consideración para efectos de cálculo los valores en los ajustes a los diversos modelos teóricos de la cinética de secado.

Se considera para el cálculo del contenido de humedad en base seca: X de la siguiente manera:

$$X = \frac{(\text{Peso muestra en "t"} - \text{Peso muestra seca})}{\text{Peso muestra seca}} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

$$\text{Peso promedio} = \frac{(\text{Peso1} + \text{Peso2} + \text{Peso3})}{3} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

En la ecuación 5.2 la expresión peso1, peso2 y peso3 hace referencia a las veces que se realizó la experimentación. Como se indicó líneas arriba las corridas para determinar la cinética de secado, se realizaron por tres veces o lo que se llama también análisis por triplicado, siendo las condiciones de secado las mismas en cada una de ellas.

En las tablas 5.8 a 5.19 se representa el tiempo de secado en horas, los pesos de las muestras húmedas, además del peso promedio según la ecuación 5.2, así mismo la humedad en base seca según se menciona en la ecuación 5.1. En estas tablas se observa cómo van disminuyendo los pesos de las muestras húmedas conforme transcurre el tiempo de secado debido a la pérdida de agua de la semilla de uva.

Tabla 5.8  
PRUEBA DE SECADO A 70°C CON FLUJO DE 350 L/min DE AIRE CALIENTE Y 5g DE MUESTRA

tiempo (h)	Peso1 (g)	Peso2 (g)	Peso3 (g)	peso promedio (g)	X b.s.
0.0000	5.00	4.92	4.92	4.92	0.5280
0.0833	4.37	4.38	4.37	4.37	0.3571
0.1667	4.12	4.11	4.11	4.11	0.2764
0.2500	3.90	3.91	3.90	3.90	0.2112
0.3333	3.68	3.67	3.67	3.67	0.1398
0.4167	3.50	3.51	3.50	3.50	0.0870
0.5000	3.43	3.42	3.43	3.43	0.0652
0.5833	3.36	3.35	3.35	3.35	0.0404
0.6667	3.31	3.30	3.31	3.31	0.0280
0.7500	3.27	3.28	3.28	3.28	0.0186
0.8333	3.25	3.26	3.25	3.25	0.0093
0.9167	3.23	3.22	3.23	3.23	0.0031
1.0000	3.23	3.21	3.22	3.22	0.0000
1.0833	3.22	3.21	3.22	3.22	0.0000
1.1667	3.22	3.21	3.22	3.22	0.0000

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.9  
PRUEBA DE SECADO A 70°C CON FLUJO DE 350 L/min DE AIRE CALIENTE Y 3g DE MUESTRA

tiempo (h)	Peso1 (g)	Peso2 (g)	Peso3 (g)	peso promedio (g)	X b.s.
0.0000	3.00	3.12	3.11	3.13	0.49832
0.0833	2.81	2.81	2.82	2.81	0.34499
0.1667	2.61	2.60	2.61	2.61	0.24916
0.2500	2.45	2.46	2.46	2.46	0.17729
0.3333	2.36	2.35	2.35	2.35	0.12458
0.4167	2.28	2.27	2.27	2.27	0.08625
0.5000	2.21	2.20	2.2	2.20	0.05271
0.5833	2.18	2.16	2.16	2.17	0.03833
0.6667	2.15	2.14	2.15	2.15	0.02875
0.7500	2.13	2.14	2.13	2.13	0.01917
0.8333	2.13	2.12	2.12	2.12	0.01437
0.9167	2.11	2.10	2.10	2.10	0.00479
1.0000	2.11	2.10	2.10	2.10	0.00479
1.0833	2.1	2.09	2.09	2.09	0.00000
1.1667	2.09	2.09	2.09	2.09	0.00000
1.2500	2.09	2.09	2.09	2.09	0.00000

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.10  
PRUEBA DE SECADO A 60°C CON FLUJO DE 350 L/min DE AIRE CALIENTE Y 3g DE MUESTRA

tiempo (h)	Peso1 (g)	Peso2 (g)	Peso3 (g)	peso promedio (g)	X b.s.
0.0000	3.00	2.93	2.94	2.94	0.44118
0.0833	2.74	2.75	2.76	2.75	0.34804
0.1667	2.61	2.60	2.58	2.60	0.27451
0.2500	2.48	2.48	2.49	2.48	0.21569
0.3333	2.43	2.41	2.42	2.42	0.18627
0.4167	2.35	2.31	2.32	2.33	0.14216
0.5000	2.28	2.26	2.28	2.27	0.11275
0.5833	2.26	2.15	2.19	2.20	0.07843
0.6667	2.16	2.17	2.15	2.16	0.05882
0.7500	2.14	2.12	2.11	2.12	0.03922
0.8333	2.11	2.08	2.09	2.09	0.02451
0.9167	2.10	2.08	2.06	2.08	0.01961
1.0000	2.08	2.06	2.05	2.06	0.00980
1.0833	2.06	2.02	2.04	2.04	0.00000
1.1667	2.05	2.02	2.04	2.04	0.00000
1.2500	2.05	2.02	2.04	2.04	0.00000

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.11  
PRUEBA DE SECADO A 60°C CON FLUJO DE 350 L/min DE AIRE CALIENTE Y 5.30g DE MUESTRA

tiempo (h)	Peso1 (g)	Peso2 (g)	Peso3 (g)	peso promedio (g)	X b.s.
0.0000	5.30	5.28	5.29	5.29	0.3812
0.0833	5.02	5.01	5.01	5.01	0.3081
0.1667	4.77	4.75	4.73	4.75	0.2402
0.2500	4.60	4.61	4.6	4.60	0.2010
0.3333	4.45	4.47	4.44	4.45	0.1619
0.4167	4.34	4.32	4.31	4.32	0.1279
0.5000	4.24	4.21	4.22	4.22	0.1018
0.5833	4.12	4.13	4.11	4.12	0.0757
0.6667	4.04	4.01	4.02	4.02	0.0496
0.7500	3.96	3.97	3.95	3.96	0.0339
0.8333	3.93	3.91	3.92	3.92	0.0235
0.9167	3.87	3.86	3.88	3.87	0.0104
1.0000	3.86	3.85	3.85	3.85	0.0052
1.0833	3.84	3.83	3.82	3.83	0.0000
1.1667	3.83	3.83	3.82	3.83	0.0000

1.2500	3.83	3.83	3.82	3.83	0.0000
--------	------	------	------	------	--------

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.12  
PRUEBA DE SECADO A 80°C CON FLUJO DE 350 L/min DE AIRE CALIENTE Y 3g DE MUESTRA

tiempo (h)	Peso1 (g)	Peso2 (g)	Peso3 (g)	peso promedio (g)	X b.s.
0.0000	3.00	3.13	3.13	3.13	0.4227
0.0833	2.85	2.86	2.86	2.86	0.3000
0.1667	2.66	2.65	2.65	2.65	0.2045
0.2500	2.51	2.52	2.51	2.51	0.1409
0.3333	2.42	2.41	2.42	2.42	0.1000
0.4167	2.36	2.35	2.36	2.36	0.0727
0.5000	2.31	2.31	2.31	2.31	0.0500
0.5833	2.27	2.28	2.27	2.27	0.0318
0.6667	2.26	2.27	2.26	2.26	0.0273
0.7500	2.25	2.23	2.24	2.24	0.0182
0.8333	2.24	2.22	2.23	2.23	0.0136
0.9167	2.23	2.22	2.22	2.22	0.0091
1.0000	2.22	2.21	2.21	2.21	0.0045
1.0833	2.21	2.20	2.20	2.20	0.0000
1.1667	2.21	2.20	2.20	2.20	0.0000
1.2500	2.21	2.20	2.20	2.20	0.0000

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.13  
PRUEBA DE SECADO A 80°C CON FLUJO DE 350 L/min DE AIRE CALIENTE Y 5g DE MUESTRA

tiempo (h)	Peso1 (g)	Peso2 (g)	Peso3 (g)	peso promedio (g)	X b.s.
0.00000	5.00	5.2	5.19	5.20	0.3793
0.08333	4.84	4.84	4.85	4.84	0.2838
0.16667	4.56	4.55	4.56	4.56	0.2095
0.25000	4.33	4.32	4.32	4.32	0.1459
0.33333	4.16	4.15	4.17	4.16	0.1034
0.41667	4.06	4.05	4.02	4.04	0.0716
0.50000	3.98	3.95	3.96	3.96	0.0504
0.58333	3.89	3.91	3.88	3.89	0.0318
0.66667	3.85	3.85	3.85	3.85	0.0212
0.75000	3.82	3.82	3.83	3.82	0.0133
0.83333	3.82	3.81	3.81	3.81	0.0106
0.91667	3.80	3.81	3.8	3.80	0.0080
1.00000	3.78	3.81	3.79	3.79	0.0053
1.08333	3.77	3.80	3.78	3.78	0.0027

1.16667	3.76	3.79	3.77	3.77	0.0000
1.25000	3.76	3.77	3.77	3.77	0.0000
1.33333	3.76	3.77	3.77	3.77	0.0000

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.14  
PRUEBA DE SECADO A 80°C CON FLUJO DE 500 L/min DE AIRE CALIENTE Y 5g DE MUESTRA

tiempo (h)	Peso1 (g)	Peso2 (g)	Peso3 (g)	peso promedio (g)	X b.s.
0.0000	5.00	5.28	5.28	5.28	0.3608
0.0833	4.78	4.79	4.78	4.78	0.2320
0.1667	4.49	4.47	4.48	4.48	0.1546
0.2500	4.31	4.27	4.26	4.28	0.1031
0.3333	4.16	4.15	4.15	4.15	0.0696
0.4167	4.06	4.06	4.05	4.06	0.0464
0.5000	4.03	4.01	3.99	4.01	0.0335
0.5833	4.01	3.98	3.96	3.98	0.0258
0.6667	3.95	3.93	3.94	3.94	0.0155
0.7500	3.93	3.93	3.94	3.93	0.0129
0.8333	3.92	3.90	3.90	3.91	0.0077
0.9167	3.91	3.89	3.89	3.90	0.0052
1.0000	3.90	3.89	3.88	3.89	0.0026
1.0833	3.89	3.89	3.87	3.88	0.0000
1.1667	3.89	3.89	3.87	3.88	0.0000

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.15  
PRUEBA DE SECADO A 80°C CON FLUJO DE 500 L/min DE AIRE CALIENTE Y 3g DE MUESTRA

tiempo (h)	Peso1 (g)	Peso2 (g)	Peso3 (g)	peso promedio (g)	X b.s.
0.0000	3.00	3.17	3.18	3.18	0.3361
0.0833	2.79	2.78	2.76	2.78	0.1681
0.1667	2.66	2.64	2.63	2.64	0.1092
0.2500	2.56	2.55	2.55	2.55	0.0714
0.3333	2.47	2.46	2.47	2.47	0.0378
0.4167	2.44	2.43	2.43	2.43	0.0210
0.5000	2.41	2.4	2.4	2.40	0.0084
0.5833	2.38	2.39	2.38	2.38	0.0000
0.6667	2.37	2.39	2.38	2.38	0.0000

0.7500	2.37	2.39	2.39	2.38	0.0000
--------	------	------	------	------	--------

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.16  
PRUEBA DE SECADO A 70°C CON FLUJO DE 500 L/min DE AIRE CALIENTE Y 3g DE MUESTRA

tiempo (h)	Peso1 (g)	Peso2 (g)	Peso3 (g)	peso promedio (g)	X b.s.
0.0000	3.00	3.19	3.19	3.19	0.2559
0.0833	2.91	2.90	2.90	2.90	0.1417
0.1667	2.72	2.71	2.71	2.71	0.0669
0.2500	2.66	2.65	2.65	2.65	0.0433
0.3333	2.62	2.62	2.61	2.62	0.0315
0.4167	2.61	2.6	2.60	2.60	0.0236
0.5000	2.60	2.6	2.59	2.60	0.0236
0.5833	2.58	2.57	2.57	2.57	0.0118
0.6667	2.56	2.56	2.57	2.56	0.0079
0.7500	2.54	2.56	2.57	2.56	0.0059
0.8333	2.53	2.55	2.56	2.55	0.0039
0.9167	2.53	2.55	2.55	2.54	0.0000
1.0000	2.52	2.54	2.55	2.54	0.0000
1.0833	2.52	2.54	2.55	2.54	0.0000

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.17  
PRUEBA DE SECADO A 70°C CON FLUJO DE 500 L/min DE AIRE CALIENTE Y 5g DE MUESTRA

tiempo (h)	Peso1 (g)	Peso2 (g)	Peso3 (g)	peso promedio (g)	X b.s.
0.0000	5.00	5.21	5.21	5.21	0.2434
0.0833	4.93	4.91	4.91	4.92	0.1742
0.1667	4.63	4.62	4.62	4.62	0.1026
0.2500	4.49	4.50	4.49	4.49	0.0716
0.3333	4.43	4.42	4.41	4.42	0.0549
0.4167	4.37	4.36	4.36	4.36	0.0406
0.5000	4.33	4.32	4.32	4.32	0.0310
0.5833	4.29	4.30	4.31	4.30	0.0263
0.6667	4.28	4.28	4.29	4.28	0.0215
0.7500	4.27	4.26	4.26	4.26	0.0167
0.8333	4.25	4.24	4.24	4.24	0.0119
0.9167	4.24	4.23	4.22	4.23	0.0095

1.0000	4.22	4.21	4.22	4.22	0.0072
1.0833	4.21	4.20	4.21	4.21	0.0048
1.1667	4.20	4.20	4.21	4.20	0.0024
1.2500	4.20	4.19	4.21	4.20	0.0000

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.18  
PRUEBA DE SECADO A 60°C CON FLUJO DE 500 L/min DE AIRE CALIENTE Y 3g DE MUESTRA

tiempo (h)	Peso1 (g)	Peso2 (g)	Peso3 (g)	peso promedio (g)	X b.s.
0.0000	3.00	3.16	3.16	3.16	0.1747
0.0833	2.96	2.96	2.95	2.96	0.1004
0.1667	2.89	2.84	2.87	2.87	0.0669
0.2500	2.82	2.83	2.82	2.82	0.0483
0.3333	2.81	2.81	2.79	2.80	0.0409
0.4167	2.79	2.76	2.77	2.77	0.0297
0.5000	2.76	2.75	2.75	2.75	0.0223
0.5833	2.74	2.75	2.74	2.74	0.0186
0.6667	2.74	2.74	2.72	2.73	0.0149
0.7500	2.72	2.72	2.70	2.71	0.0074
0.8333	2.71	2.71	2.70	2.71	0.0074
0.9167	2.70	2.70	2.69	2.70	0.0037
1.0000	2.69	2.69	2.68	2.69	0.0000
1.0833	2.69	2.69	2.68	2.69	0.0000

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.19  
PRUEBA DE SECADO A 60°C CON FLUJO DE 500 L/min DE AIRE CALIENTE Y 5.4g DE MUESTRA

tiempo (h)	Peso1 (g)	Peso2 (g)	Peso3 (g)	peso promedio (g)	X b.s.
0.0000	5.40	5.39	5.38	5.39	0.1567
0.0833	5.19	5.16	5.17	5.17	0.1094
0.1667	5.02	4.98	5.01	5.00	0.0730
0.2500	4.91	4.9	4.89	4.90	0.0515
0.3333	4.84	4.85	4.84	4.84	0.0386
0.4167	4.8	4.81	4.79	4.80	0.0300
0.5000	4.75	4.77	4.76	4.76	0.0215
0.5833	4.72	4.74	4.74	4.73	0.0150
0.6667	4.71	4.69	4.7	4.70	0.0086

0.7500	4.69	4.68	4.69	4.69	0.0064
0.8333	4.67	4.68	4.67	4.67	0.0021
0.9167	4.66	4.67	4.66	4.66	0.0000
1.0000	4.66	4.66	4.66	4.66	0.0000

Fuente: Elaboración propia

Con los datos de las tablas aquí presentadas, se realizaron las gráficas 5.1 a 5.6 (pag.92 a pag.97) en las que se representa el comportamiento que tiene la pérdida de humedad que sufre la muestra en cada instante de tiempo. En este caso el intervalo de tiempo que se manejó para la presente investigación se estableció en 5 minutos, es decir que para un lapso de cada 5 minutos se extrajo las semillas y se procedió al pesado respectivo previamente colocado en un desecador para evitar la alteración de humedad en la muestra en análisis.

La cantidad de aire caliente que se hizo pasar por la muestra fue a dos velocidades, una considerada de tipo baja por ser de 350 L/min de aire caliente comparado con la otra velocidad de 500 L/min. Se muestran tres gráficas de secado a velocidades de 350 L/min y tres gráficas de 500 L/min, cada una de ellas haciendo un comparativo entre 3 y 5 gramos de muestra efectuadas bajo tales condiciones.

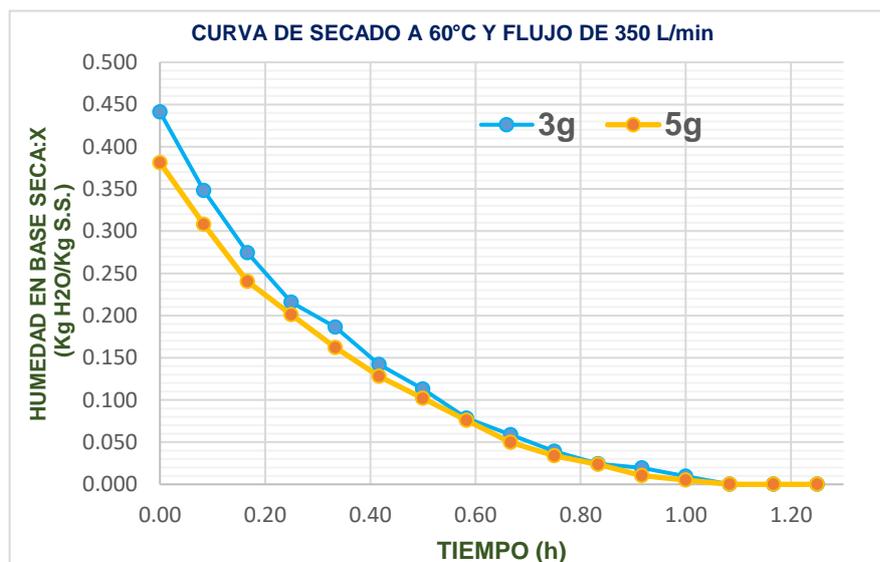
En las gráficas 5.4 a 5.6 se pueden observar que a medida que aumenta la temperatura el tiempo de secado se va haciendo más acelerado en ambos casos de 3 y 5 gramos. Ello se explica porque un flujo mayor del aire caliente hace cambiar rápidamente el flujo de aire que extrae la humedad dejando así nueva corriente del fluido fresco para que extraiga otra cantidad de humedad de la semilla de uva quebranta. Esta situación no se observa con las otras condiciones de secado. Lo explicado previamente se ajusta a lo que destaca López H. y Jorge P. [14] en su trabajo de investigación de la optimización de secado del Yawuarchunka, así mismo concuerda como lo destaca Geankoplis [10].

Tabla 5.20  
 TABLA DE SECADO DE LA MUESTRA A FLUJO DE 350 L/min PARA a) 3g y b) 5g A LA TEMPERATURA DE 60°C

a			b		
tiempo (h)	peso muestra (g)	X b.s.	tiempo (h)	peso muestra (g)	X b.s.
0.0000	2.94	0.44118	0.0000	5.29	0.3812
0.0833	2.75	0.34804	0.0833	5.01	0.3081
0.1667	2.60	0.27451	0.1667	4.75	0.2402
0.2500	2.48	0.21569	0.2500	4.60	0.2010
0.3333	2.42	0.18627	0.3333	4.45	0.1619
0.4167	2.33	0.14216	0.4167	4.32	0.1279
0.5000	2.27	0.11275	0.5000	4.22	0.1018
0.5833	2.20	0.07843	0.5833	4.12	0.0757
0.6667	2.16	0.05882	0.6667	4.02	0.0496
0.7500	2.12	0.03922	0.7500	3.96	0.0339
0.8333	2.09	0.02451	0.8333	3.92	0.0235
0.9167	2.08	0.01961	0.9167	3.87	0.0104
1.0000	2.06	0.00980	1.0000	3.85	0.0052
1.0833	2.04	0.00000	1.0833	3.83	0.0000
1.1667	2.04	0.00000	1.1667	3.83	0.0000
1.2500	2.04	0.00000	1.2500	3.83	0.0000

FUENTE: Elaboración propia

Gráfico 5.1  
 CURVA DE SECADO DE SEMILLAS DE UVA QUEBRANTA EN LAS CONDICIONES ESTABLECIDAS EN LA TABLA 5.13 a y b



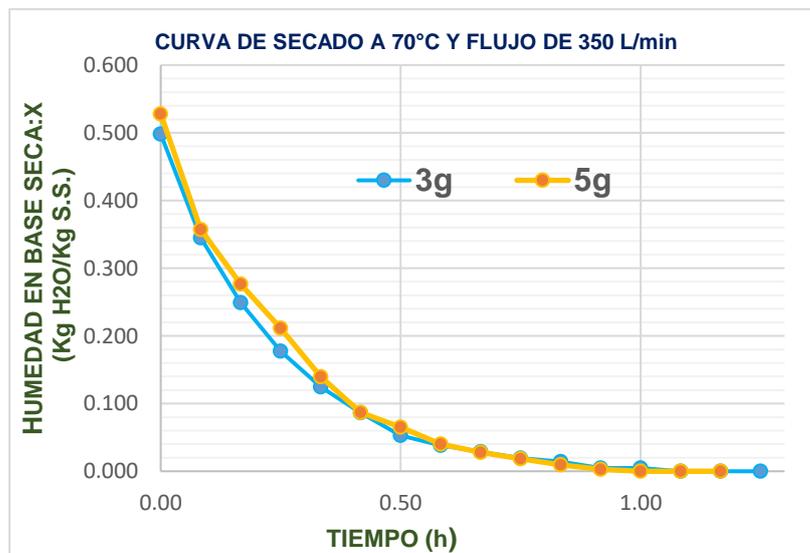
Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.21  
 TABLA DE SECADO DE LA MUESTRA A FLUJO DE 350 L/min PARA a)  
 3g y b) 5g A LA TEMPERATURA DE 70°C

a			b		
tiempo (h)	peso muestra (g)	X b.s.	tiempo (h)	peso muestra (g)	X b.s.
0.0000	3.13	0.49832	0.0000	4.92	0.5280
0.0833	2.81	0.34499	0.0833	4.37	0.3571
0.1667	2.61	0.24916	0.1667	4.11	0.2764
0.2500	2.46	0.17729	0.2500	3.90	0.2112
0.3333	2.35	0.12458	0.3333	3.67	0.1398
0.4167	2.27	0.08625	0.4167	3.50	0.0870
0.5000	2.20	0.05271	0.5000	3.43	0.0652
0.5833	2.17	0.03833	0.5833	3.35	0.0404
0.6667	2.15	0.02875	0.6667	3.31	0.0280
0.7500	2.13	0.01917	0.7500	3.28	0.0186
0.8333	2.12	0.01437	0.8333	3.25	0.0093
0.9167	2.10	0.00479	0.9167	3.23	0.0031
1.0000	2.10	0.00479	1.0000	3.22	0.0000
1.0833	2.09	0.00000	1.0833	3.22	0.0000
1.1667	2.09	0.00000	1.1667	3.22	0.0000
1.2500	2.09	0.00000			

FUENTE: Elaboración propia

Gráfico 5.2  
 CURVA DE SECADO DE SEMILLAS DE UVA QUEBRANTA EN LAS  
 CONDICIONES ESTABLECIDAS EN LA TABLA 5.21 a y b



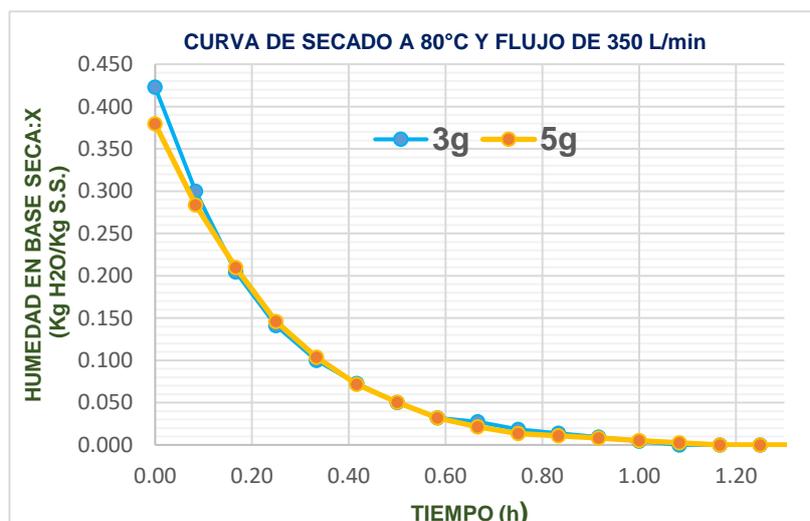
Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.22  
 TABLA DE SECADO DE LA MUESTRA A FLUJO DE 350 L/min PARA a) 3g y b) 5g A LA TEMPERATURA DE 80°C

a			b		
tiempo (h)	peso muestra (g)	X b.s.	tiempo (h)	peso muestra (g)	X b.s.
0.0000	3.13	0.4227	0.00000	5.20	0.3793
0.0833	2.86	0.3000	0.08333	4.84	0.2838
0.1667	2.65	0.2045	0.16667	4.56	0.2095
0.2500	2.51	0.1409	0.25000	4.32	0.1459
0.3333	2.42	0.1000	0.33333	4.16	0.1034
0.4167	2.36	0.0727	0.41667	4.04	0.0716
0.5000	2.31	0.0500	0.50000	3.96	0.0504
0.5833	2.27	0.0318	0.58333	3.89	0.0318
0.6667	2.26	0.0273	0.66667	3.85	0.0212
0.7500	2.24	0.0182	0.75000	3.82	0.0133
0.8333	2.23	0.0136	0.83333	3.81	0.0106
0.9167	2.22	0.0091	0.91667	3.80	0.0080
1.0000	2.21	0.0045	1.00000	3.79	0.0053
1.0833	2.20	0.0000	1.08333	3.78	0.0027
1.1667	2.20	0.0000	1.16667	3.77	0.0000
1.2500	2.20	0.0000	1.25000	3.77	0.0000
			1.33333	3.77	0.0000

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 5.3  
 CURVA DE SECADO DE SEMILLAS DE UVA QUEBRANTA EN LAS CONDICIONES ESTABLECIDAS EN LA TABLA 5.22 a y b



Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.23

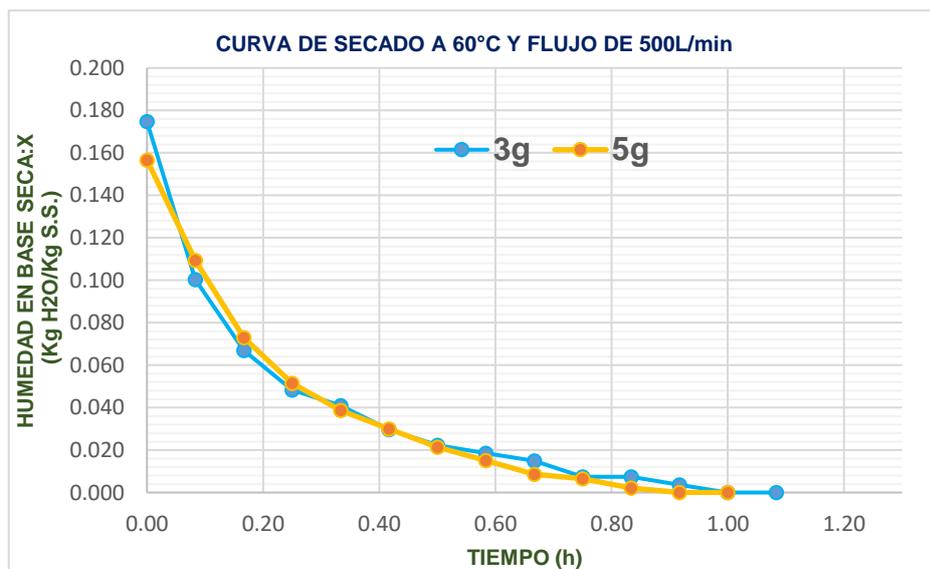
TABLA DE SECADO DE LA MUESTRA A FLUJO DE 500 L/min PARA a) 3g y b) 5g A LA TEMPERATURA DE 60°C

a			b		
tiempo (h)	peso muestra (g)	X b.s.	tiempo (h)	peso muestra (g)	X b.s.
0.0000	3.16	0.1747	0.0000	5.39	0.1567
0.0833	2.96	0.1004	0.0833	5.17	0.1094
0.1667	2.87	0.0669	0.1667	5.00	0.0730
0.2500	2.82	0.0483	0.2500	4.90	0.0515
0.3333	2.80	0.0409	0.3333	4.84	0.0386
0.4167	2.77	0.0297	0.4167	4.80	0.0300
0.5000	2.75	0.0223	0.5000	4.76	0.0215
0.5833	2.74	0.0186	0.5833	4.73	0.0150
0.6667	2.73	0.0149	0.6667	4.70	0.0086
0.7500	2.71	0.0074	0.7500	4.69	0.0064
0.8333	2.71	0.0074	0.8333	4.67	0.0021
0.9167	2.70	0.0037	0.9167	4.66	0.0000
1.0000	2.69	0.0000	1.0000	4.66	0.0000
1.0833	2.69	0.0000			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 5.4

CURVA DE SECADO DE SEMILLAS DE UVA QUEBRANTA EN LAS CONDICIONES ESTABLECIDAS EN LA TABLA 5.23 a y b



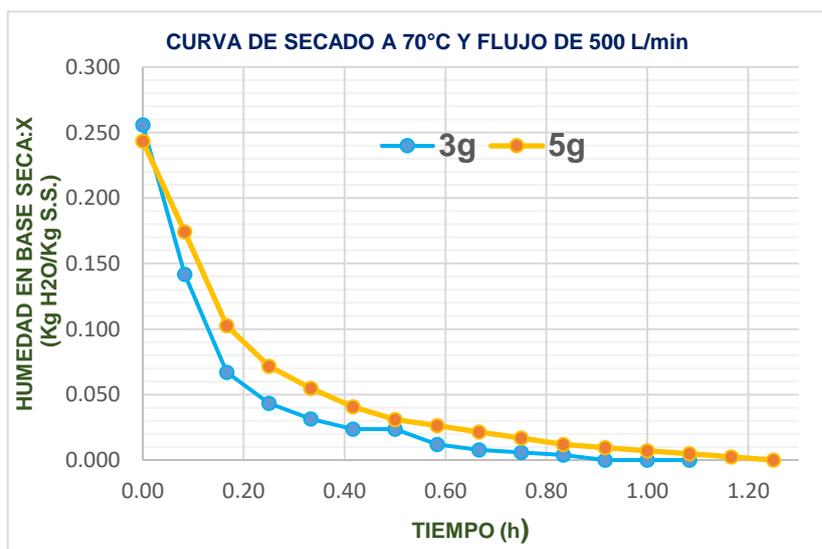
Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.24  
 TABLA DE SECADO DE LA MUESTRA A FLUJO DE 500 L/min PARA a) 3g y b) 5g A LA TEMPERATURA DE 70°C

a			b		
tiempo (h)	peso muestra (g)	X b.s.	tiempo (h)	peso muestra (g)	X b.s.
0.0000	3.19	0.2559	0.0000	5.21	0.2434
0.0833	2.90	0.1417	0.0833	4.92	0.1742
0.1667	2.71	0.0669	0.1667	4.62	0.1026
0.2500	2.65	0.0433	0.2500	4.49	0.0716
0.3333	2.62	0.0315	0.3333	4.42	0.0549
0.4167	2.60	0.0236	0.4167	4.36	0.0406
0.5000	2.60	0.0236	0.5000	4.32	0.0310
0.5833	2.57	0.0118	0.5833	4.30	0.0263
0.6667	2.56	0.0079	0.6667	4.28	0.0215
0.7500	2.56	0.0059	0.7500	4.26	0.0167
0.8333	2.55	0.0039	0.8333	4.24	0.0119
0.9167	2.54	0.0000	0.9167	4.23	0.0095
1.0000	2.54	0.0000	1.0000	4.22	0.0072
1.0833	2.54	0.0000	1.0833	4.21	0.0048
			1.1667	4.20	0.0024
			1.2500	4.19	0.0000

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 5.5  
 CURVA DE SECADO DE SEMILLAS DE UVA QUEBRANTA EN LAS CONDICIONES ESTABLECIDAS EN LA TABLA 5.24 a y b



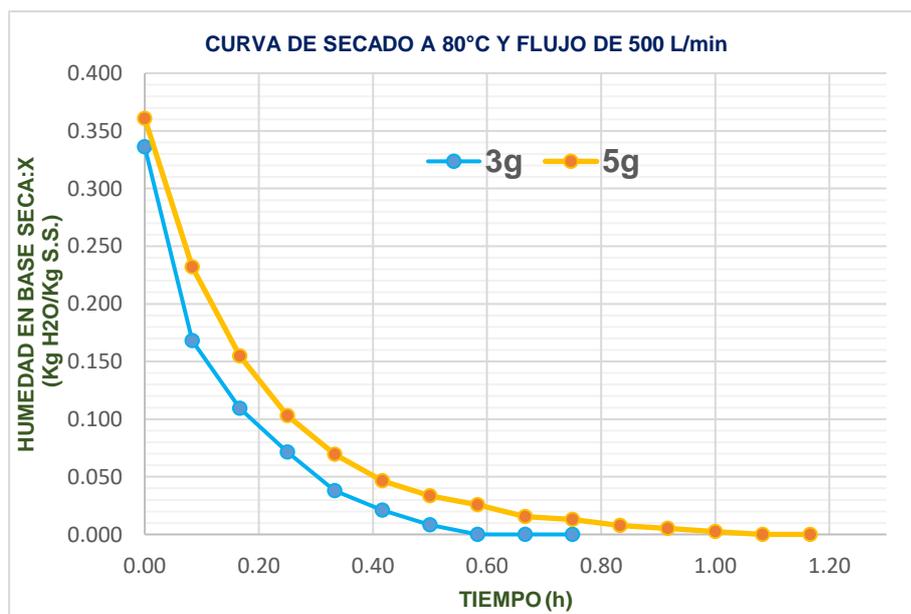
Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.25  
 TABLA DE SECADO DE LA MUESTRA A FLUJO DE 500 L/min PARA a) 3g y b) 5g A LA TEMPERATURA DE 80°C

tiempo (h)	peso muestra (g)	X b.s.
0.0000	3.18	0.3361
0.0833	2.78	0.1681
0.1667	2.64	0.1092
0.2500	2.55	0.0714
0.3333	2.47	0.0378
0.4167	2.43	0.0210
0.5000	2.40	0.0084
0.5833	2.38	0.0000
0.6667	2.38	0.0000
0.7500	2.38	0.0000

tiempo (h)	peso muestra (g)	X b.s.
0.0000	5.28	0.3608
0.0833	4.78	0.2320
0.1667	4.48	0.1546
0.2500	4.28	0.1031
0.3333	4.15	0.0696
0.4167	4.06	0.0464
0.5000	4.01	0.0335
0.5833	3.98	0.0258
0.6667	3.94	0.0155
0.7500	3.93	0.0129
0.8333	3.91	0.0077
0.9167	3.90	0.0052
1.0000	3.89	0.0026
1.0833	3.88	0.0000
1.1667	3.88	0.0000

Gráfico 5.6  
 CURVA DE SECADO DE SEMILLAS DE UVA QUEBRANTA EN LAS CONDICIONES ESTABLECIDAS EN LA TABLA 5.25 a y b



Fuente: Elaboración propia

## 5.2 Modelos matemáticos aplicados a la cinética de secado

Con los datos experimentales encontrados en las pruebas realizadas en el laboratorio se realizaron cálculos para determinar a qué modelo se ajustan mejor dichos valores.

Los modelos de mejor ajuste, son de utilidad para calcular la humedad en cada instante de tiempo y se obtuvieron los resultados tal como se muestran en las tablas 5.8 a la tabla 5.19. Los resultados así obtenidos se trabajaron en el programa POLYMATH, en el cual nos arrojan valores de las constantes propios de cada modelo.

Cabe mencionar que los modelos señalados tienen una tendencia no lineal, para lo cual se toma en consideración el coeficiente de determinación estadístico  $R^2$ .

En las figuras 5.4 a 5.9 se presenta la manera como se obtienen los valores de los parámetros en cada modelo y luego se generaliza para los otros modelos en estudio. A continuación se presenta los resultados obtenidos realizados en el programa POLYMATH:

Figura 5.4  
AJUSTE AL MODELO DE HENDERSON

**POLYMATH Report**  
Nonlinear Regression (L-M)

No Title  
03-nov-2018

**Model:**  $X = a \cdot \text{EXP}(-k \cdot t)$

Variable	Initial guess	Value	95% confidence
a	0.5	0.5266506	0.0195241
k	0.5	4.101513	0.2531217

**Nonlinear regression settings**

Max # iterations = 64

**Precision**

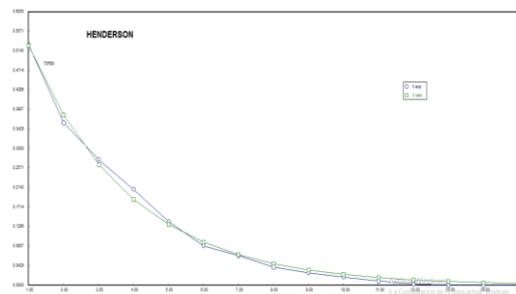
R <sup>2</sup>	0.9959778
R <sup>2</sup> adj	0.9956684
Rmsd	0.0025158
Variance	0.0001095

**General**

Sample size	15
Model vars	2
Indep vars	1
Iterations	7

**Source data points and calculated data points**

	t	X	X calc	Delta X
1	0	0.528	0.5266506	0.0013494
2	0.0833	0.3571	0.374234	-0.017134
3	0.1667	0.2764	0.2658189	0.0105811
4	0.25	0.2112	0.1888889	0.0223111
5	0.3333	0.1398	0.1342231	0.0055769
6	0.4167	0.087	0.0953388	-0.0083388
7	0.5	0.0652	0.067747	-0.002547
8	0.5833	0.0404	0.0481405	-0.0077405
9	0.6667	0.028	0.0341943	-0.0061943
10	0.75	0.0186	0.0242982	-0.0056982
11	0.8333	0.0093	0.0172661	-0.0079661
12	0.9167	0.0031	0.0122641	-0.0091641
13	1	0	0.0087148	-0.0087148
14	1.0833	0	0.0061927	-0.0061927
15	1.1667	0	0.0043987	-0.0043987



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.5  
 REPRESENTACIÓN DE AJUSTE LOGARITMICO

**POLYMATH Report**  
 Nonlinear Regression (L-M)

No Title  
 03-nov-2018

**Model:**  $X = a \cdot \text{EXP}(-k \cdot t) + c$

Variable	Initial guess	Value	95% confidence
a	3.	0.5333984	4.187E-06
k	3.	3.83435	4.965E-05
c	3.	-0.0113308	1.573E-06

**Nonlinear regression settings**

Max # iterations = 64

**Precision**

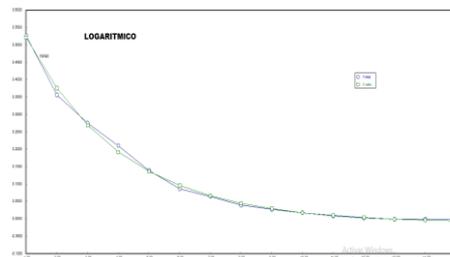
R <sup>2</sup>	0.9973505
R <sup>2</sup> adj	0.9969089
Rmsd	0.0020419
Variance	7.817E-05

**General**

Sample size	15
Model vars	3
Indep vars	1
Iterations	6

**Source data points and calculated data points**

	t	X	X calc	Delta X
1	0	0.528	0.5220675	0.0059325
2	0.0833	0.3571	0.3762278	-0.0191278
3	0.1667	0.2764	0.2701551	0.0062449
4	0.25	0.2112	0.1931923	0.0180077
5	0.3333	0.1398	0.1372724	0.0025276
6	0.4167	0.087	0.0966005	-0.0096005
7	0.5	0.0652	0.0670903	-0.0018903
8	0.5833	0.0404	0.0456487	-0.0052487
9	0.6667	0.028	0.0300537	-0.0020537
10	0.75	0.0186	0.0187385	-0.0001385
11	0.8333	0.0093	0.0105171	-0.0012171
12	0.9167	0.0031	0.0045374	-0.0014374
13	1	0	0.0001988	-0.0001988
14	1.0833	0	-0.0029536	0.0029536
15	1.1667	0	-0.0052464	0.0052464



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.6  
 REPRESENTACIÓN DE AJUSTE DE PELEG

**POLYMATH Report**  
 Nonlinear Regression (L-M)

No Title  
 03-nov-2018

**Model:**  $X = 0.5280 - t / (k_1 + k_2 * t)$

Variable	Initial guess	Value	95% confidence
k1	0.5	0.3609829	0.0457295
k2	0.5	1.510052	0.0753841

**Nonlinear regression settings**

Max # iterations = 64

**Precision**

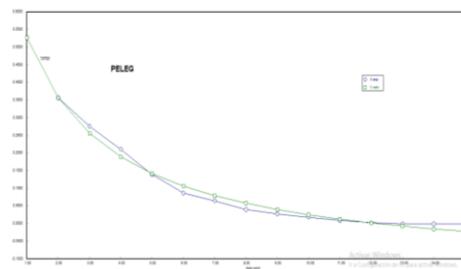
R <sup>2</sup>	0.9921219
R <sup>2</sup> adj	0.9915159
Rmsd	0.0035209
Variance	0.0002146

**General**

Sample size	15
Model vars	2
Indep vars	1
Iterations	6

**Source data points and calculated data points**

	t	X	X calc	Delta X
1	0	0.528	0.528	0
2	0.0833	0.3571	0.356872	0.000228
3	0.1667	0.2764	0.2559294	0.0204706
4	0.25	0.2112	0.1894741	0.0217259
5	0.3333	0.1398	0.1423625	-0.0025625
6	0.4167	0.087	0.107185	-0.020185
7	0.5	0.0652	0.0799748	-0.0147748
8	0.5833	0.0404	0.0582771	-0.0178771
9	0.6667	0.028	0.0405515	-0.0125515
10	0.75	0.0186	0.0258312	-0.0072312
11	0.8333	0.0093	0.0133978	-0.0040978
12	0.9167	0.0031	0.0027449	0.0003551
13	1	0	-0.0064637	0.0064637
14	1.0833	0	-0.0145121	0.0145121
15	1.1667	0	-0.0216146	0.0216146



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.7  
 REPRESENTACIÓN DE AJUSTE DE DOS TERMINOS

**POLYMATH Report**  
 Nonlinear Regression (L-M)

No Title  
 03-nov-2018

**Model:**  $X = a \cdot \text{EXP}(-k \cdot t) + b \cdot \text{EXP}(-g \cdot t)$

Variable	Initial guess	Value	95% confidence
a	0.5	0.2633234	0.0163081
k	0.5	4.101473	0.3343931
b	0.5	0.2633234	0.0163081
g	0.5	4.101473	0.3343931

**Nonlinear regression settings**

Max # iterations = 64

**Precision**

R <sup>2</sup>	0.9959778
R <sup>2</sup> adj	0.9948808
Rmsd	0.0025158
Variance	0.0001295

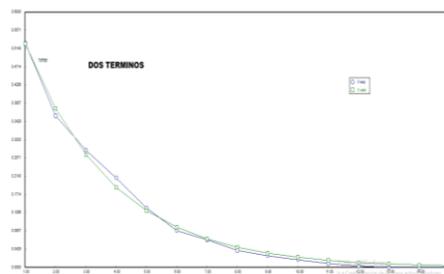
**General**

Sample size	15
Model vars	4
Indep vars	1
Iterations	37

**Source data points and**

**calculated data points**

	t	X	X calc	Delta X
1	0	0.528	0.5266469	0.0013531
2	0.0833	0.3571	0.3742326	-0.0171326
3	0.1667	0.2764	0.2658188	0.0105812
4	0.25	0.2112	0.1888895	0.0223105
5	0.3333	0.1398	0.1342239	0.0055761
6	0.4167	0.087	0.0953397	-0.0083397
7	0.5	0.0652	0.0677479	-0.0025479
8	0.5833	0.0404	0.0481413	-0.0077413
9	0.6667	0.028	0.034195	-0.006195
10	0.75	0.0186	0.0242988	-0.0056988
11	0.8333	0.0093	0.0172666	-0.0079666
12	0.9167	0.0031	0.0122645	-0.0091645
13	1	0	0.0087151	-0.0087151
14	1.0833	0	0.0061929	-0.0061929
15	1.1667	0	0.0043988	-0.0043988



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.8  
 REPRESENTACIÓN DE AJUSTE DE HENDERSON-PABIS

**Model:**  $X = a \cdot \text{EXP}(-k \cdot t) + b \cdot \text{EXP}(-g \cdot t) + c \cdot \text{EXP}(-h \cdot t)$

Variable	Initial guess	Value	95% confidence
a	0.5	0.1756366	0.012334
k	0.5	4.100572	0.7072124
b	0.5	0.1756366	0.012334
g	0.5	4.100572	0.7072124
c	0.5	0.1753728	0.0187816
h	0.5	4.10326	0.8982041

**Nonlinear regression settings**

Max # iterations = 64

**Precision**

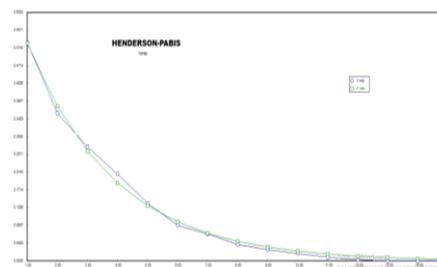
R <sup>2</sup>	0.9959778
R <sup>2</sup> adj	0.9937432
Rmsd	0.0025158
Variance	0.0001582

**General**

Sample size	15
Model vars	6
Indep vars	1
Iterations	45

**Source data points and calculated data points**

	t	X	X calc	Delta X
1	0	0.528	0.5266461	0.0013539
2	0.0833	0.3571	0.3742322	-0.0171322
3	0.1667	0.2764	0.2658186	0.0105814
4	0.25	0.2112	0.1888895	0.0223105
5	0.3333	0.1398	0.134224	0.005576
6	0.4167	0.087	0.0953398	-0.0083398
7	0.5	0.0652	0.067748	-0.002548
8	0.5833	0.0404	0.0481414	-0.0077414
9	0.6667	0.028	0.0341951	-0.0061951
10	0.75	0.0186	0.0242988	-0.0056988
11	0.8333	0.0093	0.0172666	-0.0079666
12	0.9167	0.0031	0.0122646	-0.0091646
13	1	0	0.0087151	-0.0087151
14	1.0833	0	0.0061929	-0.0061929
15	1.1667	0	0.0043989	-0.0043989



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.9  
 REPRESENTACIÓN DE AJUSTE DE MIDILLI

**Model:**  $X = a \cdot \text{EXP}(-k \cdot t^n) + b \cdot t$

Variable	Initial guess	Value	95% confidence
a	0.5	0.5232429	4.582E-05
k	0.5	3.939898	0.0005706
n	0.5	0.9977984	0.0001119
b	0.5	-0.0098227	2.484E-05

**Nonlinear regression settings**

Max # iterations = 64

**Precision**

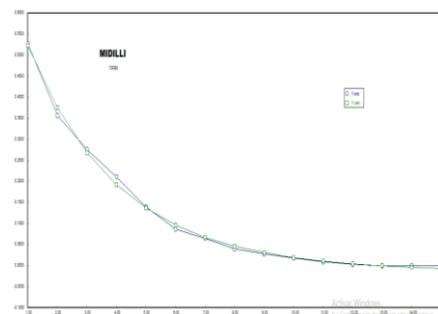
R <sup>2</sup>	0.9972098
R <sup>2</sup> adj	0.9964489
Rmsd	0.0020954
Variance	8.981E-05

**General**

Sample size	15
Model vars	4
Indep vars	1
Iterations	7

**Source data points and calculated data points**

	t	X	X calc	Delta X
1	0	0.528	0.5232429	0.0047571
2	0.0833	0.3571	0.3753557	-0.0182557
3	0.1667	0.2764	0.26897	0.00743
4	0.25	0.2112	0.1923613	0.0188387
5	0.3333	0.1398	0.1370141	0.0027859
6	0.4167	0.087	0.0969072	-0.0099072
7	0.5	0.0652	0.067843	-0.002643
8	0.5833	0.0404	0.0466845	-0.0062845
9	0.6667	0.028	0.0312006	-0.0032006
10	0.75	0.0186	0.0198339	-0.0012339
11	0.8333	0.0093	0.0114163	-0.0021163
12	0.9167	0.0031	0.0051163	-0.0020163
13	1	0	0.0003545	-0.0003545
14	1.0833	0	-0.0033056	0.0033056
15	1.1667	0	-0.0061748	0.0061748



Fuente: Elaboración propia

En el siguiente cuadro se resumen el coeficiente de determinación en cada modelo y de las diversas corridas realizadas:

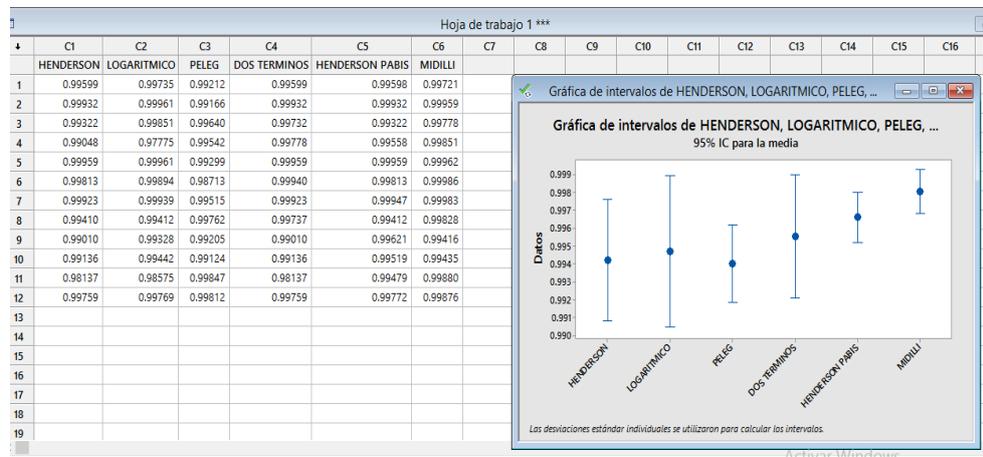
Tabla 5.26  
RESUMEN DE LOS COEFICIENTES DE CORRELACION PARA LOS DIFERENTES MODELOS EN CADA EXPERIMENTACION

EXPER	MODELOS					
	HENDERSO N	LOGARIT.	PELEG	DOS TERMINOS	HENDERS ON PABIS	MIDILLI
1	0.99599	0.99735	0.99212	0.99599	0.99598	0.99721
2	0.99932	0.99961	0.99166	0.99932	0.99932	0.99959
3	0.99322	0.99851	0.99640	0.99732	0.99322	0.99778
4	0.99048	0.97775	0.99542	0.99778	0.99558	0.99851
5	0.99959	0.99961	0.99299	0.99959	0.99959	0.99962
6	0.99813	0.99894	0.98713	0.99940	0.99813	0.99986
7	0.99923	0.99939	0.99515	0.99923	0.99947	0.99983
8	0.99410	0.99412	0.99762	0.99737	0.99412	0.99828
9	0.99010	0.99328	0.99205	0.99010	0.99621	0.99416
10	0.99136	0.99442	0.99124	0.99136	0.99519	0.99435
11	0.98137	0.98575	0.99847	0.98137	0.99479	0.99880
12	0.99759	0.99769	0.99812	0.99759	0.99772	0.99876

Fuente: Elaboración propia

Estos datos son evaluados en el programa Minitab 17 y se determinó el mejor modelo que mejor explica los datos experimentales respecto a la cinética del secado.

Grafico 5.7  
ANALISIS DEL COEFICIENTE DE CORRELACION USANDO MINITAB



Fuente: Elaboración propia

Con estos resultados arrojados por Minitab, En la gráfica presente (5.7) se puede deducir que el mejor modelo que se ajusta el modelo de Midilli.

Para el modelo de Midilli se presenta los siguientes parámetros:

$$X = a \cdot \text{EXP}(-k \cdot t^n) + b \cdot t$$

$a=0.3610783$

$n=0.933728$

$k=4.533574$

$b=-0.0009257$

Tabla 5.27  
VELOCIDAD DES ECADO CON 5g

r	x
1.0359046	0.23121
1.37737695	0.15404
1.39645571	0.10400
1.27071939	0.07077
1.09169819	0.04839
0.90552141	0.03318
0.73384162	0.02276
0.58521508	0.01557
0.4614086	0.01059
0.36089619	0.00712
0.28076999	0.00468
0.21775207	0.00295
0.16869884	0.00173
0.13082388	0.00084

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 5.8

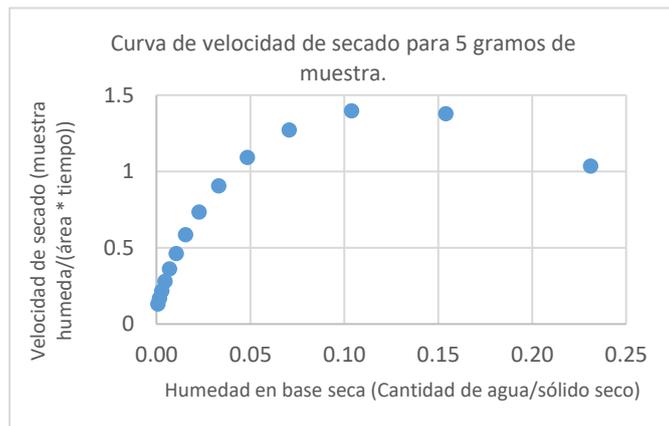
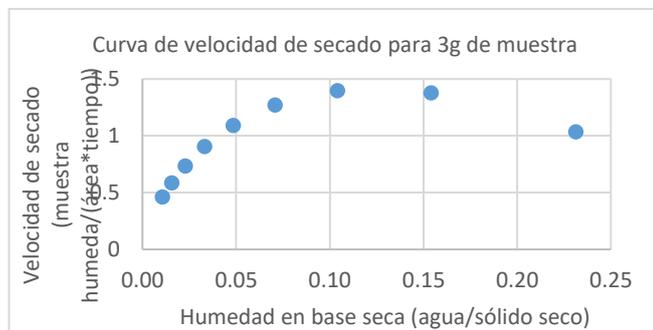


Tabla 5.28  
VELOCIDAD DES ECADO CON 3g

r	x
1.0359046	0.23121
1.37737695	0.15404
1.39645571	0.10400
1.27071939	0.07077
1.09169819	0.04839
0.90552141	0.03318
0.73384162	0.02276
0.58521508	0.01557
0.4614086	0.01059

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 5.9



En las gráficas 5.8 y 5.9 se puede observar las zonas características de velocidad constante y velocidad decreciente tal como lo explican los autores señalados en el marco teórico de la presente tesis.

### 5.3 Esfericidad de las semillas de uva

El factor de forma o esfericidad de las partículas es un factor que se ha de tener en cuenta en los cálculos de transferencia de masa, por lo que es necesario calcular el factor de forma de las pepitas de uva.

Según Foust [9] “Una forma normal de expresar el factor de forma, es considerarlo como el **cociente de la propiedad de la partícula y la propiedad de una esfera** que tenga un diámetro igual a la dimensión media de la partícula.”

Con la finalidad de determinar el diámetro promedio de las pepitas de uva, se utilizó un Vernier para tomar las dimensiones a una muestra aleatoria de 12 semillas de uva, siendo los resultados como se detalla a continuación:

Tabla 5.29  
MEDIDAS DE LAS SEMILLAS DE UVA (mm)

Nº	Largo	Ancho	Espesor
1	5.2	3.4	2.2
2	6.1	4.1	2.8
3	5	3.5	2.8
4	5.3	3.6	3
5	5.5	3.5	2.4
6	5.1	3.8	2.6
7	5.2	3.8	2.8
8	5.2	3.8	3.1
9	5.8	3.5	2.9
10	6.1	3.8	2.9
11	4.6	3.3	2.6
12	5.8	3.4	2.6
<b>PROMEDIO</b>	<b>5.408</b>	<b>3.625</b>	<b>2.725</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 5.10  
MEDIDAS DE LAS SEMILLAS DE UVA QUEBRANTA



Fuente: Elaboración propia

El diámetro promedio de las semillas de uva quebranta, arrojó un valor como se muestra a continuación:

$$D_p = (5.408 + 3.625 + 2.725)/3 = 3.919 \text{ mm}$$

$$\text{Radio promedio } R_d = 1.96 \text{ mm}$$

Área superficial de esfera de tamaño similar a las semillas:

$$S_p = 4 \cdot \pi \cdot R_d^2$$

$$S_p = 4 \cdot 3.1416 \cdot 1.96^2 = 48.2614 \text{ mm}^2$$

El área de la superficie de las semillas se determinó de la siguiente manera:

*Área de la parte inferior de la pepita*

Se asume como una esfera de diámetro igual al promedio entre el ancho y el espesor:

$$D_i = (3.625 + 2.725)/2 = 3.175 \text{ mm}$$

$$R_i = 1.5875 \text{ mm}$$

Área superficial de la parte inferior de la pepita ( $S_p$ ):

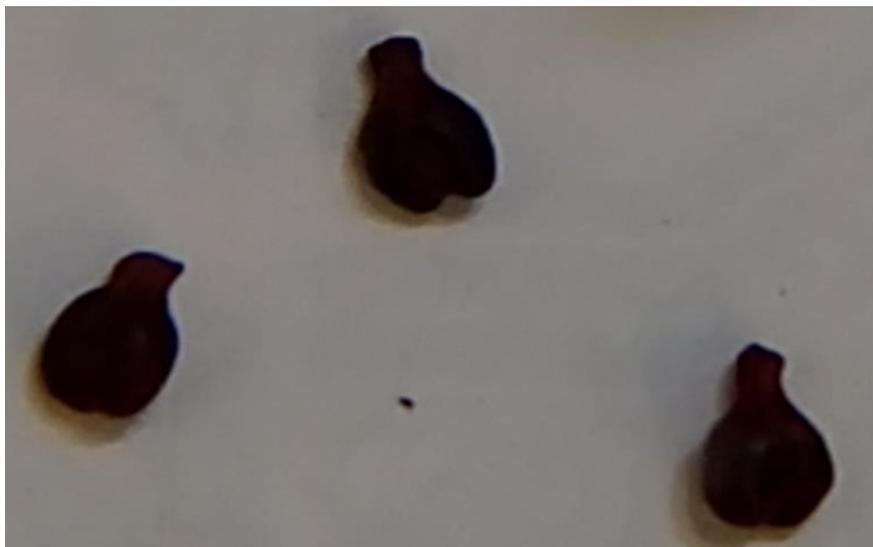
$$S_p = 4 \cdot \pi \cdot R_i^2$$

$$S_p = 4 \cdot 3.1416 \cdot 1.5875^2 = 31.67 \text{ mm}^2$$

*Área de la parte superior de la semilla:*

Por observación se considera que la parte superior tiene una forma cónica, tal como se muestra a continuación:

Figura 5.11  
FORMA DE LAS SEMILLAS DE UVA QUEBRANTA



Fuente: Elaboración propia

En cuyo caso el área del cono ( $S_c$ ) se calcula:

$$S_c = \pi \cdot R_s \cdot h$$

El diámetro de la base del cono es 1/3 el diámetro de la parte inferior

$$D_s = 3.175/3 = 1.058 \text{ mm}$$

$$R_s = 0.5291 \text{ mm}$$

La altura de la base del cono es:

$$h = \text{Longitud de la pepita} - D_i$$

$$h = 5.408 - 3.175 = 2.233 \text{ mm}$$

Área superficial de la parte inferior de la semilla:

$$S_s = \pi R_s * L = 3.1416 * 0.5291 * 2.233 = 3.711 \text{ mm}^2$$

El área total de la pepita será:

$$S_{tp} = 31.66 + 3.711 = 35.37 \text{ mm}^2$$

EL FACTOR DE FORMA O ESFERICIDAD DE LAS SEMILLAS DE UVA

Siguiendo la definición de Foust et. Al [8]

$F_f = \text{Superficie de la partícula} / \text{Superficie de la esfera de tamaño similar}$

$$F_f = 35.37 / 48.2614 = 0.735$$

## 5.4 Modelo difusivo

Así mismo se establece un modelo difusivo para el caso de la extracción de humedad dentro de la semilla de uva. Este modelo se desarrolla en base a la tabla 2.1 la cual es producida mediante la discretización de la ecuación 2.13. En ella se determina la pérdida de agua conforme transcurre el tiempo, además, esta pérdida de agua, está en función del radio de la semilla de uva quebranta. Dicho diagrama está enfocado como lo señala el libro de fenómenos de transporte del Dr. Carrasco [2]

A continuación se muestra el programa realizado en Polymath, en la que se señala las diez ecuaciones diferenciales, según la tabla 2.1.

Figura 5.12  
PROGRAMACIÓN EN POLYMATH

```
File Program Edit Format Problem Examples Window Help
RKF45
Differential Equations: 11 Auxiliary Equations: 8 Ready for solution
d(m0)/dt = 3 * D / dr ^ 2 * (m1 - m0) - k * m0 ^ a
d(m1)/dt = D / dr ^ 2 * (m2 - 2 * m1 + m0 + 2 / 1) * (m1 - m0) - k * m1 ^ a
d(m2)/dt = D / dr ^ 2 * (m3 - 2 * m2 + m1 + 2 / 2) * (m2 - m1) - k * m2 ^ a
d(m3)/dt = D / dr ^ 2 * (m4 - 2 * m3 + m2 + 2 / 3) * (m3 - m2) - k * m3 ^ a
d(m4)/dt = D / dr ^ 2 * (m5 - 2 * m4 + m3 + 2 / 4) * (m4 - m3) - k * m4 ^ a
d(m5)/dt = D / dr ^ 2 * (m6 - 2 * m5 + m4 + 2 / 5) * (m5 - m4) - k * m5 ^ a
d(m6)/dt = D / dr ^ 2 * (m7 - 2 * m6 + m5 + 2 / 6) * (m6 - m5) - k * m6 ^ a
d(m7)/dt = D / dr ^ 2 * (m8 - 2 * m7 + m6 + 2 / 7) * (m7 - m6) - k * m7 ^ a
d(m8)/dt = D / dr ^ 2 * (m9 - 2 * m8 + m7 + 2 / 8) * (m8 - m7) - k * m8 ^ a
d(m9)/dt = D / dr ^ 2 * (m10 - 2 * m9 + m8 + 2 / 9) * (m9 - m8) - k * m9 ^ a
d(m10)/dt = D / dr ^ 2 * (m11 - 2 * m10 + m9 + 2 / 10) * (m10 - m9) - k * m10 ^ a

m0(0) = 7.2 # miligramos de agua por 0,03 g de pepita
m1(0) = 7.2
m2(0) = 7.2
m3(0) = 7.2
m4(0) = 7.2
m5(0) = 7.2
m6(0) = 7.2
m7(0) = 7.2
m8(0) = 7.2
m9(0) = 7.2
m10(0) = 7.2

m11 = (1 - km * dr / D) * m10 + km * dr * minf / D
minf = 0
km = 0.010
dr = 0.196
D = 0.0108
k = 0.013
a = 1
t(0) = 0
tf = 240
R = 10 * dr
```

Fuente: Elaboración propia

A continuación se muestran los datos arrojados con este procedimiento, en el cual nos indica la cantidad de agua presente en el interior de la semilla de uva quebranta. Estos valores establecen que la cantidad de agua va disminuyendo desde el interior de la semilla hacia la parte exterior. La parte interior de la semilla de uva se le denomina como m0 en la ubicación de r0 asimismo la parte final, dentro de la pepita de uva, se le denomina como m10 en la ubicación de r10.

Tal como se muestra a continuación, en el siguiente cuadro donde se establece las masas de agua con respecto al tiempo del secado.

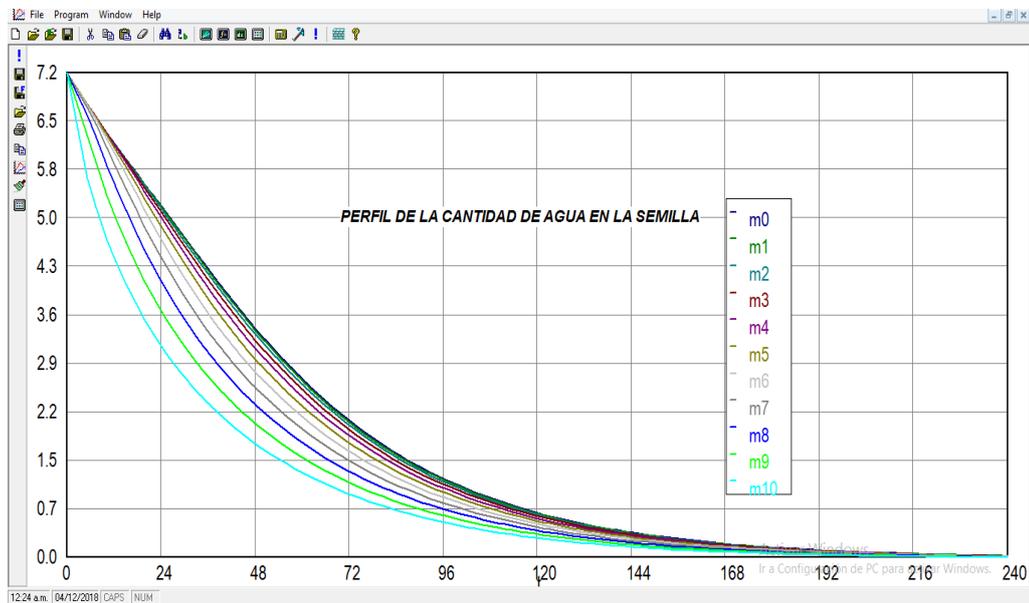
**Tabla 5.30**  
**CANTIDAD DE AGUA EN EL INTERIOR DE LA SEMILLA DE UVA QUEBRANTA**

t	m0	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8	m9	m10
0.0000	7.2000	7.2000	7.2000	7.2000	7.2000	7.2000	7.2000	7.2000	7.2000	7.2000	7.2000
18.0321	5.6844	5.6802	5.6682	5.6432	5.5946	5.5063	5.3564	5.1197	4.7734	4.3049	3.7199
25.3519	5.1187	5.1057	5.0745	5.0196	4.9302	4.7934	4.5955	4.3242	3.9720	3.5397	3.0378
38.7919	4.0828	4.0566	4.0009	3.9133	3.7889	3.6232	3.4127	3.1562	2.8552	2.5151	2.1446
57.9919	2.7780	2.7506	2.6956	2.6127	2.5020	2.3639	2.1996	2.0111	1.8017	1.5757	1.3382
81.0319	1.6689	1.6498	1.6119	1.5557	1.4823	1.3927	1.2886	1.1721	1.0455	0.9113	0.7726
104.071	0.9834	0.9716	0.9483	0.9139	0.8692	0.8152	0.7528	0.6835	0.6087	0.5300	0.4491
121.351	0.6583	0.6503	0.6345	0.6113	0.5811	0.5446	0.5027	0.4562	0.4061	0.3535	0.2994
142.471	0.4023	0.3973	0.3876	0.3733	0.3548	0.3325	0.3068	0.2783	0.2477	0.2156	0.1826
161.671	0.2568	0.2537	0.2475	0.2383	0.2265	0.2122	0.1958	0.1776	0.1581	0.1375	0.1165
198.151	0.1094	0.1081	0.1054	0.1015	0.0965	0.0904	0.0834	0.0757	0.0673	0.0586	0.0496
207.751	0.0874	0.0863	0.0842	0.0811	0.0771	0.0722	0.0666	0.0604	0.0538	0.0468	0.0396
225.031	0.0584	0.0576	0.0562	0.0541	0.0515	0.0482	0.0445	0.0403	0.0359	0.0312	0.0265
238.471	0.0426	0.0421	0.0411	0.0395	0.0376	0.0352	0.0325	0.0295	0.0262	0.0228	0.0193

Fuente: Elaboración propia con Polymath

El programa Polymath al mismo tiempo ofrece los datos arrojados en la tabla anterior en forma gráfica, como se muestra a continuación:

Grafica 5.10  
CURVAS DE CANTIDAD DE AGUA EN EL INTERIOR DE LA PEPITA DE  
UVA EN FUNCIÓN DEL RADIO



Fuente: elaboración propia

En la gráfica precedente, se puede observar la variación de la cantidad de agua dentro de la semilla de uva. Se resalta que estas curvas representan una mitad de la pepita de uva, siendo la curva  $m_0$  la que se encuentra en el centro de la pepita y  $m_{10}$  al extremo del mismo.

Además se aprecia que conforme transcurre el tiempo la cantidad de agua va disminuyendo en todos los puntos del interior de la semilla.

Para los resultados respecto al objetivo c.-Describir el proceso de secado de semillas de uva quebranta de Ica usando un secador rotatorio con aire caliente a escala piloto.

En base a la investigación realizada, se concluye que el proceso de secado de semillas de uva quebranta, se realiza utilizando un secador rotatorio

metálico a escala piloto con aire caliente y con aislamiento térmico, para posibilitar un proceso adiabático.

A continuación se describen las etapas que se siguen para lograr una humedad final adecuada

a.- Se recibieron las semillas de uva quebranta en bolsas selladas para evitar que se contaminen. Se les mide la humedad inicial con la que se reciben y que oscila entre 22% a 26% con ayuda de una balanza de medir humedad Adam AMB 50.

b.- Paralelamente se enciende el soplador de aire caliente hasta que la temperatura se estabilice en 80°C, lo cual se registra utilizando 3 termocuplas instaladas cuidadosamente en la parte interior del secador. Asimismo se debe regular el soplador para que trabaje a 425 L/min.

c.- Se pesan las muestras con una balanza de precisión con 2 decimales y se introduce en la tolva dosificadora.

d.- Se pone en funcionamiento el secador rotatorio piloto, para lo cual se enciende el motor y con ayuda del variador de velocidad se ajusta a una velocidad rotacional del secador 15 RPM. El secador trabaja a 3° de inclinación para facilitar el desplazamiento de la carga. El tiempo de residencia fluctuó entre 45 y 55 minutos.

e.- La descarga de las semillas secadas se realiza en forma automática por el canal de descarga, denominado chute de salida. Se descarga en una tolva de producto seco con una balanza para registrar el peso. Se determina la humedad de salida de las semillas que oscila entre 5% y 6%.

f.- Es importante señalar que el sistema de secado piloto que se ha construido e instalado en el laboratorio de investigación, cuenta con un tubo exhaustor para el retiro de la humedad removida, y cuya eficiencia se mejora con un ventilador.

## VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1 Contrastación de hipótesis con los resultados

Partiendo que la hipótesis general, señala “ Si se determinan las variables del proceso de secado de semillas de uva quebranta entonces es posible establecer un modelo matemático que explique dicho proceso” , en efecto se ha logrado confirmar la señalada hipótesis, ya que se han determinado las variables que afectan el proceso de secado de las pepitas de uva quebranta, tales como temperatura de secado, flujo de aire, velocidad de rotación del secador continuo, y el peso de las pepitas de uva introducidas al secador.

Si es posible establecer un modelo matemático que explique el proceso de secado de pepitas de uva en el secador rotatorio continuo a nivel piloto, el mismo que responde a la siguiente expresión:

$$Y = 1886.366431 * T^{(-2.226342)} * F^{(-0.130682)} * RPM^{(-0.122047)} * M^{(0.125507)}$$

Con índice de correlación  $r = 0,96$  y una confiabilidad estadística de 95%

La precisión es tal que se tiene un error de 0.03%, entre los valores experimentales y los pronosticados con el modelo seleccionado, lo cual consideramos se debe a que se realizaron tres veces los experimentos establecidos por el diseño experimental planteado.

### 6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares

Luego de una exhaustiva búsqueda retrospectiva de información, se puede afirmar que no existen trabajos anteriores que determinen un modelo multivariable, donde la variable dependiente sea la humedad final de las pepitas de uva a la salida del secador rotatorio continuo con aire caliente, y las variables independientes sean la temperatura de secado, el flujo de

aire caliente, la velocidad rotacional del secador y el peso de la materia a secar.

Por otro lado, en cuanto a la cinética de secado de las pepitas de uva quebranta se puede mencionar que en el estudio similar denominado “Influencia de las condiciones de secado en la cinética de deshidratación de pepitas de uva” el mejor modelo fue el de Peleg pero se debe tener en cuenta que en dicho estudio, la deshidratación se lleva a cabo en bandejas estáticas con lo que se marca una diferencia respecto a los objetivos de la presente tesis, que como ya se mencionó, radica en el hecho de que las pepitas de uva están en constante movimiento rotacional logrando de esta manera tener un área mayor de contacto con el aire caliente que actúa como agente extractor de la humedad. Para la presente investigación se obtuvo los modelos de Midilli y el de Henderson-Pabis a los cuales se ajustan mejor los datos experimentales de la cinética del secado de pepitas de uva en el secador rotatorio.

## VII. CONCLUSIONES

a.-Se ha logrado un modelo que permite predecir la humedad de las semillas, estableciendo previamente las variables Temperatura de secado, flujo de aire caliente, velocidad rotacional del secador, lo que permite la formación de cortinas o cascada a la caída de las pepitas de uva quebranta en la parte interna del secador lo que facilita el secado de las mismas por acción del aire caliente que ingresa de manera perpendicular a dichas cortinas.

b.- Las características del secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto son:

Longitud = 62 cm

Diámetro interno =12.5 cm

Angulo de inclinación= 3° con respecto a la horizontal.

Material = Acero inoxidable ASTM 306

Bridas laterales con espesor de 5mm

Tolva de dosificación de materia l a secar de 8 cm \*8 cm \*9 cm

Chute o canal de entrada de 2.5 cm

Chute de salida de 3.3 cm para la descarga de material seco

Sistema de rotación del secador con:

Motor marca Siemens de 0.75 HP, 60 Hz; 220 V, con factor de potencia de 0.77

Variador de velocidad, marca Siemens de 10 Amperios, 60 HZ, 220V

Pistola de aire caliente, marca Crown de 2000 Watts, 8,6 Amperios, con los siguientes rangos de operación

I.- Temperatura 50°C	Flujo 350 L/min
II- Temperatura 50° a 500°C	Flujo 350 L/min
III.- Temperatura 50 a 500 °C	Flujo 500 L/min

c.- Las variables que intervienen en el proceso de secado de semillas de uva quebranta de Ica usando secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto y que permiten optimizar el proceso de secado, es decir lograr una humedad de salida no mayor al 6% son:

Temperatura	80°C
Flujo de aire caliente	425L/min
Velocidad de rotación del secador	15 rpm
Peso de la muestra a nivel piloto	50g.

d.- La descripción del proceso de secado de semillas de uva quebranta de Ica, usando un secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto es como se detalla seguidamente:

Se reciben las semillas de uva quebranta en bolsas selladas para evitar que se contaminen. Se les mide la humedad inicial con la que se reciben y que oscila entre 22% a 26% con ayuda de una balanza de medir humedad Adam AMB 50.

Paralelamente se enciende el soplador de aire caliente hasta que la temperatura se estabilice en 80°C, lo cual se registra utilizando 3 termocuplas instaladas cuidadosamente en la parte interior del secador. Asimismo se debe regular el soplador para que trabaje a 425 L/min.

Se pesan las muestras con una balanza de precisión con 2 decimales y se introduce en la tolva dosificadora.

Se pone en funcionamiento el secador rotatorio piloto, para lo cual se enciende el motor y con ayuda del variador de velocidad se ajusta a una velocidad rotacional del secador 15 RPM. El secador trabaja a 3° de inclinación para facilitar el desplazamiento de la carga. El tiempo de residencia fluctuó entre 45 y 55 minutos.

La descarga de las semillas secadas se realiza en forma automática por el canal de descarga, denominado chute de salida. Se descarga en una tolva de producto seco con una balanza para registrar el peso. Se determinó que la humedad óptima de salida de las semillas resultó ser menor al 6%.

Es importante señalar que el sistema de secado piloto que se ha construido e instalado en el laboratorio de investigación, cuenta con un tubo exhaustor para el retiro de la humedad removida, y cuya eficiencia se mejora con un ventilador.

## **VIII. RECOMENDACIONES**

a.-Desarrollar investigaciones relacionadas a los aspectos microbiológicos relacionados con las pepitas de uva, desde el momento de la obtención de los residuos vitivinícolas lo que posibilitaría su mejor aprovechamiento.

b.- Desarrollar investigaciones sobre la obtención de aceite de pepitas de uva usando la tecnología de fluidos en estado supercrítico, porque permite obtener aceites en mejores condiciones de inocuidad en comparación con los métodos tradicionales.

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BAYONA ROA, C. A. (2011). *Modelamiento matemático de un secador solar de plantas aromáticas*. Bogotá.
2. CARRASCO VENEGAS, L. (2011). *Fenómenos de transporte*. Lima: MACRO.
3. CARRASCO VENEGAS, L. (2018). *Modelamiento de los fenómenos de transporte*. Lima: MACRO.
4. CENGEL, YUNUS A. (2007). *Transferencia de calor y masa-un enfoque práctico*. México: Mc Graw-Hill Interamericana.
5. CHAPRA, S.C., CANALE, R.P. (2007). *Métodos numéricos para ingenieros*. México: Mc Graw-Hill/interamericana editores, s.a.
6. CHAVES, M. G. - SGROPPO, S. C. - AVANZA, J. R. (2004). *Isotermas de adsorción de berenjenas deshidratadas*, [s.n.].
7. ESPINOZA LENIS, B. Y VEGA CÓRDOVA, J. (20 5). *Re-ingeniería de un secador rotatorio didáctico para el laboratorio de operaciones*. Guayaquil. [s.n].
8. FIORI L. et al. (2012). *Grape seed oil: supercritical extraction, chemical analysis and fractionation*. [s.n.]
9. FOUST A. et. Al. (2000). *Principios de operaciones unitarias*. España: CECSA.

10. GEANKOPLIS, C.J. (1998). *Proceso de transporte y operaciones unitarias*. México: Compañía editorial continental S.A.
11. HERNANDEZ BAUTISTA, E. (2011). *Modelado Matemático Del Secado De Madera Subtropical Por Convección De Aire Caliente*. Oaxaca. Instituto Politécnico Nacional.
12. HERNANDEZ SAMPIERI. R. (2010). *Metodología de la Investigación científica*. México: Mc Graw-Hill/interamericana editores, s.a.
13. KAVANAUGH C. (2002). *Los diseños Taguchi contra los diseños clásicos de experimentos*. En *Conciencia Tecnológica*. 19-Instituto Tecnológico de Aguascalientes. México.
14. LÓPEZ HERRERA, J. Y CARLOS PEREYRA, L. (2018). *Optimización de secado del yawuarchunka (pleysalis peruviana linnaeus) empleando la técnica de un proceso combinado aire caliente-microondas*. : Callao. Universidad Nacional del Callao.
15. MALDONADO GRANADOS L. (2013). *El modelamiento matemático en la formación del ingeniero*. Colombia: Ediciones Fundación Universidad Central.
16. MARCELO ASTOCONDOR D. (2008). *Propuesta tecnológica para la fabricación de Pisco puro de calidad en una Microempresa*. Lima:UNI.
17. MARTINELLO, M. A. (2015). *Modelado de secado de granos en lecho fijo a bajas temperaturas de aire*. La plata: Universidad Nacional de la plata.

18. MARTÍNEZ DE LA CUESTA, P. J., RUS MARTÍNEZ, E. (2004). *Operaciones de separación en ingeniería química-métodos de cálculo*. España: FARESO S.A.
19. MARTINEZ SAIZ, C. *Influencia de las condiciones de secado en las cinéticas de deshidratación de pepitas de uva*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.2002
20. Mc.CABE, W. L., SMITH, J. C., HARRIOT, P. *Operaciones unitarias en Ingeniería química*. España: Mc Graw Hill. 1998
21. MOLERO, PEREYRA, MARTINEZ. *Caracterización del aceite de semilla de uva extraído con dióxido de carbono supercrítico*. Grasas y aceites. Fasc.Nº1. Vol.46. 1995. Pag. 29 – 34.
22. MOYA GARCIA, C. R. (2017). *“Extracción y caracterización de aceite vegetal de las semillas de uva borgoña (vitis vinífera) utilizando enzimas”*. Lima: Universidad nacional agraria La Molina.
23. NAMAUFOROOSH M. (2013). *Metodología de la Investigación* Mexico: Limusa.
24. ORREGO ALZATE, C. E. *Procesamiento de alimentos, Universidad Nacional de Colombia*. Manizales.
25. OTI P., BOATENG, BARRIE AXTELL. (1997). *Técnicas de secado*. USA. Grafica Educativa.

26. PARRA CORONADO, A.; ROA MEJÍA, GONZALO y OLIVEROS-TASCÓN, CARLOS. (2008). *Modelamiento y simulación matemática en el secado mecánico del café pergamino*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Vol. 12: 416:
27. PERRY R. (2008). *Chemical Engineering Handbook*. Mc. Graw Hill – Chapter 12 Drying.
28. PICADO, A. y MARTINEZ, J. (2007). *Modelamiento y simulación de un secador de lecho vibrofluidizado para sólidos que contienen mezclas solventes*. N°02, pp56-68, Nicaragua.
29. PUENTE DIAZ, L., ECHEGARAY PACHECO, E., CASTRO MONTERO, E., DI SCALA, K. (2013). *Aplicación de modelos matemáticos al proceso de secado asistido por infrarrojo de descartes de limón*. Dyna, año 80, N°181, pp 91-97, Medellín.
30. RIOS L. et al. (2007). *Extracción y caracterización de aceite de cardamomo*. DYNA, año 74, N° 151, pp47-52, Medellín, Colombia.
31. SMITH, VAN NESS, ABBOTT. (1998). *Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química*. México. Mc Graw-Hill/interamericana editores, s.a.
32. TINEO CORDOVA, FREDDY. (2012). *Estudio experimental y modelamiento matemático para el proceso de extracción por lotes por arrastre de vapor de agua del aceite esencial libre del Schinus molle Linneo*. Lima: UNI.

33. TORO N. y SUÁREZ L. (2012). Obtención y caracterización del aceite de las semillas de *Vitis Labrusca* L. (uva Isabela) y evaluación de su actividad antioxidante. Universidad Tecnológica de Pereira.

34. TREYBAL R. *Operaciones de transferencia de masa*. México: Mcgraw-Hill Book Co.

#### CONSULTAS DE INTERNET

35. *Manual de práctica de laboratorio de física de fluidos*. Recuperado el 03 de noviembre del 2018, de <http://composi.info/manual-de-prcticas-de-laboratorio-de-fsica-de-fluidos.html?page=12>.

36. Secadores. Recuperado el 10 de octubre del 2018, de <http://nifco.www.nifco.cl>.

## **ANEXOS**

ANEXO 1  
MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA PRINCIPAL	OBJETIVO PRINCIPAL	HIPOTESIS PRINCIPAL	VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
¿Cuáles son los modelos matemáticos que explican el proceso de secado de semillas de uva quebranta de Ica usando secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto?	Establecer los modelos matemáticos que explican el proceso de secado de semillas de uva quebranta de Ica usando secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto.	En el proceso de secado de las pepitas de uva quebranta en un secador rotatorio, es posible obtener una humedad final menor al 6%, si se trabaja con temperatura de secado de 80°C, flujo de aire de 425 lt/min, velocidad rotacional de 15 RPM y un peso de muestra de 50gr.	Y: Humedad final de las pepitas de uva a la salida del secador	Humedad de las pepitas de uva	%	Experimentos en el laboratorio.
PROBLEMAS SECUNDARIOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICAS	VARIABLES INDEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODO
a. ¿Cuáles son las características del secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto que permita el secado eficiente de semillas de uva quebranta de Ica?	a. Describir las características de un secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto que permita el secado eficiente de semillas de uva quebranta de Ica.	Un secador rotatorio de aire caliente, debidamente encaquetado permite optimizar el secado de las pepitas de uva quebranta.	X1: Características del secador.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Longitud del secador.</li> <li>Diámetro del secador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>cm</li> <li>cm</li> </ul>	Construcción del secador rotatorio en acero inoxidable
b. ¿Cuáles son las variables que intervienen en el proceso de secado de semillas de uva quebranta de Ica usando secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto para determinar el modelo matemático del proceso de secado?	b. Especificar las variables que intervienen en el proceso de secado de semillas de uva quebranta de Ica usando secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto para determinar el modelo matemático del proceso de secado.	La temperatura de secado, el flujo de aire caliente, la velocidad de rotación del secador y el peso dosificado de pepitas de uva, permiten obtener pepitas con humedad final menor a 6%.	X2: Variables del proceso de secado	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperatura de aire caliente.</li> <li>Flujo de aire caliente.</li> <li>Peso de la muestra.</li> <li>Velocidad de giro del secador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>°C</li> <li>L/min</li> <li>g.</li> <li>rpm</li> </ul>	Pruebas experimentales de secado en el secador rotatorio con aire caliente.



ANEXO 2  
 MODELO LINEAL PROCESO DE SECADO EN SECADOR  
 ROTATORIO METALICO

LINEAL  
 Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.94191934
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.88721205
R <sup>2</sup> ajustado	0.77442409
Error típico	0.01268238
Observaciones	9

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	4	0.00506088	0.00126522	7.86619513	0.03529379
Residuos	4	0.00064337	0.00016084		
Total	8	0.00570425			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>
Intercepción	0.30497778	0.05040554	6.05048189	0.00376504	0.16502958
Variable X 1	-0.002845	0.00051776	-5.49486847	0.0053461	-0.00428252
Variable X 2	-8.4444E-06	6.9034E-05	-0.12232279	0.90854277	-0.00020011
Variable X 3	-0.00115	0.00103551	-1.11056217	0.32901503	-0.00402504
Variable X 4	0.00031333	0.00207102	0.15129398	0.8870674	-0.00543675

ANEXO 3  
 MODELO SEMILOGATITMICO PROCESO DE SECADO EN SECADOR  
 ROTATORIO METALICO

SEMILOG  
 Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.95468951
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.91143205
R <sup>2</sup> ajustado	0.8228641
Error típico	0.01123848
Observaciones	9

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	4	0.00519904	0.00129976	10.2907663	0.02214334
Residuos	4	0.00050521	0.0001263		
Total	8	0.00570425			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>
<b>Intercepción</b>	<b>0.99004315</b>	0.20830899	4.75276247	0.00895269	0.41168468
<b>Variable X 1</b>	<b>-0.20003357</b>	0.03186967	-6.27661223	0.00328937	-0.28851796
<b>Variable X 2</b>	<b>-0.00488693</b>	0.02569334	-0.19020235	0.85841327	-0.07622308
<b>Variable X 3</b>	<b>-0.01075945</b>	0.00825867	-1.30280652	0.26258083	-0.03368919
<b>Variable X 4</b>	<b>0.00241944</b>	0.01317518	0.18363596	0.86323214	-0.03416072

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 4  
 MODELO HIPERBOLICO PROCESO DE SECADO EN SECADOR  
 ROTATORIO METALICO

HIPERBOLICO  
 Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.94018337
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.96075944
R <sup>2</sup> ajustado	0.92151889
Error típico	0.82910983
Observaciones	9

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	4	67.3230263	16.8307566	24.483839	0.00449862
Residuos	4	2.74969242	0.6874231		
Total	8	70.0727188			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>
<b>Intercepción</b>	<b>34.2417517</b>	3.22804355	10.6075867	0.00044708	25.279266
<b>Variable X 1</b>	<b>-1553.90081</b>	161.92186	-9.59660919	0.00065899	-2003.46797
<b>Variable X 2</b>	<b>-37.208005</b>	785.725265	-0.04735498	0.96450035	-2218.73107
<b>Variable X 3</b>	<b>-10.3538908</b>	4.87805444	-2.12254514	0.10105206	-23.8975411
<b>Variable X 4</b>	<b>7.67512764</b>	6.64766765	1.15455947	0.31255154	-10.7817567

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 5  
 MODELO INVERSO PROCESO DE SECADO EN SECADOR  
 ROTATORIO METALICO

INVERSO  
 Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.96495169
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.93113177
R <sup>2</sup> ajustado	0.86226355
Error típico	0.00991011
Observaciones	9

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	4	0.0053114	0.00132785	13.5204843	0.01357524
Residuos	4	0.0003928	9.821E-05		
Total	8	0.0057042			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>
<b>Intercepción</b>	<b>-0.12282196</b>	0.0385838	-3.18324454	0.03343132	-0.22994801
<b>Variable X 1</b>	<b>13.9175135</b>	1.9354061	7.19100421	0.00198143	8.54396468
<b>Variable X 2</b>	<b>2.56746575</b>	9.3915514	0.27338036	0.79809576	-23.5076613
<b>Variable X 3</b>	<b>0.08742308</b>	0.058306	1.49938382	0.20815149	-0.07446034
<b>Variable X 4</b>	<b>-0.0175</b>	0.0794576	-0.22024301	0.83646603	-0.23810991

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 6  
 MODELO EXPONENCIAL PROCESO DE SECADO EN SECADOR  
 ROTATORIO METALICO

EXPONENCIAL  
 Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	<b>0.95585698</b>
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.91366257
R <sup>2</sup> ajustado	0.82732514
Error típico	0.11469108
Observaciones	9

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	4	0.5568087	0.13920217	10.5824616	0.02107531
Residuos	4	0.05261618	0.01315404		
Total	8	0.60942487			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>
Intercepción	<b>-0.25878467</b>	0.45583461	-0.56771615	0.60057628	-1.52438443
Variable X 1	<b>-0.0297391</b>	0.00468224	-6.35146363	0.0031484	-0.04273909
Variable X 2	<b>-1.0564E-05</b>	0.0006243	-0.01692106	0.98730996	-0.0017439
Variable X 3	<b>-0.01255167</b>	0.00936449	-1.34034731	0.25119883	-0.03855165
Variable X 4	<b>0.00820532</b>	0.01872898	0.43810855	0.68392805	-0.04379465

Fuente: Elaboración propia

## ANEXO 7 REPRESENTACION DEL MODELO DE NEWTON

Condiciones:

Temperatura	60°C
Flujo	bajo
Masa	3 g

Resumen de resultados:

**Model:  $X = \text{EXP}(-k*t)$  MODELO DE NEWTON**

Variable	Initial guess	Value	95% confidence
k	0.5	30.60155	47.4183

### Nonlinear regression settings

Max # iterations = 64

### Precision

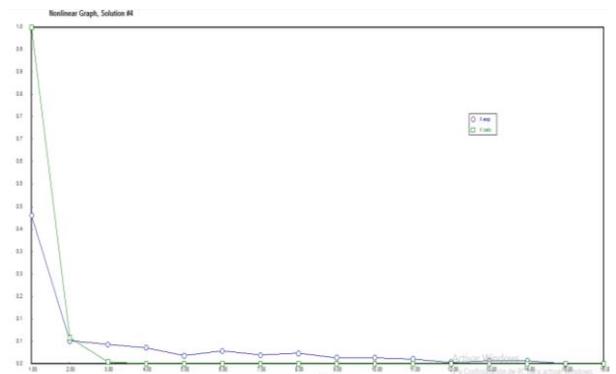
R <sup>2</sup>	-0.9113573
R <sup>2</sup> adj	-0.9113573
Rmsd	0.0354796
Variance	0.0214835

### General

Sample size	16
Model vars	1
Indep vars	1
Iterations	13

### Source data points and calculated data points

	t	X	X calc	Delta X
1	0	0.44118	1.	-0.55882
2	0.08333	0.06909	0.0780796	-0.0089896
3	0.16667	0.05769	0.0060946	0.0515954
4	0.25	0.04839	0.0004759	0.0479141
5	0.33333	0.02479	3.715E-05	0.0247528
6	0.41667	0.03863	2.9E-06	0.0386271
7	0.5	0.02643	2.264E-07	0.0264298
8	0.58333	0.03182	1.768E-08	0.03182
9	0.66667	0.01852	1.38E-09	0.01852
10	0.75	0.01887	1.078E-10	0.01887
11	0.83333	0.01435	8.413E-12	0.01435
12	0.91667	0.00481	6.567E-13	0.00481
13	1	0.00971	5.128E-14	0.00971
14	1.08333	0.0098	4.004E-15	0.0098
15	1.16667	0	3.125E-16	-3.125E-16
16	1.25	0	2.44E-17	-2.44E-17



## ANEXO 8 REPRESENTACION DEL MODELO DE PAGE

Condiciones:

Temperatura	70°C
Flujo	bajo
Masa	3 g

Resumen de resultados:

### POLYMATH Report

Nonlinear Regression (L-M)

No Title

28-oct-2018

**Model:  $X = \text{EXP}(-k \cdot t^n)$  MODELO DE PAGE**

Variable	Initial guess	Value	95% confidence
k	0.5	4.346195	6.813784
n	0.5	0.2135495	0.9662451

### Nonlinear regression settings

Max # iterations = 64

### Precision

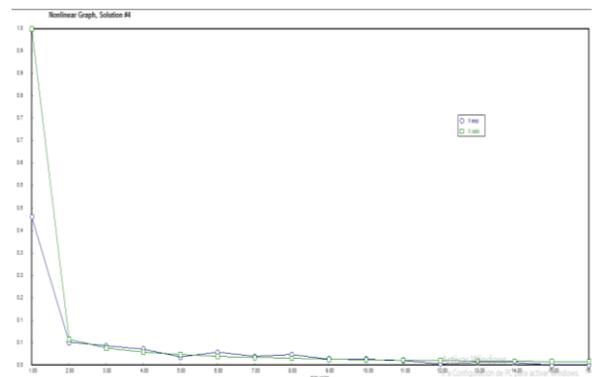
R <sup>2</sup>	-0.8572194
R <sup>2</sup> adj	-0.9898779
Rmsd	0.0349735
Variance	0.0223661

### General

Sample size	16
Model vars	2
Indep vars	1
Iterations	9

### Source data points and calculated data points

	t	X	X calc	Delta X
1	0	0.44118	1.	-0.55882
2	0.08333	0.06909	0.0775753	-0.0084853
3	0.16667	0.05769	0.0515913	0.0060987
4	0.25	0.04839	0.0394584	0.0089316
5	0.33333	0.02479	0.0321509	-0.0073609
6	0.41667	0.03863	0.027185	0.011445
7	0.5	0.02643	0.0235598	0.0028702
8	0.58333	0.03182	0.0207824	0.0110376
9	0.66667	0.01852	0.0185793	-5.928E-05
10	0.75	0.01887	0.0167857	0.0020843
11	0.83333	0.01435	0.0152951	-0.0009451
12	0.91667	0.00481	0.0140352	-0.0092252
13	1	0.00971	0.012956	-0.003246
14	1.08333	0.0098	0.0120208	-0.0022208
15	1.16667	0	0.0112021	-0.0112021
16	1.25	0	0.0104797	-0.0104797



## ANEXO 9 REPRESENTACION DEL MODELO DE HENDERSON

Condiciones:

Temperatura	80°C
Flujo	bajo
Masa	3 g

Resumen de resultados:

### POLYMATH Report

Nonlinear Regression (L-M)

No Title

28-oct-2018

**Model:  $X = a \cdot \text{EXP}(-k \cdot t)$  MODELO DE HENDERSON**

Variable	Initial guess	Value	95% confidence
a	1.	0.4384269	0.0538788
k	1.	18.6752	6.5363

### Nonlinear regression settings

Max # iterations = 64

#### Precision

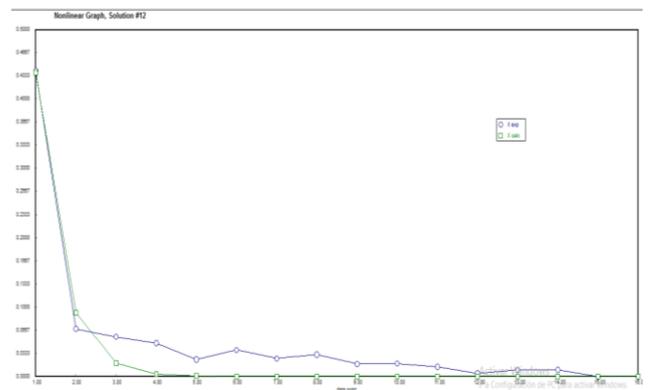
R <sup>2</sup>	0.9475054
R <sup>2</sup> adj	0.9437557
Rmsd	0.0058798
Variance	0.0006322

### General

Sample size	16
Model vars	2
Indep vars	1
Iterations	16

### Source data points and calculated data points

	t	X	X calc	Delta X
1	0	0.44118	0.4384269	0.0027531
2	0.08333	0.06909	0.0924797	-0.0233897
3	0.16667	0.05769	0.0195036	0.0381864
4	0.25	0.04839	0.004114	0.044276
5	0.33333	0.02479	0.0008678	0.0239222
6	0.41667	0.03863	0.000183	0.038447
7	0.5	0.02643	3.86E-05	0.0263914
8	0.58333	0.03182	8.143E-06	0.0318119
9	0.66667	0.01852	1.717E-06	0.0185183
10	0.75	0.01887	3.622E-07	0.0188696
11	0.83333	0.01435	7.641E-08	0.0143499
12	0.91667	0.00481	1.611E-08	0.00481
13	1	0.00971	3.399E-09	0.00971
14	1.08333	0.0098	7.17E-10	0.0098
15	1.16667	0	1.512E-10	-1.512E-10
16	1.25	0	3.19E-11	-3.19E-11



## ANEXO 10 REPRESENTACION DEL MODELO LOGARITMICO

Condiciones:

Temperatura	60°C
Flujo	bajo
Masa	3 g

Resumen de resultados:

**POLYMATH Report**

No Title

Nonlinear Regression (L-M)

28-oct-2018

**Model:**  $X = a \cdot \text{EXP}(-k \cdot t) + c$  **MODELO LOGARITMICO**

Variable	Initial guess	Value	95% confidence
a	3.	0.4200815	0.0368361
k	3.	23.66232	7.43349
c	3.	0.020379	0.0097378

### Nonlinear regression settings

Max # iterations = 64

### Precision

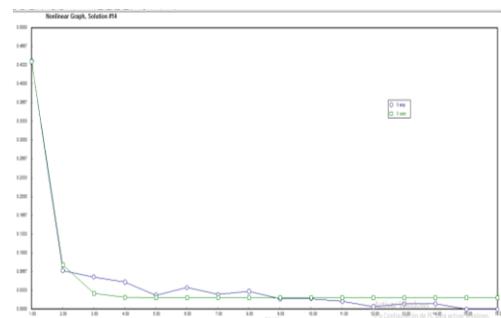
R <sup>2</sup>	0.9790743
R <sup>2</sup> adj	0.975855
Rmsd	0.0037123
Variance	0.0002714

### General

Sample size	16
Model vars	3
Indep vars	1
Iterations	12

### Source data points and calculated data points

	t	X	X calc	Delta X
1	0	0.44118	0.4404605	0.0007195
2	0.08333	0.06909	0.078858	-0.009768
3	0.16667	0.05769	0.0285179	0.0291721
4	0.25	0.04839	0.021512	0.026878
5	0.33333	0.02479	0.0205368	0.0042532
6	0.41667	0.03863	0.020401	0.018229
7	0.5	0.02643	0.0203821	0.0060479
8	0.58333	0.03182	0.0203795	0.0114405
9	0.66667	0.01852	0.0203791	-0.0018591
10	0.75	0.01887	0.020379	-0.001509
11	0.83333	0.01435	0.020379	-0.006029
12	0.91667	0.00481	0.020379	-0.015569
13	1	0.00971	0.020379	-0.010669
14	1.08333	0.0098	0.020379	-0.010579
15	1.16667	0	0.020379	-0.020379
16	1.25	0	0.020379	-0.020379



ANEXO 11  
REPRESENTACION DEL MODELO PELEG

Temperatura	70°C
Flujo	bajo
Masa	3 g

Resumen de resultados:

**POLYMATH Report**

No Title

Nonlinear Regression (L-M)

28-oct-2018

**Model:**  $X = X_0 - t / (k_1 + k_2 \cdot t)$  **MODELO DE PELEG**

$X_0 = 0.52795031$

Variable	Initial guess	Value	95% confidence
k1	0.5	0.0274552	0.0230384
k2	0.5	1.917699	0.07619

**Nonlinear regression settings**

Max # iterations = 64

**Precision**

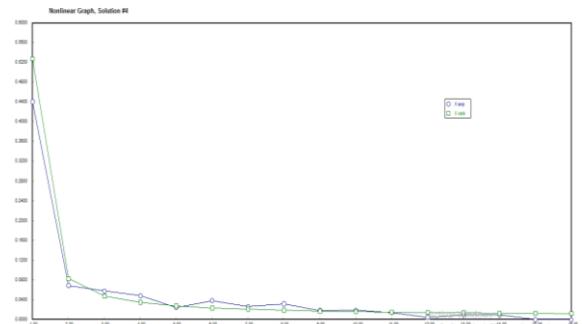
R <sup>2</sup>	0.9473279
R <sup>2</sup> adj	0.9435656
Rmsd	0.0058898
Variance	0.0006343

**General**

Sample size	16
Model vars	2
Indep vars	1
Iterations	7

**Source data points and calculated data points**

	t	X	X calc	Delta X
1	0	0.44118	0.5279503	-0.0867703
2	0.08333	0.06909	0.0829471	-0.0138571
3	0.16667	0.05769	0.0477414	0.0099486
4	0.25	0.04839	0.0347369	0.0136531
5	0.33333	0.02479	0.0279667	-0.0031767
6	0.41667	0.03863	0.0238141	0.0148159
7	0.5	0.02643	0.0210076	0.0054224
8	0.58333	0.03182	0.0189837	0.0128363
9	0.66667	0.01852	0.017455	0.001065
10	0.75	0.01887	0.0162597	0.0026103
11	0.83333	0.01435	0.0152995	-0.0009495
12	0.91667	0.00481	0.0145111	-0.0097011
13	1	0.00971	0.0138523	-0.0041423
14	1.08333	0.0098	0.0132935	-0.0034935
15	1.16667	0	0.0128135	-0.0128135
16	1.25	0	0.0123969	-0.0123969



## ANEXO 12 REPRESENTACION DEL MODELO DOS TERMINOS

Condiciones:

Temperatura	80°C
Flujo	bajo
Masa	3 g

Resumen de resultados:

**POLYMATH Report**

No Title

Nonlinear Regression (L-M)

28-oct-2018

**Model:**  $X = a \cdot \text{EXP}(-k \cdot t) + b \cdot \text{EXP}(-g \cdot t)$

Variable	Initial guess	Value	95% confidence
a	0.5	0.3603607	0.0249861
k	1.	63.37916	129.4615
b	0.5	0.0808192	0.0211109
g	0.5	2.201257	0.6429996

**Nonlinear settings**

Max # iterations = 64

**Precision**

R <sup>2</sup>	0.997322
R <sup>2</sup> adj	0.9966526
Rmsd	0.001328
Variance	3.763E-05

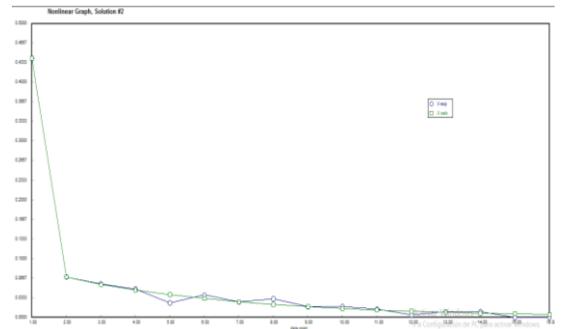
**regression**

**General**

Sample size	16
Model vars	4
Indep vars	1
Iterations	11

**Source data points and calculated data points**

	t	X	X calc	Delta X
1	0	0.44118	0.44118	4.403E-08
2	0.08333	0.06909	0.0691073	-1.725E-05
3	0.16667	0.05769	0.0560082	0.0016818
4	0.25	0.04839	0.046614	0.001776
5	0.33333	0.02479	0.0388019	-0.0140119
6	0.41667	0.03863	0.0322984	0.0063316
7	0.5	0.02643	0.0268855	-0.0004555
8	0.58333	0.03182	0.0223797	0.0094403
9	0.66667	0.01852	0.0186287	-0.0001087
10	0.75	0.01887	0.0155067	0.0033633
11	0.83333	0.01435	0.0129079	0.0014421
12	0.91667	0.00481	0.0107444	-0.0059344
13	1	0.00971	0.0089438	0.0007662
14	1.08333	0.0098	0.0074449	0.0023551
15	1.16667	0	0.0061971	-0.0061971
16	1.25	0	0.0051585	-0.0051585



## ANEXO 13 REPRESENTACION DEL MODELO DOS TERMINOS EXPONENCIAL

Condiciones:

Temperatura	60°C
Flujo	bajo
Masa	3 g

Resumen de resultados:

**POLYMATH Report**

No Title

Nonlinear Regression (L-M)

28-oct-2018

**Model:**  $X = a \cdot \text{EXP}(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \text{EXP}(-k \cdot a \cdot t)$

Variable	Initial guess	Value	95% confidence
a	0.05	0.4831148	0.0055176
k	0.35	36.3499	0.4521029

### Nonlinear regression settings

Max # iterations = 64

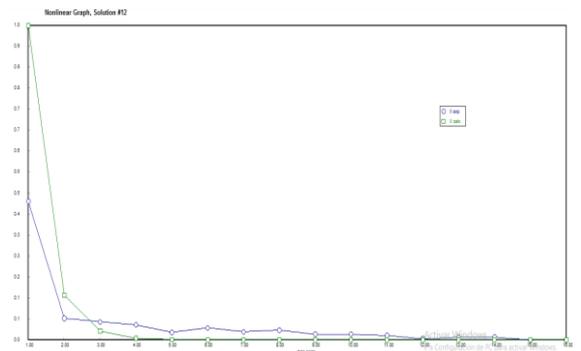
#### Precision

R <sup>2</sup>	-0.9286429
R <sup>2</sup> adj	-1.066403
Rmsd	0.0356396
Variance	0.0232262

Sam	<b>General</b>
Model vars	2
Indep vars	1
Iterations	15

### Source data points and calculated data points

	t	X	X calc	Delta X
1	0	0.44118	1.	-0.55882
2	0.08333	0.06909	0.1429998	-0.0739098
3	0.16667	0.05769	0.0288148	0.0288752
4	0.25	0.04839	0.0064625	0.0419275
5	0.33333	0.02479	0.0014858	0.0233042
6	0.41667	0.03863	0.0003433	0.0382867
7	0.5	0.02643	7.945E-05	0.0263506
8	0.58333	0.03182	1.839E-05	0.0318016
9	0.66667	0.01852	4.255E-06	0.0185157
10	0.75	0.01887	9.848E-07	0.018869
11	0.83333	0.01435	2.279E-07	0.0143498
12	0.91667	0.00481	5.275E-08	0.0048099
13	1	0.00971	1.221E-08	0.00971
14	1.08333	0.0098	2.826E-09	0.0098
15	1.16667	0	6.539E-10	-6.539E-10
16	1.25	0	1.514E-10	-1.514E-10



## ANEXO 14 REPRESENTACION DEL MODELO HENDESON Y PABIS MODIFICADO

Condiciones:

Temperatura	70°C
Flujo	bajo
Masa	3 g

Resumen de resultados:

**POLYMATH Report**

Nonlinear Regression (L-M)

No Title

28-oct-2018

**Model:**  $X = a \cdot \text{EXP}(-k \cdot t) + b \cdot \text{EXP}(-g \cdot t) + c \cdot \text{EXP}(-h \cdot t)$

### Nonlinear regression settings

Max # iterations = 64

#### Precision

R <sup>2</sup>	0.9856272
R <sup>2</sup> adj	0.9784408
Rmsd	0.0030766
Variance	0.0002423

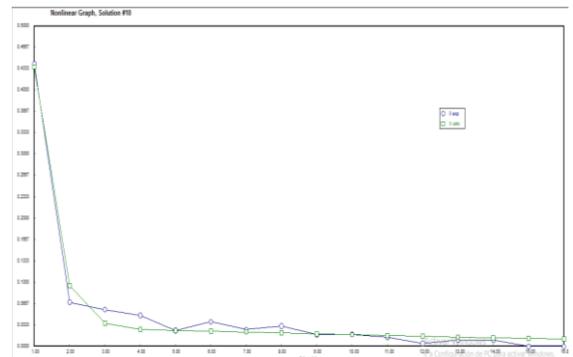
#### General

Sample size	16
Model vars	6
Indep vars	1
Iterations	30

Variable	Initial guess	Value	95% confidence
a	1.	0.488558	0.00034
k	0.25	19.4546	0.039822
b	0.5	0.035848	0.0001356
g	0.1	0.896959	0.0074235
c	0.1	-0.0880455	0.0003184
h	0.1	11.09999	0.0857262

### Source data points and calculated data points

	t	X	X calc	Delta X
1	0	0.44118	0.4363605	0.0048195
2	0.08333	0.06909	0.0949258	-0.0258358
3	0.16667	0.05769	0.0361127	0.0215773
4	0.25	0.04839	0.0269301	0.0214599
5	0.33333	0.02479	0.0251527	-0.0003627
6	0.41667	0.03863	0.0239533	0.0146767
7	0.5	0.02643	0.0225793	0.0038507
8	0.58333	0.03182	0.0211138	0.0107062
9	0.66667	0.01852	0.019661	-0.001141
10	0.75	0.01887	0.0182728	0.0005972
11	0.83333	0.01435	0.016968	-0.002618
12	0.91667	0.00481	0.0157503	-0.0109403
13	1	0.00971	0.0146178	-0.0049078
14	1.08333	0.0098	0.0135657	-0.0037657
15	1.16667	0	0.0125889	-0.0125889
16	1.25	0	0.0116824	-0.0116824



## ANEXO 15 REPRESENTACION DEL MODELO VERMA

Condiciones:

Temperatura	80°C
Flujo	bajo
Masa	3 g

Resumen de resultados:

### POLYMATH Report

Nonlinear Regression (L-M)

No Title

28-oct-2018

**Model:**  $X = a \cdot \text{EXP}(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \text{EXP}(-g \cdot t)$

Variable	Initial guess	Value	95% confidence
a	0.5	0.0808425	0.5267627
k	0.5	2.20179	16.07613
g	4.	74.79398	3285.034

### Nonlinear regression settings

Max # iterations = 64

### Precision

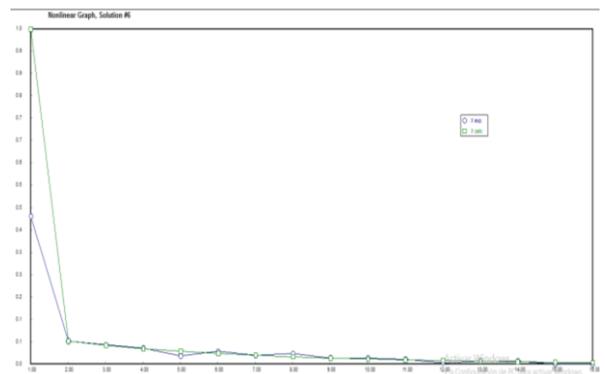
R <sup>2</sup>	-0.8548836
R <sup>2</sup> adj	-1.14025
Rmsd	0.0349515
Variance	0.0240563

### General

Sample size	16
Model vars	3
Indep vars	1
Iterations	8

### Source data points and calculated data points

	t	X	X calc	Delta X
1	0	0.44118	1.	-0.55882
2	0.08333	0.06909	0.0690966	-6.615E-06
3	0.16667	0.05769	0.0560135	0.0016765
4	0.25	0.04839	0.0466212	0.0017688
5	0.33333	0.02479	0.0388062	-0.0140162
6	0.41667	0.03863	0.0323005	0.0063295
7	0.5	0.02643	0.026886	-0.000456
8	0.58333	0.03182	0.0223792	0.0094408
9	0.66667	0.01852	0.0186274	-0.0001074
10	0.75	0.01887	0.015505	0.003365
11	0.83333	0.01435	0.0129059	0.0014441
12	0.91667	0.00481	0.0107423	-0.0059323
13	1	0.00971	0.0089416	0.0007684
14	1.08333	0.0098	0.0074427	0.0023573
15	1.16667	0	0.006195	-0.006195
16	1.25	0	0.0051565	-0.0051565



## ANEXO 16 REPRESENTACION DEL MODELO MIDILLI

Condiciones:

Temperatura	60°C
Flujo	bajo
Masa	3 g

Resumen de resultados:

**POLYMATH Report** No Title  
Nonlinear Regression (L-M) 28-oct-2018

**Model:**  $X = a \cdot \text{EXP}(-k \cdot t^n) + b \cdot t$  **MODELO DE MIDILLI**

**Model:**  $X = a \cdot \text{EXP}(-k \cdot t^n) + b \cdot t$

### Nonlinear regression settings

Max # iterations = 64

#### Precision

Sample size	16
Model vars	4
Indep vars	1
Iterations	6

#### General

R <sup>2</sup>	0.9977751
R <sup>2</sup> adj	0.9972189
Rmsd	0.0012105
Variance	3.126E-05

Variable	Initial guess	Value	95% confidence
a	0.5	0.44118	0.0121829
k	0.5	2.715212	0.5057007
n	0.5	0.1618929	0.094035
b	0.5	-0.0210753	0.016162

**Source data points and calculated data points**

	t	X	X calc	Delta X
1	0	0.44118	0.44118	4.89E-08
2	0.08333	0.06909	0.0700208	-0.0009308
3	0.16667	0.05769	0.0543401	0.0033499
4	0.25	0.04839	0.0451356	0.0032544
5	0.33333	0.02479	0.038427	-0.013637
6	0.41667	0.03863	0.0330247	0.0056053
7	0.5	0.02643	0.0284193	-0.0019893
8	0.58333	0.03182	0.0243457	0.0074743
9	0.66667	0.01852	0.02065	-0.00213
10	0.75	0.01887	0.0172362	0.0016338
11	0.83333	0.01435	0.0140391	0.0003109
12	0.91667	0.00481	0.0110134	-0.0062034
13	1	0.00971	0.0081268	0.0015832
14	1.08333	0.0098	0.0053546	0.0044454
15	1.16667	0	0.0026777	-0.0026777
16	1.25	0	8.217E-05	-8.217E-05

