

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**ELABORACIÓN EXPERIMENTAL DE HARINA DE TARWI (LUPINUS
MUTABILIS) COMO COMPLEMENTO ALIMENTICIO PARA CONSUMO
HUMANO**

Por:

PAOLA CÉSPEDES GIRA

**Modalidad de graduación: Proyecto de Grado Investigación Aplicada presentado
a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL
SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en
Ingeniería Química.**

Junio-2021

TARIJA – BOLIVIA

VºBº

M.Sc. Ing. Ernesto Roberto Álvarez Gozávez

DECANO FAC. CIENCIA Y TECNOLOGÍA

M.Sc. Lic. Elizabeth Castro Figueroa

VICEDECANA FAC. CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Ing. Ernesto Evaristo Caihuara Alejandro

**DIRECTOR DPTO. PROCESOS INDUSTRIALES,
BIOTECNOLÓGICOS Y AMBIENTALES**

APROBADA POR:

TRIBUNAL:

M. Sc. Ing. Ignacio Edwin Velásquez Soza

Ing. Juan Pablo Herbas Barrancos

Ing. Gustavo Román Moreno López

El tribunal calificador del presente trabajo, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo éstas responsabilidad del autor.

DEDICATORIA

A Dios quien me ha dado fortaleza para continuar cuando a punto de caer he estado y guiarme en todo momento en su camino de amor y esperanza, por darme fuerzas cada día y haberme permitido llegar hasta este punto acompañada de personas maravillosas.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Marcelo y Veroska por haberme apoyado en todo momento y bajo cualquier circunstancia con sus consejos, valores, enseñanzas y ser la motivación constante que me ha permitido ser una persona íntegra bajo su ejemplo de perseverancia, constancia e inmenso amor. Gracias por ser mi luz, son lo que más quiero en este mundo y mi motor para salir adelante.

A Rosario, por ser una segunda madre para mí y por compartir momentos significativos conmigo y por siempre estar dispuesta a escucharme y ayudarme en cualquier momento.

A mi melliza Andrea y a mi hermano Daniel por su apoyo incondicional y permitirme vivir momentos de alegrías y tristezas a su lado sé que siempre estaremos unidos ante todas las situaciones adversas que se nos puedan presentar.

A mi amigo Ciro por brindarme su sincera y verdadera amistad extendiendo su mano en momentos difíciles ayudándome en todo lo que podía a lo largo de estos años.

Al plantel docente de la carrera de Ing. Química por todas sus enseñanzas a lo largo de mi vida universitaria tanto académicas como de vida, me llevo la grata experiencia de haberme formado bajo su guía.

A mis amigos y compañeros con quienes compartí nervios y risas en el aula en cada clase, examen y receso que compartimos juntos, los recordaré con mucho cariño siempre y espero verlos en un futuro cumpliendo todas las metas que se han propuesto y me han compartido.

ÍNDICE

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1.	ANTECEDENTES.....	1
1.2.	OBJETIVOS.....	3
1.2.1.	Objetivo general	3
1.2.2.	Objetivos específicos.....	3
1.3.	JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3.1.	Justificación tecnológica	3
1.3.2.	Justificación económica.....	4
1.3.3.	Justificación ambiental	4
1.3.4.	Justificación social.....	5

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.	CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL TARWI.....	6
2.1.1.	Origen y distribución geográfica.....	6
2.1.2.	DESCRIPCIÓN BOTÁNICA	8
2.1.2.1.	Taxonomía.....	8
2.1.2.2.	Morfología.....	9
2.1.2.2.1.	Tallo y ramificaciones	9
2.1.2.2.2.	Hojas.....	10
2.1.2.2.3.	Flores e inflorescencia.....	10
2.1.2.2.4.	Semillas	11
2.1.2.2.5.	Raíces y nódulos.....	13

2.1.3.	Cultivo del tarwi	13
2.1.3.1.	Requerimientos climáticos	13
2.1.3.1.1.	Suelos	14
2.1.3.1.2.	Temperatura.....	14
2.1.3.1.3.	Humedad.....	15
2.1.3.1.4.	Precipitación	15
2.1.3.2.	Época de siembra.....	15
2.1.3.3.	Rendimiento en Bolivia.....	16
2.2.	USOS Y APLICACIONES DEL TARWI.....	18
2.3.	COMPOSICIÓN QUÍMICA Y VALOR NUTRICIONAL DEL TARWI.....	19
2.3.1.	Cáscara	19
2.3.2.	Cotiledón	19
2.3.2.1.	Proteína.....	21
2.3.2.2.	Ácidos grasos.....	22
2.3.2.3.	Hidratos de carbono.....	23
2.3.2.4.	Minerales	24
2.3.2.5.	Fibra.....	24
2.3.2.6.	Vitaminas.....	24
2.4.	COMPARACIÓN NUTRICIONAL DEL TARWI CON OTRAS LEGUMINOSAS.....	25
2.5.	ALCALOIDES DEL TARWI.....	27
2.5.1.	Toxicidad de los alcaloides en el organismo humano	29
2.5.2.	Métodos de extracción de alcaloides	30
2.5.3.1.	Métodos convencionales	30

2.5.3.1.1.	Extracción tradicional.....	30
2.5.3.1.2.	Extracción Cuzco.....	30
2.5.3.2.	Métodos no convencionales	31
2.5.3.2.1.	Extracción con solventes	31
2.5.3.2.2.	Extracción con agua acidulada	32
2.5.3.2.3.	Extracción con NaHCO ₃	32
2.6.	HARINA.....	32
2.6.1.	Composición de la harina de trigo.....	33
2.6.1.1.	Almidón.....	34
2.6.1.2.	Proteína.....	35
2.6.1.3.	Azúcares	36
2.6.1.4.	Vitaminas.....	36
2.6.1.5.	Fibra.....	37
2.6.1.6.	Grasa.....	37
2.6.1.7.	Material mineral	38
2.6.2.	Clasificación de las harinas	38
2.6.3.1.	Según la fuerza	38
2.6.3.2.	Según el grado de pureza.....	39
2.6.3.3.	Según la tasa de extracción.....	39
2.7.	PROCESO DE OBTENCIÓN DE HARINAS.....	40
2.7.1.	Limpieza	40
2.7.2.	Secado.....	41
2.7.2.1.	Humedad.....	41
2.7.2.2.	Humedad de equilibrio	42

2.7.2.3.	Humedad libre o no ligada	43
2.7.2.4.	Humedad ligada.....	43
2.7.2.5.	Cinética de secado	44
2.7.2.6.	Curvas de secado	45
2.7.2.7.	Factores que influyen en el secado	47
2.7.2.7.1.	Temperatura de secado	47
2.7.2.7.2.	Tiempo de secado	47
2.7.2.7.3.	Área de superficie.....	48
2.7.2.7.4.	Humedad inicial del producto	48
2.7.2.7.5.	Flujo del producto dentro del secador	48
2.7.3.	Molienda.....	49
2.7.3.1.	Factores que influyen en la molienda.....	49
2.7.3.1.1.	Dureza.....	49
2.7.3.1.2.	Contenido de humedad	50
2.7.3.1.3.	Influencia de la temperatura	50
2.7.3.1.4.	Contenido de grasas y aceites.....	50
2.7.3.2.	Tipos de molinos	50
2.7.3.2.1.	Molino de martillo.....	51
2.7.3.2.2.	Molino de bolas	51
2.7.4.	Tamizado	52
2.8.	EVALUACIÓN SENSORIAL.....	54
2.8.1.	Tipos de análisis	55
2.8.1.1.	Análisis descriptivo	56
2.8.1.2.	Análisis discriminativo.....	56

2.8.1.3.	Análisis hedónico	56
----------	-------------------------	----

CAPÍTULO III

PARTE EXPERIMENTAL

3.1.	PROCESO TECNOLÓGICO EXPERIMENTAL.....	57
3.1.1.	Diagrama de flujo de proceso de la harina de tarwi	57
3.1.2.	Equipos y Materiales	58
3.2.	DISEÑO ESTADÍSTICO DE EXPERIMENTOS.....	59
3.3.	DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	62
3.3.1	Adquisición del tarwi	62
3.3.2	Caracterización organoléptica del tarwi	63
3.3.3	Caracterización fisicoquímica del tarwi	65
3.4.	DESARROLLO DEL PROCESO EXPERIMENTAL.....	67
3.4.1	Fase I: Desamargado del grano de tarwi	67
3.4.1.1.	Hidratación del tarwi	67
3.4.1.2.	Extracción de alcaloides	68
3.4.1.2.1.	Selección del método de extracción de alcaloides	69
3.4.1.2.2.	Desarrollo de la extracción de alcaloides	71
3.4.1.3.	Lavado de los granos de tarwi	72
3.4.2	Fase II: Elaboración de la harina de tarwi	73
3.4.2.1.	Secado del tarwi	73
3.4.2.1.1.	Determinación de la humedad en base seca	77
3.4.2.1.2.	Determinación de la humedad en base húmeda	78
3.4.2.1.3.	Determinación de la humedad crítica y humedad de equilibrio	80

3.4.2.1.4.	Determinación de la cinética de secado.....	82
3.4.2.1.5.	Determinación del periodo antecrítico y postcrítico	88
3.4.2.1.6.	Determinación del tiempo antecrítico o constante	89
3.4.2.1.7.	Determinación del tiempo postcrítico o decreciente	92
3.4.2.1.8.	Determinación del tiempo total de secado.....	93
3.4.2.2.	Molienda.....	94
3.4.2.3.	Tamizado	95
3.4.2.4.	Envasado.....	97
3.5.	BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA.....	98
3.5.1	Balance de materia	98
3.5.1.1.	Recepción de materia prima	99
3.5.1.2.	Hidratación del tarwi	100
3.5.1.3.	Extracción de alcaloides	102
3.5.1.4.	Lavado del tarwi	104
3.5.1.5.	Secado del tarwi	105
3.5.1.6.	Molienda del tarwi.....	107
3.5.1.7.	Tamizado de la harina de tarwi	107
3.5.1.8.	Envasado de la harina de tarwi	108
3.5.2	Balance de energía.....	109
3.6.	DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL PROCESO.....	114
3.7.	CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO FINAL.....	114
3.8.	ANÁLISIS SENSORIAL.....	115

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1.	RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	117
4.1.1	Caracterización organoléptica	117
4.1.2	Caracterización fisicoquímica	119
4.2.	RESULTADOS DEL DESARROLLO DEL PROCESO EXPERIMENTAL.....	120
4.2.1	Fase I: Desamargado del grano de tarwi	120
4.2.1.1.	Hidratación	120
4.2.1.2.	Extracción de alcaloides	122
4.2.2	Fase II: Elaboración de la harina de tarwi	124
4.2.2.1.	Resultados del proceso de secado del tarwi	124
4.2.2.1.1.	Discrepancia entre los experimentos y las réplicas	124
4.2.2.1.2.	Resultados en la pérdida de masa de tarwi	129
4.2.2.1.3.	Resultados de la humedad en base seca	133
4.2.2.1.4.	Resultados de la cinética de secado.....	136
4.2.2.2.	Resultados del proceso de molienda del grano de tarwi.....	138
4.2.2.3.	Resultados del proceso de tamizado de la harina de tarwi	140
4.3.	RESULTADOS DEL BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA...	142
4.3.1	Balance de materia	142
4.3.2	Balance de energía.....	143
4.4.	RESULTADOS DEL RENDIMIENTO DEL PROCESO.....	144
4.5.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE EXPERIMENTOS.....	146

4.6.	RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO OBTENIDO.....	152
4.6.1	Resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica de la harina de tarwi	152
4.6.2	Comparación de la harina de tarwi obtenida respecto a otras harinas 155	
4.7.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS SENSORIAL.....	156
4.7.1	Resultados del atributo color	156
4.7.2	Resultados del atributo olor.....	158
4.7.3	Resultados del atributo sabor.....	159
4.7.4	Resultados del atributo textura	161
4.7.5	Grado de aceptación general	162
4.8.	DETERMINACIÓN DEL EXPERIMENTO MÁS ÒPTIMO.....	165

CAPÍTULO V

COSTOS DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

5.1.	DETERMINACIÓN DE COSTOS DE PRODUCCIÓN.....	168
------	--	-----

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1.	CONCLUSIONES.....	171
6.2.	RECOMENDACIONES.....	172

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Libros.....	173
Artículos de revistas científicas.....	174
Documentos de sitios web.....	176
Trabajos de grado e investigaciones.....	177
Normas.....	178
Reportes e informes institucionales.....	178
Noticias.....	178
Entrevistas	179

ANEXOS

ANEXO A Especificación de equipos	181
ANEXO B Protocolo aplicado en la determinación de alcaloides	183
ANEXO <u>C</u> Encuesta aplicada en el análisis sensorial.....	184
ANEXO D Resultados de las encuestas del análisis sensorial	185
ANEXO E Resultados de análisis.....	187
ANEXO F Registro fotográfico.....	198

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla II-1 Clasificación taxonómica del tarwi, <i>Lupinus Mutabilis</i>	8
Tabla II-2 Superficie, volumen y rendimiento (PADER/COSUDE) gestión 2001	16
Tabla II-3 Superficie, producción y rendimiento de grano de tarwi por departamento	17
Tabla II-4 Composición promedio del tarwi	20
Tabla II-5 Comparación entre los aminoácidos del <i>Lupinus Mutabilis</i> y el patrón requerido en el organismo humano	21
Tabla II-6 Composición de ácidos grasos del tarwi (% de ácidos grasos totales)	22
Tabla II-7 Composición de hidratos de carbono en el tarwi (g/100 g materia seca) ..	23
Tabla II-8 Contenido de minerales en el tarwi	24
Tabla II-9 Contenido de vitaminas en la semilla de tarwi	25
Tabla II-10 Comparación de la composición del tarwi y soya (g/100 g)	25
Tabla II-11: Principales fracciones de alcaloides en el tarwi	28
Tabla II-12 Composición de la harina de trigo	33
Tabla II-13 Composición nutricional de la harina de trigo (por 100 g de producto) ..	33
Tabla II-14 Equivalencia de abertura de tamices de Norma UNE a ASTM	52
Tabla III-1 Equipos y materiales empleados en el proyecto de investigación	58
Tabla III-2 Factores y niveles del diseño factorial del experimento	59
Tabla III-3 Valores asignados para los niveles del diseño factorial	60
Tabla III-4 Diseño factorial para el proceso experimental	61
Tabla III-5 Valoración de la distribución y color secundario de los granos de tarwi .	64
Tabla III-6 Parámetros fisicoquímicos del grano amargo de tarwi	65
Tabla III-7 Criterios de valoración para la selección del proceso de extracción	69
Tabla III-8 Escala de puntuación	70
Tabla III-9 Matriz de decisión del proceso de extracción de alcaloides del tarwi	70
Tabla III-10 Especificaciones de calidad del producto desamargado	73
Tabla III-11 Variación de masa en función del tiempo para 65 °C en 7:30 h	74
Tabla III-12 Variación de la humedad expresada en base seca del proceso de secado de tarwi a 65° C y 7:30 h	77

Tabla III-13 Variación de la humedad expresada en base húmeda del proceso de secado de tarwi a 65° C y 7:30 h.....	79
Tabla III-14 Resultados de la diferenciación numérica por el método de tres puntos	83
Tabla III-15 Datos de velocidad de secado	84
Tabla III-16 Humedad en base seca vs inversa de la velocidad de secado	89
Tabla III-17 Área de trapecio en base a datos observados.....	91
Tabla III-18 Errores relativos porcentuales de los tiempos de secado.....	93
Tabla III-19 N.º de tamices utilizados en la harina de tarwi marca ORTO ARLESA	95
Tabla III-20 Porcentaje de retención en el proceso de tamizado de la harina de tarwi	96
Tabla III-21 Nomenclatura utilizada en el balance de materia	98
Tabla III-22 Nomenclatura utilizada en el balance de energía	109
Tabla III-23 Condiciones de operación en el secado, molienda y tamizado de la harina de tarwi.....	113
Tabla III-24 Requisitos fisicoquímicos para harinas y derivados.....	115
Tabla III-25 Requisitos microbiológicos avalados para harinas y derivados	115
Tabla IV-1 Resultados de la caracterización organoléptica de la materia prima.....	117
Tabla IV-2 Determinación de pureza de la materia prima.....	118
Tabla IV-3 Resultados de la caracterización fisicoquímica de la materia prima.....	119
Tabla IV-4 Resultados del proceso de hidratación del grano de tarwi	120
Tabla IV-5 Resultados del proceso de hidratación de la materia prima	121
Tabla IV-6 Resultados del proceso de extracción de alcaloides del tarwi	122
Tabla IV-7 Resultados de la pérdida de masa en el proceso de secado del grano de tarwi	124
Tabla IV-8 Resultados de las réplicas de la pérdida de masa en el proceso de secado del grano de tarwi.....	125
Tabla IV-9 Diferencia de resultados entre los experimentos y la réplica	126
Tabla IV-10 Resultados del error cuadrático medio entre los datos experimentales y datos de réplica.....	127
Tabla IV-11 Ecuaciones de ajuste para la variación de masa de cada ensayo	132

Tabla IV-12 Humedad expresada en base seca para cada ensayo	133
Tabla IV-13 Resultados de humedad crítica y humedad de equilibrio para cada experimento.....	136
Tabla IV-14 Resultados de ecuación de cinética para cada ensayo	136
Tabla IV-15 Resultados de ecuación de cinética para el periodo antecrítico y postcrítico para cada ensayo	137
Tabla IV-16 Resultados del proceso de molienda de los granos de tarwi para cada experimento.....	138
Tabla IV-17 Resultados del proceso de molienda de los granos de tarwi para réplicas	139
Tabla IV-18 Porcentaje de retención de cada malla para cada experimento	140
Tabla IV-19 Porcentaje de retención de cada malla para cada réplica	140
Tabla IV-20 Resultados del proceso de tamizado de los granos de tarwi para cada experimento.....	141
Tabla IV-21 Resultados del proceso de tamizado de los granos de tarwi para las réplicas	142
Tabla IV-22 Resultados obtenidos en el balance de materia de la elaboración de la harina de tarwi.....	143
Tabla IV-23 Resultados obtenidos en el balance de energía de la elaboración de la harina de tarwi.....	143
Tabla IV-24 Energía consumida en los procesos de secado, molienda y tamizado de la harina de tarwi.....	144
Tabla IV-25 Resultados de rendimiento de cada ensayo	144
Tabla IV-26 Resultados de rendimiento de cada réplica	145
Tabla IV-27 Análisis de varianza del proceso	146
Tabla IV-28 Resultados de la prueba de Fisher	147
Tabla IV-29 Análisis de varianza de regresión lineal	147
Tabla IV-30 Coeficientes del modelo	148
Tabla IV-31 Resumen del modelo de regresión lineal.....	148
Tabla IV-32 Errores entre valores observados y ajustados del modelo	150

Tabla IV-33 Resultados obtenidos de la proteína (Nx6,25) para cada experimento	152
Tabla IV-34 Resultados fisicoquímicos obtenidos para la harina de tarwi.....	153
Tabla IV-35 Resultados microbiológicos de la harina de tarwi.....	154
Tabla IV-36 Comparación de la harina de tarwi obtenida respecto a harinas convencionales	155
Tabla IV-37 ANOVA del atributo color.....	156
Tabla IV-38 Estadísticos descriptivos del atributo color.....	157
Tabla IV-39 ANOVA del atributo olor.....	158
Tabla IV-40 Estadísticos descriptivos del atributo olor.....	158
Tabla IV-41 ANOVA del atributo sabor.....	159
Tabla IV-42 Estadísticos descriptivos del atributo sabor.....	160
Tabla IV-43 ANOVA del atributo textura	161
Tabla IV-44 Estadísticos descriptivos del atributo textura	161
Tabla IV-45 Ponderación para cada atributo del análisis sensorial de la harina de tarwi	163
Tabla IV-46 Porcentajes de aceptación de cada muestra de harina de tarwi	163
Para determinar cuál de los procesos realizados en el proyecto de investigación da como resultado la harina de tarwi de mayor calidad se deben tomar en cuenta los siguientes factores de importancia, Tabla IV-47:	165
Tabla IV-47 Ponderación para determinación de la calidad de la harina de tarwi ...	165
Tabla IV-48 Resultados del porcentaje de calidad de las harinas obtenidas en cada experimento.....	165
Tabla V-1 Costos de materia prima e insumos	168
Tabla V-2 Costos de materiales	168
Tabla V-3 Costos de análisis de laboratorio	169
Tabla V-4 Costos de normas de IBNORCA	169
Tabla V-5 Detalle de energía eléctrica.....	170
Tabla V-6 Detalle de otros servicios.....	170
Tabla V-7 Detalle de costos totales.....	170

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II-1 Distribución geográfica del tarwi en Bolivia.....	7
Figura II-2 Arquitectura del tarwi según la ramificación.....	9
Figura II-3 Arquitectura de las hojas de la planta de tarwi	10
Figura II-4 Arquitectura de la flor de la planta de tarwi	11
Figura II-5 Arquitectura del grano de tarwi	12
Figura II-6 Distribución del color secundario de la semilla de tarwi.....	12
Figura II-7 Raíces y nódulos del tarwi.....	13
Figura II-8 Distribución porcentual de superficies sembrada de tarwi.....	17
Figura II-9 Composición promedio del tarwi.....	20
Figura II-10 Comparativo nutricional entre el tarwi, la soya.....	26
Figura II-11 Curva de equilibrio de humedad.....	44
Figura II-12 Curva de secado	45
Figura II-13 Curva de velocidad de secado.....	46
Figura III-1 Diagrama de flujo del desamargado de tarwi	57
Figura III-2 Diagrama de flujo elaboración de harina de tarwi	58
Figura III-3 Mapa del municipio de Colomi, Cochabamba	62
Figura III-4 Curva de variación de masa en función del tiempo para 65 °C en 7:30 h	75
Figura III-5 Ajuste de la curva para la variación de masa en función del tiempo para 65 °C en 7:30 h.....	76
Figura III-6 Curva de variación de la humedad expresada en base seca del proceso de secado de tarwi a 65° C y 7:30 h.....	78
Figura III-7 Curva de variación del contenido de humedad expresada en base húmeda del proceso de secado de tarwi a 65° C y 7:30 h.....	80
Figura III-8 Determinación de la humedad crítica y humedad de equilibrio	81
Figura III-9 Curva de velocidad de secado en función al contenido de humedad	85
Figura III-10 Curva de velocidad de secado en función del tiempo	86
Figura III-11 Representación del modelo de la cinética de secado a 65 °C Y 7:30 h.	87
Figura III-12 Humedad en base seca vs inversa de la velocidad de secado.....	90

Figura IV-1 Porcentaje de absorción de agua respecto al tiempo	121
Figura IV-2 Comparación entre la pérdida de masa en función del tiempo del ensayo y la réplica N° 9	129
Figura IV-3 Pérdida de masa vs tiempo en experimentos a 6:30 h.....	130
Figura IV-4 Pérdida de masa vs tiempo en experimentos a 7:00 h.....	131
Figura IV-5 Pérdida de masa vs tiempo en experimentos a 7:30 h.....	131
Figura IV-6 Variación de la humedad en base seca en función del tiempo a 6:30 h	134
Figura IV-7 Variación de la humedad en base seca en función del tiempo a 7:00 h	134
Figura IV-8 Variación de la humedad en base seca en función del tiempo a 7:30 h	135
Figura IV-9 Rendimiento observado vs rendimiento esperado.....	149
Figura IV-10 Valores observados vs valores ajustados al modelo	151
Figura IV-11 Error entre el rendimiento observado y el rendimiento generado.....	151
Figura IV-12 Análisis de medias para el atributo color	157
Figura IV-13 Análisis de medias para el atributo olor	159
Figura IV-14 Análisis de medias para el atributo sabor.....	160
Figura IV-15 Análisis de medias para el atributo textura	162
Figura IV-16 Porcentaje de aceptación general de cada muestra	164
Figura IV-17 Resultados del porcentaje de calidad de las harinas obtenidas en cada experimento.....	166

ÍNDICE DE ILUTRACIONES

Ilustración III-1 Materia prima adquirida de la comunidad de Colomi	63
Ilustración III-2 Hidratación del grano de tarwi	67
Ilustración III-3 Proceso de extracción de alcaloides del grano de tarwi	71
Ilustración III-4 Proceso de lavado de los granos de tarwi	72
Ilustración III-5 Proceso de secado del grano de tarwi	74
Ilustración III-6 Proceso de molienda del grano de tarwi	94
Ilustración III-7 Proceso de tamizado de la harina de tarwi.....	95
Ilustración III-8 Harina de tarwi retenida en el proceso de tamizado	97
Ilustración III-9 Envasado de la harina de tarwi	98
Ilustración III-10 Evaluación sensorial de la harina de tarwi	116
Ilustración IV-1 Granos puros e impurezas de la materia prima	118
Ilustración IV-2 Resultado del proceso de extracción de alcaloides del tarwi	122
Ilustración IV-3 Grano de tarwi desamargado	123

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación II-1 Humedad	41
Ecuación II-2 Humedad en base seca.....	41
Ecuación II-3 Humedad en base húmeda.....	42
Ecuación II-4 Relación entre base seca y base húmeda.....	42
Ecuación II-5 Velocidad de secado.....	44
Ecuación III-1 Modelo de diseño factorial.....	61
Ecuación III-2 Porcentaje de impurezas	65
Ecuación III-3 Porcentaje de hidratación.....	68
Ecuación III-4 Capacidad de hidratación Tarwi	68
Ecuación III-5 Ecuación de ajuste de la curva de pérdida de humedad en función del tiempo.....	76
Ecuación III-6 Aproximación por diferencia hacia atrás	82
Ecuación III-7 Aproximación por diferencia central	82
Ecuación III-8 Aproximación por diferencia hacia adelante	82
Ecuación III-9 Ecuación de la cinética de secado.....	87
Ecuación III-10 Representación del modelo de la cinética de secado del periodo antecrítico y postcrítico a 65 °C Y 7:30 h.....	88
Ecuación III-11 Ecuación de la cinética de secado del periodo antecrítico.....	88
Ecuación III-12 Ecuación de la cinética de secado del periodo postcrítico.....	89
Ecuación III-13 Tiempo del periodo antecrítico	89
Ecuación III-14 Expresión del trapecio.....	91
Ecuación III-15 Tiempo del periodo antecrítico calculado.....	92
Ecuación III-16 Tiempo del periodo postcrítico calculado.....	92
Ecuación III-17 Tiempo total de secado	93
Ecuación III-18 Error relativo porcentual	93
Ecuación III-19 Porcentaje de retención.....	96
Ecuación III-20 Porcentaje de pasa.....	96
Ecuación III-21 Primera ley de la termodinámica	109
Ecuación III-22 Calor sensible.....	110

Ecuación III-23 Potencia eléctrica	112
Ecuación III-24 Energía eléctrica.....	112
Ecuación III-25 Rendimiento del proceso.....	114
Ecuación IV-1 Error cuadrático medio	127
Ecuación IV-2 Modelo lineal del diseño experimental.....	148

ÍNDICE DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

Tn/ ha	Tonelada por hectárea
Kg/ ha	Kilogramo por hectárea
Art.	Artículo
NB/NA	Norma Boliviana
msnm	Metros sobre el nivel del mar
ha	Hectárea
X_{bs}	Humedad expresada en base seca
X_{bh}	Humedad expresada en base húmeda
X_e	Humedad de equilibrio
X_c	Humedad crítica
W	Velocidad de secado
Ss	Sólido seco
μm	Micrómetro
mm	Milímetro
$^{\circ}\text{C}$	Grados Centígrados
h	Hora
UNE	Norma Española
ASTM	American Society for Testing and Materials
H_0	Hipótesis nula
H_a	Hipótesis alterna
dx/dy	Diferencial de la función

θ_a	Periodo antecrítico
θ_p	Periodo postcrítico
UFC/g	Unidad formadora de colonias
C_p	Capacidad calorífica
Q	Calor
ECM	Error cuadrático medio
ANOVA	Análisis de varianza
F	Valor de Fisher
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
EXP	Experimento
REP	Réplica
REND	Rendimiento
Kwh	Kilovatio por hora
ΔT	Diferencial de temperatura
f(x)	Función
X_{H_2O}	Fracción de agua fase húmeda
Y_{H_2O}	Fracción de agua fase húmeda
X_S	Fracción de sólido
Y_S	Fracción de sólido
λ_{H_2O}	Calor latente de vaporización del agua
$P_{(1,2,3...)}$	Panelista
$M_{(1,2,3...)}$	Muestra