

## DESARROLLO Y DESEMPEÑO DE UN PROCESO DE BENEFICIADO EN SECO DE VARIEDADES AMARGAS DE QUINUA BASADO EN LA APLICACIÓN DE UN LECHO FLUIDIZADO DE TIPO SURTIDOR (LFTS)

Ramiro Escalera Vásquez\*, Carla Quiroga Ledezma\*\* y Luis Arteaga Weill\*

\*Centro de Investigaciones en Procesos Industriales - CIPI

\*\*Centro de Investigaciones Agrícolas y Agroindustriales Andinas – CIAAA  
Universidad Privada Boliviana

rescalera@upb.edu

(Recibido el 07 de octubre 2010, aceptado para publicación el 25 de noviembre 2010)

### RESUMEN

Se ha desarrollado un proceso novedoso de beneficiado en seco de quinua, mediante el empleo de un lecho fluidizado de tipo surtidor (LFTS). Se estudiaron las características básicas de funcionamiento del lecho en la remoción de saponinas de 3 ecotipos amargos de quinua real provenientes de zonas productivas en los departamentos de Oruro y Potosí.

Se construyeron dos reactores de vidrio a escala laboratorio de 7,5 y 20 cm de diámetro y boquillas de 1,4 y 3,4 mm y un prototipo piloto de sección rectangular de 10 cm de ancho por 40 cm de alto y 40 cm de largo, con una sección angular en la parte inferior donde se instalaron boquillas con una distancia entre ejes de 10 cm. Tanto los reactores de laboratorio como el reactor piloto, se alimentaron de aire a través de un compresor de 400 Lmin<sup>-1</sup> de capacidad, provisto de un medidor de flujo de 10-100 Lmin<sup>-1</sup> y de un filtro de humedad y aceite. Muestras de quinua fueron procesadas en estos equipos de acuerdo a un diseño experimental multifactorial, evaluándose el efecto de los factores: ecotipo, diámetro de reactor, diámetro de boquilla y altura de lecho sobre el porcentaje de remoción de saponinas, la calidad nutritiva (porcentaje de proteína), el porcentaje de pérdida de masa y el consumo específico de energía.

Los factores más preponderantes sobre la remoción de saponinas son el diámetro del lecho y el diámetro de la boquilla, seguidos del ecotipo, lográndose valores de saponinas mínimos (0 - 0,02%), tanto para los ecotipos individuales como para sus mezclas, con la siguiente combinación: diámetro de boquilla 1,4-1,8 mm; diámetro de lecho 7,5-12,5 cm; altura de lecho de 12,5 cm y 30 min de tiempo. Ninguno de los factores estudiados tiene un efecto significativo sobre el contenido de proteínas y las pérdidas de masa.

En general, tanto la remoción de saponinas como la pérdida de masa ocurren a mayor velocidad durante los primeros minutos. Las saponinas extraídas durante la desaponificación se recuperan en su totalidad. Los ecotipos más resistentes a la fricción entre granos de quinua son: (1) Toledo de Salinas de G. Mendoza; (2) Blanca de Uyuni; (3) Blanca de Salinas de G. Mendoza; (4) Amarilla de Uyuni y (5) Rosada de Uyuni, en ese orden. El desempeño de remoción de saponinas del prototipo piloto de paredes planas y sección rectangular es similar al del lecho de sección circular operado bajo las condiciones óptimas. Sin embargo, en ambos casos, el consumo específico de energía eléctrica es alto cuando se utiliza un compresor a pistón comercial (0,621 kWh/kg quinua procesada para prototipo piloto y 1,259 kWh/kg para condiciones óptimas de laboratorio). Como conclusión general se puede afirmar que la configuración del lecho fluidizado de tipo surtidor que no utiliza agua es idónea para la remoción de saponinas de diferentes variedades de quinua amarga en escala de laboratorio.

**Palabras Clave:** Quinua, Remoción de Saponinas, Lecho Fluidizado de Tipo Surtidor.

### 1. INTRODUCCIÓN

La demanda de la quinua, debido a sus propiedades nutritivas excepcionales [1], [2], [3], [4], ha crecido exponencialmente en los últimos años [5], especialmente en mercados internacionales donde se tiene gran interés en productos saludables, orgánicos, exóticos y comercio justo.

Las variedades y ecotipos de quinua que se comercializan en Bolivia tienen porcentajes elevados de saponina en el episperma del grano [6-8], la cual debe ser eliminada antes de su comercialización. Las empresas beneficiadoras de diversas variedades y ecotipos de quinua, establecidas en los departamentos de Oruro y Potosí, utilizan sistemas tradicionales o, en el mejor de los casos, los sistemas combinados de desaponificación por vía húmeda y seca, los cuales generan volúmenes significativos de aguas residuales (14 m<sup>3</sup>/TM de quinua procesada), contaminadas con saponinas que se descargan sin tratamiento a los cuerpos naturales, pudiendo ocasionar desequilibrios importantes en los ecosistemas acuáticos, debido a la toxicidad de las saponinas cuando sus concentraciones son elevadas. Más aún, debido precisamente a esta toxicidad, pueden ocasionar desajustes en los tratamientos biológicos de aguas residuales domésticas (caso de tanques Inhoff), en el caso de que estos residuos se evacúen hacia los sistemas de alcantarillado

sanitario provistos de sistemas de tratamiento. Finalmente, las empresas, al no tratar estas aguas residuales, contravienen las normas establecidas en el Reglamento Ambiental para el Sector Industrial Manufacturero (RASIM) y el Reglamento de Contaminación Hídrica de la Ley del Medio Ambiente (Ley 1333), aspecto que concierne tanto a las empresas como a las autoridades ambientales municipales y departamentales.

Por otra parte, entre 15 y 30 % de polvos con alto contenido de saponinas se pierden en estos residuos líquidos, puesto que su recuperación no es económicamente viable. Estos polvos constituyen, actualmente, una materia prima de mucha potencialidad para la fabricación de productos de alto valor agregado comercializados en el mercado internacional, en el espectro de una amplia gama de industrias, principalmente, las industrias farmacéutica y alimenticia [9].

El Centro de Promoción de Tecnologías Sostenibles (CPTS) [10], ha optimizado un sistema combinado que permite ahorros en agua y energía, y ha sido adoptado por beneficiadoras de tamaño relativamente grande. Sin embargo, aunque los volúmenes de agua se han reducido, se consideran todavía importantes en regiones donde este recurso es escaso y la precipitación pluvial alcanza solamente a 150-200 mm por año. El consumo energético, de aproximadamente 130 kWh/TM, se debe principalmente a la utilización de gas licuado en la etapa de secado de los granos lavados.

La implantación de una propuesta tecnológica que pueda reducir estos indicadores, mejorando la eficiencia energética, reduciendo el consumo de agua, reduciendo los efluentes contaminados con saponinas y recuperando el polvo de saponina, mejoraría la economía de las empresas beneficiadoras, representando un avance tecnológico significativo que cumpliría con los principios de ecoeficiencia, ecocapacidad y equidad, de un desarrollo industrial ecológicamente sostenible.

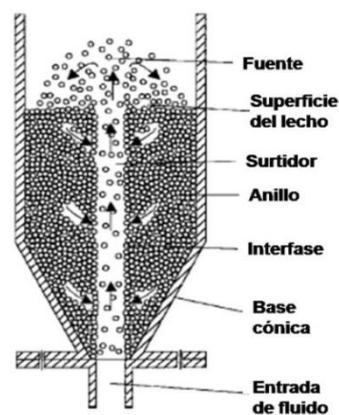
Para resolver las desventajas arriba detalladas, la investigación propuesta desarrolla un novedoso proceso de desaponificación en seco de granos de variedades amargas de quinua, basado en la aplicación de un lecho fluidizado de tipo surtidor, Figura 2, tomando en cuenta los principios de Producción Limpia. En este sistema, las partículas de quinua, previamente seleccionadas y limpiadas, se fluidizan mediante una corriente regulada de aire, generando un lecho en el que:

- La fricción y choques continuos entre ellas permiten la remoción de las capas externas del episperma de alto contenido de saponinas, bajo la forma de un polvo fino.
- La pérdida de nutrientes se minimiza debido a la abrasión controlada entre las partículas.
- La recuperación de saponinas a través de un ciclón es total.
- Se evita la contaminación de aguas.

El proceso propuesto, comparado con los recientemente desarrollados, evitaría inversiones en algunas etapas que actualmente se realizan en diferentes equipos y se obtendrían ahorros substanciales en el uso de agua, disminuyendo los costos de operación, lo que permitiría el incremento de la competitividad de las empresas y la mejora de las condiciones de trabajo de los empleados y obreros, así como del medioambiente al evitar la descarga directa de efluentes contaminados con saponina y emisiones de dióxido de carbono. Además, como este proceso no utiliza insumos contaminantes y minimiza el uso de energía proveniente de la combustión del gas licuado al eliminar el proceso de secado, se cumpliría con las normas del comercio orgánico, las cuales promueven la minimización del uso de los recursos no renovables para proteger el medio ambiente y la salud humana.



(A) Reactor-Laboratorio



(B) Diagrama del Reactor

**Figura 1-** Reactor de lecho fluidizado de tipo surtidor para la desaponificación en seco.

En el presente estudio se determinaron las características básicas y condiciones óptimas de procesamiento en el lecho fluidizado de tipo surtidor, incluyendo la caracterización de la geometría óptima del lecho, la determinación de las condiciones aerodinámicas de operación y la evaluación de los rendimientos en la desaponificación en 2 ecotipos o variedades comerciales o sus mezclas.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Pruebas de caracterización de lecho de tipo surtidor

#### (a) *Equipo experimental*

Se diseñó y construyó el equipo experimental que consta de, Figura 2:

- Un compresor a pistón de  $400 \text{ Lmin}^{-1}$  de capacidad de flujo de aire a una presión manométrica de operación de 8 bar (un máximo de 12 bar), provisto de un tanque de 200 L. El compresor es accionado por un motor de 5 hp.
- Un filtro de aire, para remover la humedad y los aceites contenidos, que está provisto de un manómetro para regular la presión de alimentación del aire al lecho.
- Un medidor de flujo de aire de  $10\text{-}100 \text{ Lmin}^{-1}$ .
- Dos columnas de vidrio cilíndrico-cónicas: una de 7,44 cm de diámetro interno, cono de  $30^\circ$  de inclinación y una altura de 40 cm; la otra, de 20 cm de diámetro externo con un cono de  $45^\circ$  de inclinación y altura de 50 cm. Las dos columnas tienen un tubo de entrada de aire de 10 mm de diámetro externo, al que se pueden adaptar boquillas cónicas de distintos diámetros.
- Un filtro-manga recolector de polvos de tela de porosidad adecuada, provista de una malla que no deja pasar los granos.
- Un recolector de polvos de plástico provisto de una malla que no deja pasar los granos.
- Un elevador mecánico para sostener el recolector.
- Un estante construido con angulares metálicos tipo mecano, provisto de tableros melamínicos que soportan los aparatos y accesorios.



**Figura 2-** Equipo experimental con todos los elementos.

**(b) Pruebas de caracterización de lecho**

Para determinar experimentalmente los intervalos de valores de las condiciones de operación requeridas para generar el surtidor, establecer un lecho fluidizado estable y apropiado para la remoción de saponinas y las condiciones de colapso del lecho se midieron:

- Velocidades de flujo volumétrico de aire (lectura de medidor).
- Velocidades lineales de aire a la salida de la boquilla (entrada del surtidor) (cálculo en función del área de salida de la boquilla).
- Alturas de lecho posibles en función de la capacidad del equipo experimental (capacidad del medidor de flujo y capacidad de lectura del manómetro del compresor).
- Masas de quinua en función de las alturas y diámetro de lecho.

**2.2 Evaluación de los rendimientos en la desaponificación****(a) Diseño experimental estadístico**

Con la ayuda de un paquete estadístico, Statgraphics Centurión versión XV, se procedió a elaborar el diseño experimental estadístico con el fin de determinar:

- Los factores de mayor efecto sobre la efectividad del proceso de remoción de saponinas.
- Las condiciones óptimas de procesamiento: diámetro de boquilla, diámetro de lecho y altura de lecho.

Se adoptó el diseño factorial de 4 factores a dos niveles y dos replicas por corrida. Se escogieron los 4 siguientes factores: diámetro de boquilla, diámetro de lecho, altura de lecho y ecotipo de quinua. El factor tiempo se estableció en 30 minutos, de acuerdo con las pruebas preliminares de caracterización de lecho. Como variables dependientes se consideraron: (1) el porcentaje residual de saponinas, (2) el porcentaje de remoción de saponinas, (3) la concentración de proteínas, (4) el porcentaje de pérdidas de masa y (5) el consumo específico de energía. La concentración de lípidos se determinó en las muestras más representativas de los ecotipos de quinua procesada.

**(b) Análisis de resultados de corridas según diseño experimental**

Se analizaron los resultados para cada una de las variables dependientes mediante el análisis de varianza multifactorial MANOVA para los cuatro factores considerados. El procedimiento del paquete aplica varias pruebas y construye varias gráficas para determinar los factores que tienen efectos estadísticamente significativos. También identifica las interacciones significativas entre factores. Por otra parte, para cada factor con efectos significativos la prueba de rango múltiple establece cuales son los valores promedio que son diferentes de los otros. Finalmente, la prueba de residuos ayuda a determinar si los supuestos básicos del análisis de la varianza son violados por los datos.

Adicionalmente, se analizaron para cada ecotipo las superficies de respuesta de la concentración de saponinas en modo tridimensional para cada par de factores, a fin de determinar los valores óptimos que permiten reducir la concentración hasta valores por debajo de los niveles de aceptación del consumidor. De la misma manera, se analizaron el porcentaje de remoción de saponinas, las pérdidas de masa, el porcentaje de proteínas y el consumo de energía por unidad de masa.

**3. RESULTADOS****3.1 Análisis e interpretación de los resultados de las corridas realizadas según el Diseño Experimental Estadístico**

La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos del contenido de saponinas y proteínas en muestras procesadas, porcentaje de remoción de saponina, porcentaje de pérdidas de masa y consumo específico de energía, para cada una de las corridas realizadas según el diseño experimental estadístico adoptado.

**TABLA 1- CONTENIDO DE SAPONINA Y PROTEÍNA EN MUESTRAS DE QUINUA SOMETIDAS A DIFERENTES CONDICIONES DE PROCESAMIENTO. EFICACIA DE REMOCIÓN DE SAPONINAS, PÉRDIDAS DE MASA Y CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGÍA**

Corrida N°	Ecotipo	Diámetro Boquilla [mm]	Altura Lecho [cm]	Diámetro Lecho [cm]	Porcentaje Saponina Grano [11] [%]	Porcentaje Remoción Saponinas [%]	Porcentaje Proteína Grano [11] [%]	Porcentaje Perdidas de Masa [%]	Consumo específico energía [kWh/kg]
1	Blanca Real	1,4	12,5	7,5	0,006	97,98	13,46	7,44	1,259
2	Blanca Real	3,4	7,5	7,5	0,128	53,00	12,21	4,84	6,280
3	Amarilla	3,4	12,5	20	0,114	67,89	11,84	5,30	1,028
4	Blanca Real	3,4	7,5	20	0,083	69,66	12,72	4,45	2,540
5	Blanca Real	3,4	12,5	20	0,095	65,16	11,83	11,82	1,028
6	Blanca Real	3,4	12,5	7,5	0,123	54,94	11,83	9,46	4,257
7	Amarilla	1,4	12,5	7,5	0,006	98,44	12,27	7,00	1,259
8	Blanca Real	1,4	12,5	20	0,091	66,87	10,47	5,00	0,283
9	Blanca Real	1,4	7,5	7,5	0,006	97,98	8,81	8,22	1,421
10	Blanca Real	3,4	7,5	7,5	0,081	70,31	12,18	5,02	6,280
11	Amarilla	1,4	7,5	20	0,133	62,49	12,21	6,20	0,677
12	Amarilla	1,4	7,5	7,5	0,010	97,10	12,02	6,52	1,421
13	Blanca Real	1,4	7,5	20	0,157	42,63	15,51	4,41	0,677
14	Amarilla	3,4	7,5	20	0,171	51,71	12,20	5,07	2,540
15	Blanca Real	1,4	12,5	20	0,114	58,27	12,15	4,11	0,283
16	Amarilla	3,4	7,5	7,5	0,199	43,77	13,02	5,23	6,280
17	Amarilla	1,4	7,5	20	0,218	38,40	13,74	9,62	0,677
18	Amarilla	3,4	12,5	7,5	0,109	59,97	11,75	5,40	4,257
19	Blanca Real	1,4	12,5	7,5	0,006	97,98	11,63	6,66	1,259
20	Amarilla	1,4	12,5	7,5	0,006	98,44	11,89	6,76	1,259
21	Amarilla	1,4	12,5	20	0,086	75,78	12,12	5,53	0,283
22	Amarilla	3,4	12,5	20	0,166	53,26	14,66	5,06	1,028
23	Amarilla	3,4	7,5	20	0,165	53,40	12,13	5,94	2,540
24	Blanca Real	3,4	7,5	20	0,114	58,39	15,57	4,69	2,540
25	Amarilla	1,4	7,5	7,5	0,062	82,48	11,26	6,47	1,421
26	Amarilla	1,4	12,5	20	0,123	65,30	12,63	5,09	0,283
27	Blanca Real	1,4	7,5	20	0,119	56,48	12,61	4,89	0,677
28	Amarilla	3,4	7,5	7,5	0,161	54,74	15,57	5,53	6,280
29	Amarilla	3,4	12,5	7,5	0,180	49,22	15,55	6,30	4,257
30	Blanca Real	3,4	12,5	20	0,142	48,11	13,00	4,83	1,028
31	Blanca Real	1,4	7,5	7,5	0,006	97,97	11,89	5,65	1,421
32	Blanca Real	3,4	12,5	7,5	0,006	97,98	11,91	6,11	4,257

Los porcentajes de remoción de saponinas fueron calculados sobre la base de los contenidos de saponinas en muestras sin procesar correspondientes a los 2 ecotipos seleccionados, presentados en la Tabla 2 [11].

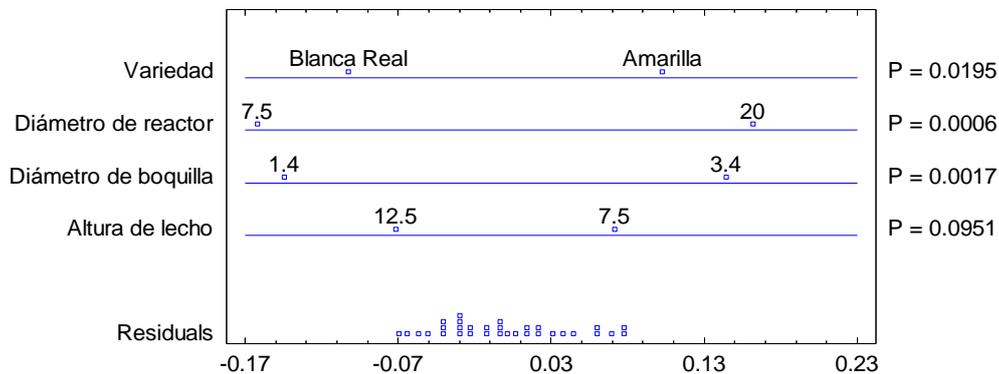
**TABLA 2 - CONTENIDO DE SAPONINA Y PROTEÍNA EN MUESTRAS DE QUINUA REAL SIN PROCESAR [11]**

Ecotipo	Porcentaje Saponinas [%]	Porcentaje Proteínas [%]
Blanca	0,27	10,49
Amarilla	0,35	10,08
Rosada	0,84	13,58

**(a) Efecto de los factores seleccionados sobre la remoción de saponinas**

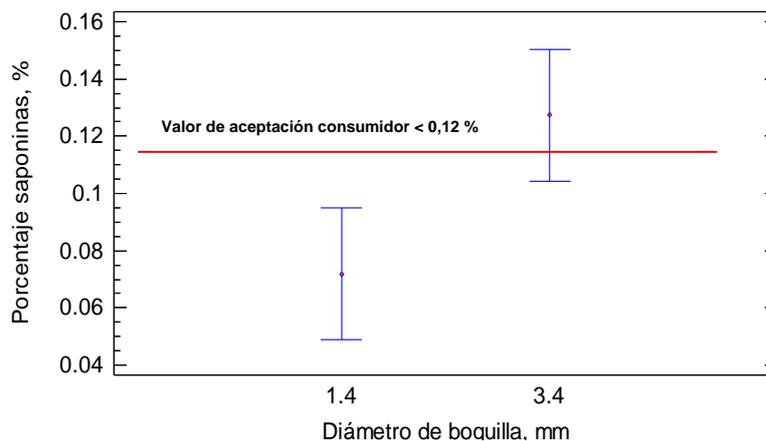
La Figura 3 muestra la descomposición de la variabilidad del porcentaje de saponinas en contribuciones de los cuatro factores probados. La contribución de cada factor se midió quitando los efectos de los factores restantes. Los valores de P prueban la significancia de cada uno de los factores, mostrando que el diámetro de la boquilla, el diámetro del lecho y el ecotipo (todos con  $P < 0,05$ ) poseen efectos estadísticamente significativos sobre la concentración de saponinas y su

remoción a un nivel de confianza del 95%. Los factores más preponderantes son el diámetro del lecho y el diámetro de la boquilla, seguidos del ecotipo. La altura de lecho con  $P > 0,05$  tiene muy poco efecto y podría no considerarse como parte del diseño factorial.



**Figura 3** - Análisis de varianza multifactorial (MANOVA). Valores de P para los cuatro factores sobre la variabilidad de la concentración residual de saponinas después de la remoción en el LFTS ( $n = 32$ , 95 % intervalo de confianza).

Los efectos individuales de cada factor se muestran en las Figuras 4, 6-7, donde se presentan las medias de porcentajes de saponinas residuales determinadas en las 32 corridas realizadas de acuerdo con el diseño experimental, en función de los dos niveles de cada factor.



**Figura 4** - Efecto del diámetro de boquilla sobre los valores medios de concentración residual de saponinas después de la remoción en el LFTS ( $n=32$ , 95 % intervalo de confianza).

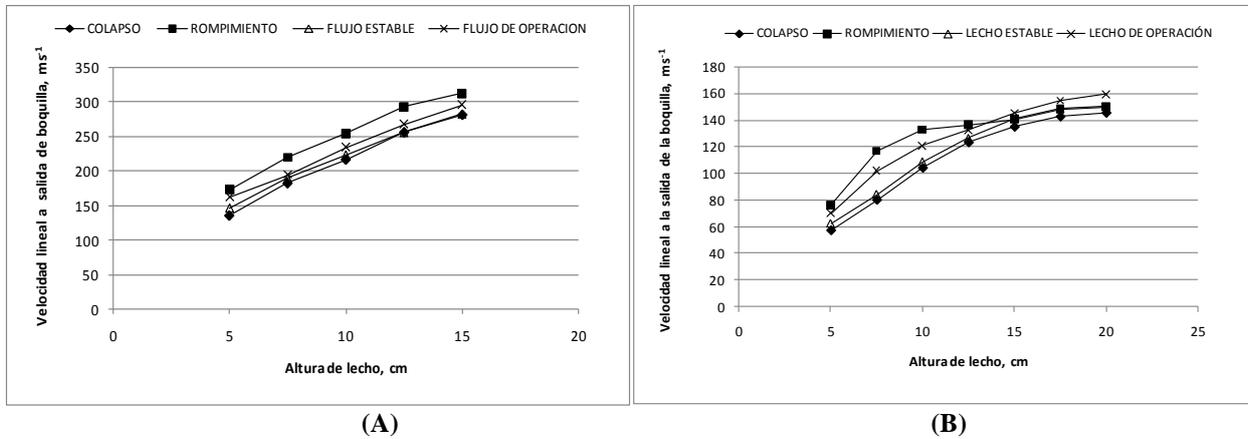
Se observa que se obtienen mejores remociones de saponinas (todas por debajo del valor aceptable para consumo humano), cuando se procesan las quinuas en el lecho de diámetro más pequeño con la boquilla de diámetro más pequeño y con la mayor altura de lecho. Por otro lado, la quinua real blanca se procesa mejor que la quinua real amarilla.

La remoción más efectiva lograda con el menor diámetro de boquilla, Figura 5A y 5B, se explica de la siguiente manera: Las fuerzas de choque entre granos de quinua en el surtidor son más elevadas debido a las mayores velocidades lineales producidas en el mismo ( $160-290 \text{ ms}^{-1}$ ) con la boquilla de 1,4 mm, en comparación de las velocidades producidas por la boquilla de 3,4 mm ( $70-160 \text{ ms}^{-1}$ ), ocasionando remociones mayores de la primera capa del epispermo que es la que contiene la saponina [7].

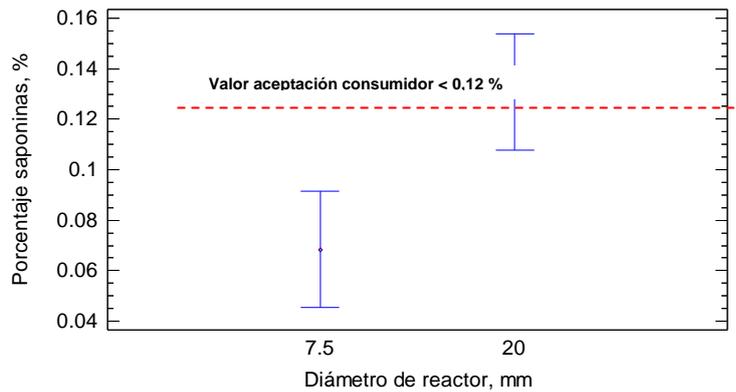
La remoción menos efectiva lograda con el mayor diámetro de lecho, Figura 6, se puede explicar a través de las siguientes mediciones y observaciones experimentales:

- Para una altura de lecho dada, se tiene mayor masa de granos de quinua en el diámetro mayor (para  $H = 12,5 \text{ cm}$ :  $M = 1450 \text{ g}$  para  $D = 20 \text{ cm}$  y  $M = 350 \text{ g}$  para  $D = 7,5 \text{ cm}$ )

- Se requiere aproximadamente el mismo flujo volumétrico de aire para generar un surtidor estable de operación en ambos diámetros de lecho (32 -33 Lmin<sup>-1</sup>, para una boquilla de 1,4 mm). Con estas velocidades de flujo, los granos descienden hacia el surtidor con menor frecuencia en el diámetro mayor. Por lo tanto, cada grano es sujeto a un menor número de oportunidades de chocar con los otros granos y remover su capa externa con saponinas.

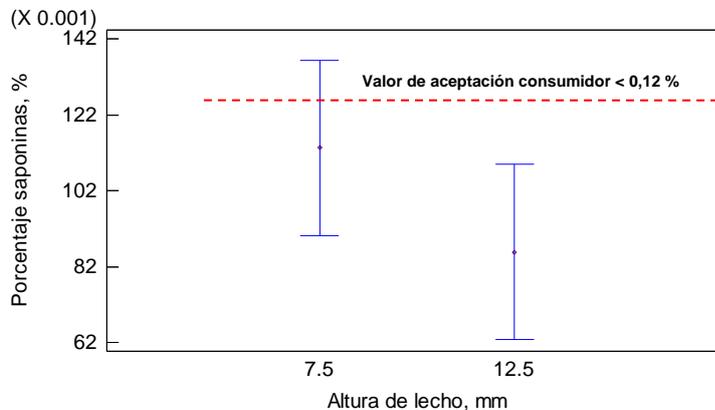


**Figura 5** - Velocidades lineales a la entrada del surtidor en función de las alturas de lecho. (A) Diámetro Boquilla de 1,4 mm y (B) Diámetro Boquilla de 3,4 mm.



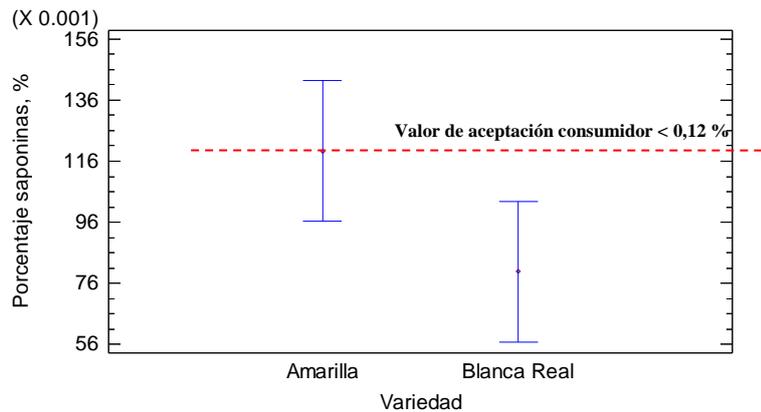
**Figura 6** - Efecto del diámetro del lecho sobre los valores medios de concentración residual de saponinas después de la remoción en el LFTS (n = 32, 95 % intervalo de confianza).

La pequeña diferencia de medias de concentraciones residuales de saponina a favor de la mayor altura de lecho, Figura 7, puede explicarse en razón de que la trayectoria de los granos en el surtidor es más larga en el caso de alturas mayores de lecho, por lo tanto, cada grano también tiene un número mayor de oportunidades de choque con los otros granos que descienden.



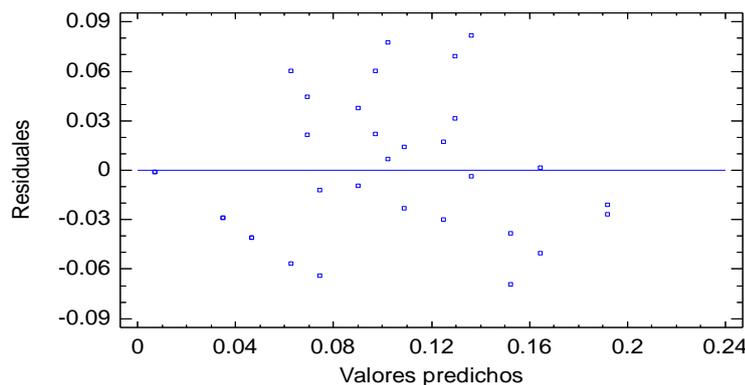
**Figura 7** - Efecto de la altura de lecho sobre los valores medios de concentración residual de saponinas después de la remoción en el LFTS (n = 32, 95 % intervalo de confianza).

Las mayores concentraciones de saponina residual medidas para la Real Amarilla, Figura 8, podrían deberse a que este ecotipo posee un mayor contenido natural que la Real Blanca (0,35 % vs. 0,27%), ver Tabla 2.



**Figura 8** - Efecto del ecotipo sobre valores medios de concentración residual de saponinas después de la remoción en el LFTS (n = 32, 95% intervalo de confianza).

Para establecer si existen comportamientos extraños con datos que violen los supuestos básicos del ANOVA, el análisis de residuos mostrado en la Figura 9, establece un comportamiento aleatorio de los mismos, sin tendencias positivas o negativas que pudieran originarse en errores sistemáticos debidos a efectos de algún otro factor no contemplado. Entonces, los factores considerados fueron los correctos.



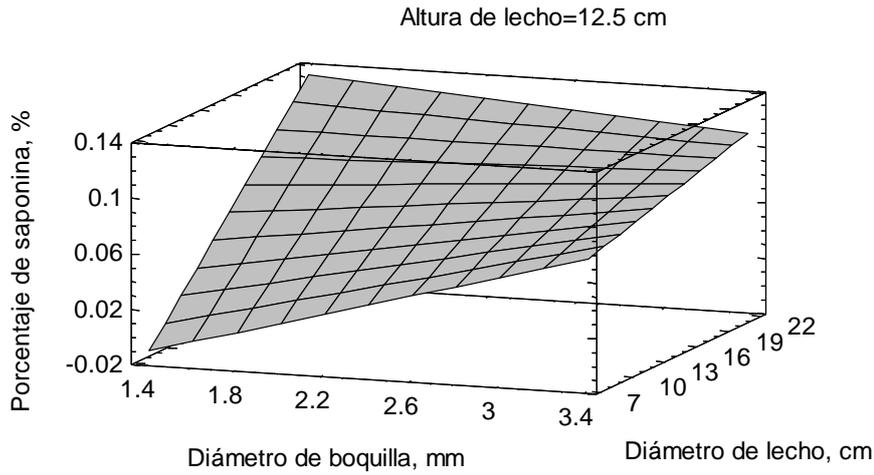
**Figura 9** - Valores residuales de la concentración de saponinas después de la remoción en el LFTS (n = 32, 95 % intervalo de confianza).

**(b) Valores óptimos de los factores que tienen efectos más significativos en la remoción de saponinas\**

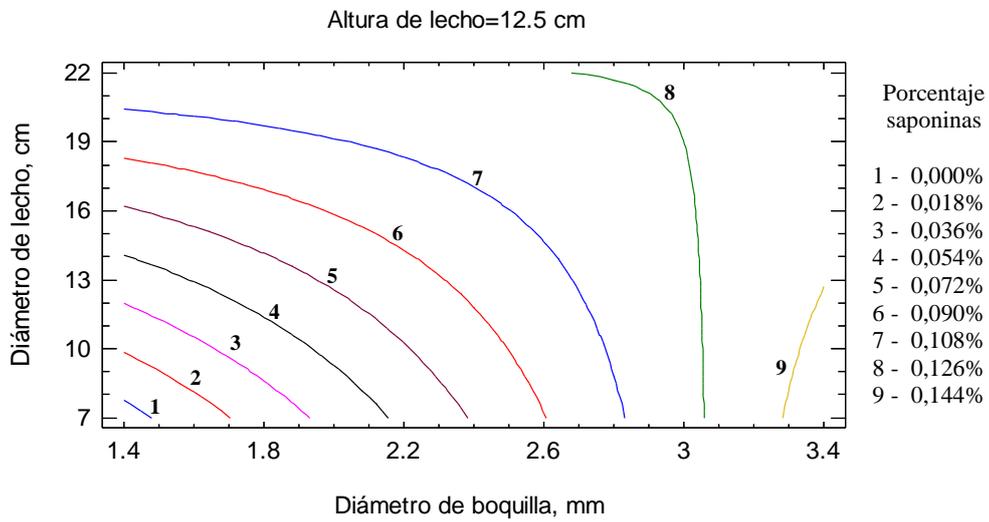
La superficie de respuesta y el contorno, Figuras 10 y 11, de la concentración residual de saponinas en muestras de Quinua Real Blanca y Amarilla, en función del diámetro de boquilla y el diámetro de lecho para una altura de lecho de 12,5 cm, muestran que se alcanzan valores de saponinas mínimos (0 - 0,02%) en los intervalos de 1,4 a 1,8 mm para el diámetro de boquilla y 7,5 a 12,5 cm para el diámetro de lecho. Por consiguiente, para el diseño del prototipo piloto se tomaron en cuenta estos rangos de valores.

**(a) Efecto de los factores seleccionados sobre concentración de proteínas en los granos tratados**

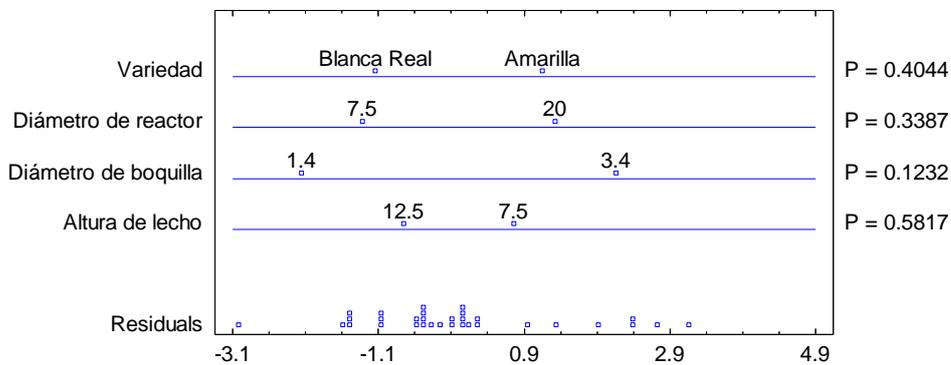
La Figura 12 muestra la descomposición de la variabilidad del porcentaje de proteínas en muestras tratadas en contribuciones debidas a los cuatro factores probados. La contribución de cada factor se midió quitando los efectos de los factores restantes. Como no existen valores de  $P < 0,05$ , ninguno de los factores tiene un efecto significativo sobre el porcentaje de proteínas a un nivel de confianza de 95 %.



**Figura 10-** Quinoa Real Blanca. Superficie de respuesta de la concentración de saponinas después de la remoción en el LFTS (n = 16, 95 % intervalo de confianza).

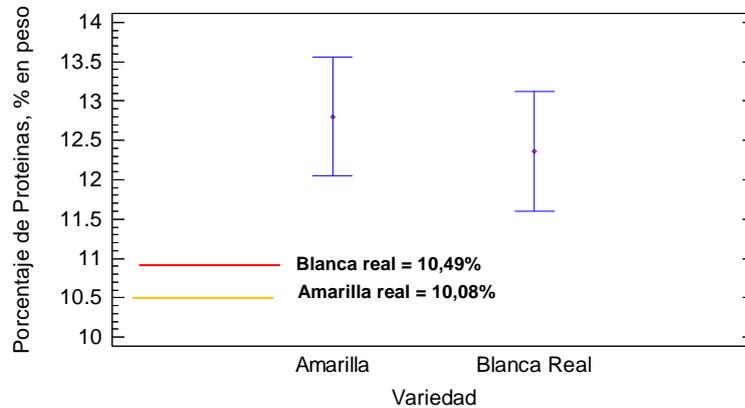


**Figura 11-** Quinoa Real Amarilla. Contorno de respuesta de la concentración de saponinas después de la remoción en el LFTS (n = 16, 95 % intervalo de confianza).



**Figura 12 -** Análisis de varianza multifactorial (MANOVA). Valores de P para los cuatro factores sobre la variabilidad de la concentración de proteínas en muestras tratadas en el LFTS (n=32, 95 % intervalo de confianza).

Sin embargo, la comparación de los valores promedio de las concentraciones de proteínas en los mismos ecotipos procesados y no procesados (Figura 13 y Tablas 1-2), muestra que ambos ecotipos incrementan su tenor de proteínas en aproximadamente en 2 a 2,8 % (valores sin procesar: blanca = 10,49 % y amarilla = 10,08 %). Este incremento puede ser explicado por disminución registrada de la masa de los granos (4,11 a 9,46 %) debido a la remoción de las capas externas que no tienen presencia significativa de proteínas y por el hecho de que el embrión (que es básicamente proteico) no ha sufrido daños significativos en el proceso.

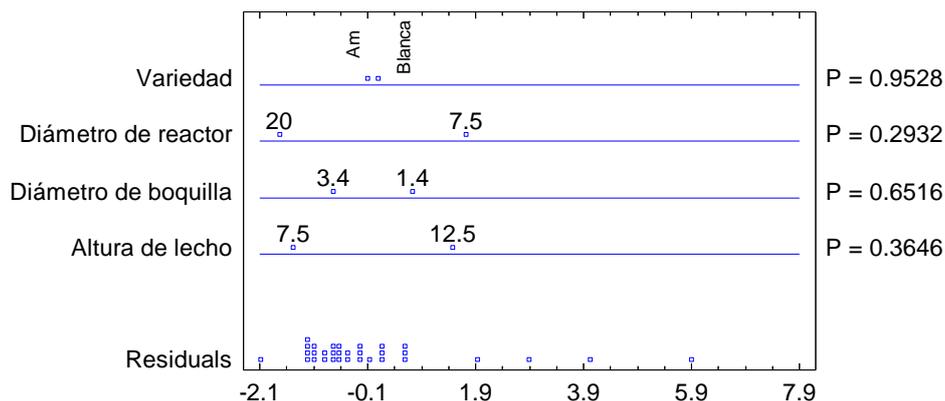


**Figura 13** - Efecto del ecotipo sobre valores medios de concentración de proteínas después de la remoción de saponinas en el LFTS (n=32, 95 % intervalo de confianza).

**(b) Efecto de los factores seleccionados sobre el porcentaje de pérdidas de masa en los granos tratados**

La Figura 14 muestra la descomposición de la variabilidad del porcentaje de pérdidas de masa en las muestras tratadas en función a las contribuciones debidas a los cuatro factores probados. La contribución de cada factor se midió quitando los efectos de los factores restantes. Como no existen valores de  $P < 0,05$ , ninguno de los factores tiene un efecto significativo sobre el porcentaje de proteínas a un nivel de confianza de 95 %.

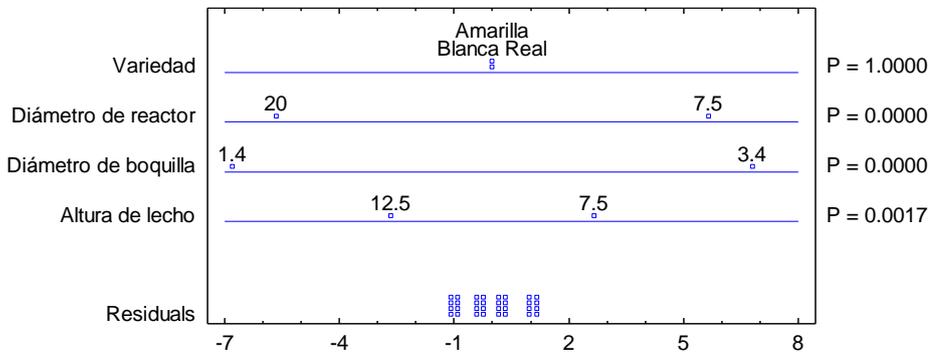
Sin embargo, se puede notar que existen pequeños efectos del diámetro del reactor, la altura de lecho y el diámetro de boquilla (en orden de mayor a menor) en la pérdida de masa. La combinación de 1,4 mm: 7,5 cm: 12,5 cm para diámetro de boquilla: diámetro de lecho: altura de lecho, provoca mayores pérdidas de masa, hecho que es congruente con la mayor remoción de saponinas observada para esta combinación.



**Figura 14** - Análisis de varianza multifactorial (MANOVA). Valores de P para los cuatro factores sobre la variabilidad del porcentaje de pérdidas de masa en muestras tratadas en el LFTS (n = 32, 95 % intervalo de confianza).

**(c) Efecto de los factores seleccionados sobre el consumo específico de energía**

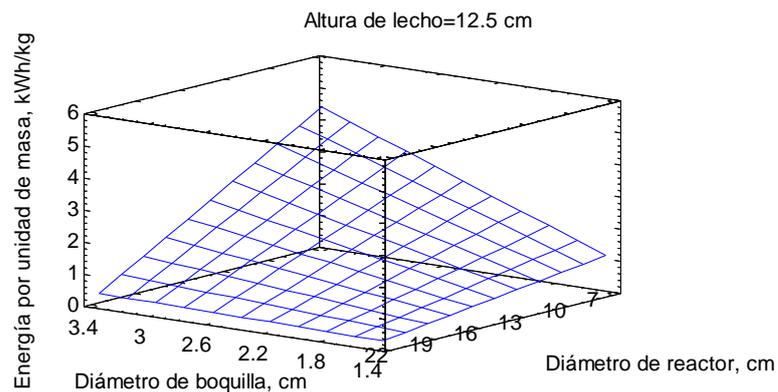
La Figura 15 muestra la descomposición de la variabilidad del consumo de energía por unidad de masa de quinua procesada (kWh/kg) en el proceso, en función a las contribuciones debidas a los cuatro factores probados. La contribución de cada factor se midió quitando los efectos de los factores restantes. Se observa que el diámetro de la boquilla, el diámetro del reactor y la altura de lecho, tienen efectos muy significativos ( $P < 0,0017$ ) a un nivel de confianza de 95 %.



**Figura 15-** Análisis de varianza multifactorial (MANOVA). Valores de P para los cuatro factores sobre la variabilidad del consumo específico de energía en el LFTS (n=32, 95 % intervalo de confianza).

Se observa que los menores consumos se dan cuando el diámetro del reactor es mayor (mayor capacidad de procesamiento, masas mayores), el diámetro de boquilla es menor (menores flujos de aire) y la altura de lecho es mayor (masas mayores). Es decir, una combinación de 1,4 mm: 20 cm: 12,5 cm para diámetro de boquilla: diámetro de reactor: altura de lecho, consume la menor cantidad de energía por unidad de masa, Figura 16. Desafortunadamente, tal combinación no remueve efectivamente las saponinas en un tiempo de 30 minutos.

En general, los consumos de energía por unidad de masa fueron elevados (0,283 – 6,280 kWh/kg), debido a la baja eficiencia del compresor utilizado que es característica de compresores de pistón con cámara de almacenamiento de aire. Los consumos de energía por unidad de flujo volumétrico de aire de otros tipos de compresores, por ejemplo los compresores de tornillo, son mucho más bajos.



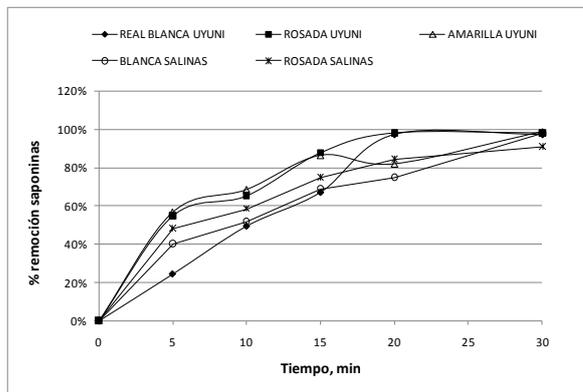
**Figura 16-** Superficie de respuesta del consumo específico de energía en el proceso del LFTS.

**3.2 Interpretación de los resultados de las corridas realizadas en condiciones óptimas a diferentes tiempos de procesamiento**

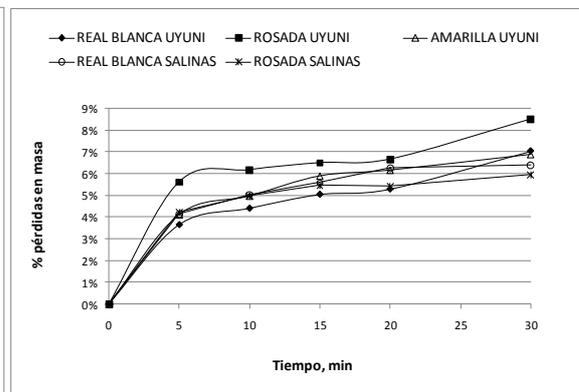
Determinadas las condiciones óptimas de proceso y con el objetivo de establecer la cinética de la remoción de saponinas, se procedió a realizar corridas experimentales haciendo variar el tiempo de proceso bajo las condiciones óptimas para todos los ecotipos de quinua real adquiridos para el estudio, vale decir: blanca de Uyuni y Salinas de Garci Mendoza; rosada pandela de Uyuni; amarilla de Uyuni y anaranjada Toledo de Salinas de Garci Mendoza.

Las Figuras 17A – 17C ilustran el comportamiento de los diferentes ecotipos en la cinética de la remoción de saponinas (A), el porcentaje de pérdidas de masa (B) y la concentración de saponinas (C). Se pueden observar los siguientes comportamientos:

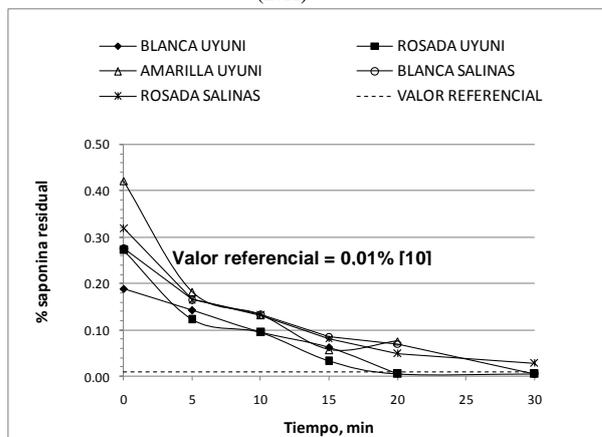
- Tanto la remoción de saponinas como la pérdida de masa ocurren a mayor velocidad durante los primeros 5 minutos. La velocidad de remoción disminuye paulatinamente en minutos posteriores. Este aspecto puede explicarse por la fragilidad de la capa externa del epispermo donde se concentra la saponina. Las capas interiores son lisas y más compactas.
- Entre los ecotipos tratados, las más resistentes a la fricción entre granos de quinua son: 1) Toledo (anaranjada) de Salinas de Garci Mendoza; 2) Blanca de Uyuni; 3) Blanca de Salinas de Garci Mendoza; 4) Amarilla de Uyuni y 5) Rosada Pandela de Uyuni en ese orden.
- Todos los ecotipos tratados alcanzaron contenidos de saponinas menores al valor de aceptación del consumidor (< 0,12 %) a los 15 minutos, menores al valor referencial de comercialización de 0,06 % a los 20 minutos y menores al valor reportado por el CPTS (0,01%) [10] a los 30 minutos, excepto el ecotipo Toledo.



(17A)



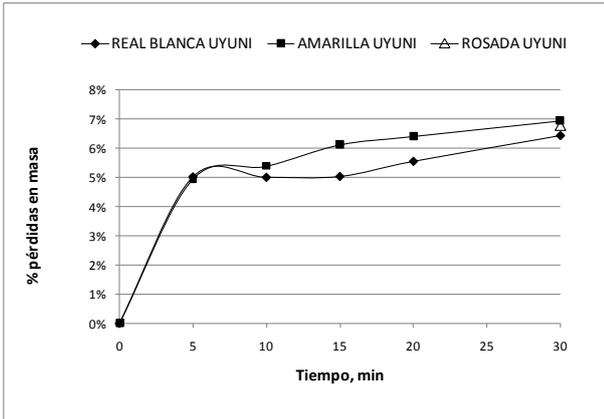
(17B)



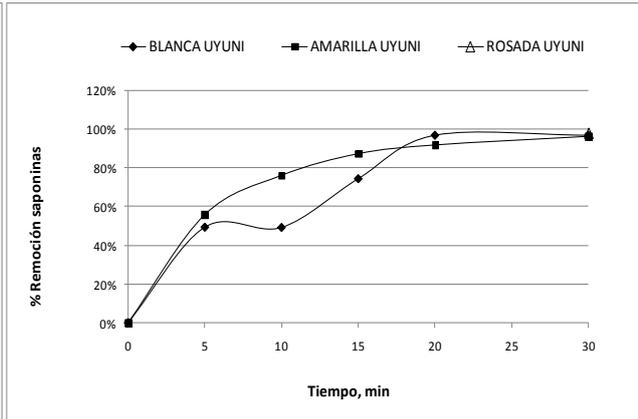
(17C)

**Figura 17** - Comportamiento de la cinética de remoción de saponinas y pérdidas de masa de los distintos ecotipos estudiados.

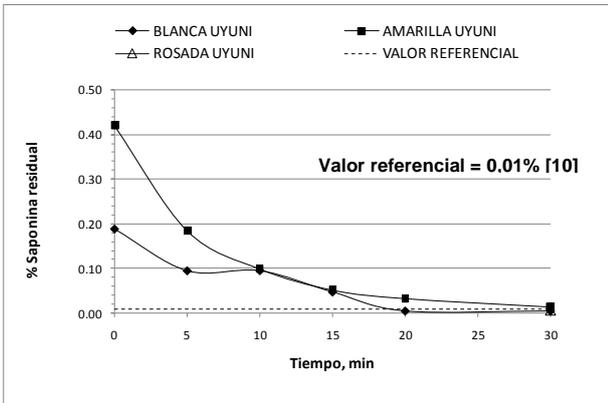
Con el objeto de reducir el tiempo de procesamiento, se procedió a realizar pruebas bajo las condiciones óptimas de diámetro y altura de lecho, pero utilizando una boquilla de 0,9 mm de diámetro. Los resultados se muestran en la Figura 18A – 18C, donde se observa la cinética de remoción de saponinas y las pérdidas de masa para los ecotipos blanca y amarilla de Uyuni. También se presentan los resultados obtenidos a los 30 minutos para el ecotipo real rosada de Uyuni.



(18A)



(18B)

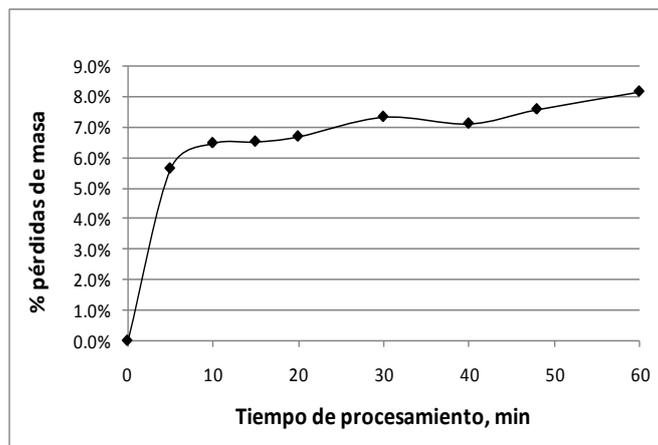


(18C)

**Figura 18** - Comportamiento de la cinética de remoción de saponinas y pérdidas de masa de los ecotipos blanca y amarilla de Uyuni cuando se aplica la boquilla de 0,9 mm de diámetro, 7,5 cm de diámetro de lecho y 12,5 de altura de lecho.

Se observa la remoción efectiva de la saponina a los 15 minutos, logrando valores menores al valor referencial de comercialización (0,06%). Sin embargo, el ecotipo amarilla alcanza el valor referencial del CPTS [10] a los 30 minutos. El incremento de la velocidad de remoción de saponinas y masa del grano, podría deberse a la mayor velocidad lineal (mayor fuerza de impacto entre granos) obtenida con la boquilla de 0,9 mm.

Para estudiar la remoción de masa a mayores tiempos de procesamiento, respetando las condiciones óptimas de proceso, se realizaron pruebas con el ecotipo rosada de Uyuni (la de más fácil remoción de saponinas). Los resultados se muestran en la Figura 19.



**Figura 19** - Comportamiento de la cinética de pérdidas de masa del ecotipo rosada pandela de Uyuni cuando se aplica la boquilla de 1,4 mm de diámetro, 7,5 cm de diámetro de lecho y 12,5 de altura de lecho.

La remoción de masa es más acelerada en los primeros 5 minutos para luego incrementar paulatinamente a partir de los 10 minutos. Según las observaciones realizadas en el microscopio electrónico de barrido (SEM) [11], no se observaron diferencias significativas entre las características morfológicas de la superficie de los granos tratados por periodos de 30 y 60 minutos. Tal resultado es coherente con las pequeñas diferencias de pérdida de masa observadas en la Figura 19.

Finalmente, una vez determinadas las condiciones óptimas de procesamiento, se verificaron el porcentaje de remoción de saponinas, el porcentaje residual de saponinas y el porcentaje de pérdidas de masa, cuando se aplica el proceso a una mezcla de ecotipos de quinua real de proporciones típicamente utilizadas por las empresas beneficiadoras consultadas (50% de blanca, 40% de rosada y 10% de amarilla). Los resultados se presentan en la Tabla 3.

**TABLA 3 - DESEMPEÑO DEL PROCESO APLICADO A MEZCLAS TÍPICAS DE ECOTIPOS DE QUINUA REAL, BAJO CONDICIONES ÓPTIMAS**

Ecotipo	Masa [g]	Composición Mezcla [%]	Porcentaje Saponinas en Grano Inicial [%]	Porcentaje Saponinas en Grano Mezcla (*) [%]	Masa Residual [g]	Pérdidas Masa [%]	Porcentaje Saponinas en Grano Final [%]	Remoción Saponinas [%]
Blanca	175	50	0,188	0,245	327,02	6,57%	0,000	100,0
Rosada	140	40	0,272					
Amarilla	35	10	0,420					
<b>Total</b>	<b>350</b>	<b>100</b>						

(\*) Cálculo basado en las concentraciones individuales de cada ecotipo.

Se puede observar que la remoción de saponinas es completa y el valor de las pérdidas de masa está dentro del intervalo de valores observados para los diferentes ecotipos sometidos a las mismas condiciones de proceso (6 a 7 %). Estos resultados confirman la idoneidad del proceso cuando es aplicado a mezclas típicas de ecotipos de quinua real

### 3.3 Desempeño del prototipo piloto

Se realizaron pruebas de desempeño en el prototipo piloto, que básicamente es un lecho de sección rectangular de 10 cm de ancho por 40 cm de alto y 40 cm de largo, con una sección angular en la parte inferior donde están instaladas las boquillas con una distancia entre ejes de 10 cm, Figura 20. Se utilizaron 4 boquillas de 0,9 mm de diámetro, con el objeto de facilitar la medición de los flujos volumétricos (mayores diámetros de boquilla requieren mayores flujos que salen fuera del intervalo de medición del rotámetro (0 - 100 Lmin<sup>-1</sup>). Se probaron con dos ecotipos de quinua real: blanca y amarilla. Los resultados de desempeño en la remoción de saponinas, contenido residual de saponinas, porcentaje de pérdidas de masa, además de las condiciones de operación y consumo específico de energía, se muestran en la Tablas 4 y 5.

**TABLA 4- DESEMPEÑO DEL PROTOTIPO PILOTO EN LA REMOCIÓN DE SAPONINAS**

Corrida N°	Ecotipo	Tiempo [min]	Masa [kg]	Masa Residual [kg]	Porcentaje Pérdidas [%]	Flujo por Boquilla [L/min]	Presión Manométrica [kg/cm <sup>2</sup> ]	Energía por Unidad Masa [kWh/kg]	Porcentaje Saponinas Grano [%]	Porcentaje Remoción Saponinas [%]
1	Blanca	20	2,000	1,900	5,00	18	6,6	0,435	0,030	85,71
2	Blanca	30	1,950	1,830	6,15	18	6,6	0,637	0,010	95,24
3	Amarilla	25	2,000	1,880	6,00	18	6,6	0,528	0,030	88,00
4	Amarilla	30	2,000	1,875	6,25	18,25	6,7	0,621	0,010	96,00



**Figura 20-** Prototipo de lecho fluidizado de tipo surtidor de acero inoxidable.

**TABLA 5 - CÁLCULO DEL CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGÍA**

Corrida N°	Flujo Aire [Lmin <sup>-1</sup> ]	Tiempo Proceso [min]	Tiempo Recarga de Compresor [min]	Potencia Eléctrica Compresor [kW]	Energía Consumida [kWh]	Masa Quinoa Procesada [kg]	Energía por Unidad Masa [kWh/kg]	Energía por Unidad Masa [kWh/ton]
1	72	20	14	3,725	0,869	2,000	0,435	435
2	72	30	20	3,725	1,304	1,950	0,637	637
3	72	30	20	3,725	1,242	2,000	0,621	621
4	73	30	20	3,725	1,242	2,000	0,621	621

Los resultados de las corridas indican que se obtienen excelentes remociones de saponina en tiempos de proceso de 30 minutos, logrando valores más bajos que el valor requerido para la comercialización (0,06 %) e iguales al valor referencial reportado por el CPTS (0,01 %).

Las pérdidas de masa son un poco menores que las registradas en las pruebas de laboratorio realizadas bajo condiciones óptimas (diámetro de boquilla = 1,4 mm; diámetro de lecho = 7,5 cm; altura de lecho = 12,5 cm). La razón de esta diferencia consiste en que la altura de lecho es aproximadamente 8,5 cm para una masa de 2,00 kg de carga y el ancho entre paredes laterales es 10 cm (menor al diámetro óptimo). Según lo observado en los resultados del diseño experimental, la tendencia es que se presentan menores pérdidas de masa en diámetros de lecho mayores y alturas de lecho menores, Tabla 1.

Por otra parte, el consumo específico de energía disminuye en comparación al registrado para las condiciones óptimas (0,621 vs. 1,259 kWh/kg).

A la luz de estos resultados se puede afirmar que el desempeño de remoción de saponinas del prototipo piloto de paredes planas y sección rectangular es similar a la del lecho de sección circular operado bajo las condiciones óptimas, siendo más ventajoso en cuanto se refiere al consumo específico de energía.

#### 4. CONCLUSIONES

##### Características del lecho fluidizado de tipo surtidor

- Cuanto mayor es la altura del lecho (mayor carga de quinua) los flujos volumétricos y las velocidades lineales necesarios para generar el surtidor (flujo máximo), para establecer un lecho fluidizado estable y apropiado para la desaponificación y el flujo mínimo de aire en el cual el lecho colapsa, se incrementan.
- Las velocidades lineales necesarias para establecer los flujos máximos y mínimos, son un orden de magnitud mayor a las que se generan en lechos de remoción de capas externas de otro tipo de semillas.

##### Remoción de saponinas - Análisis de resultados del diseño experimental

- Los factores más preponderantes sobre la remoción de saponinas, son el diámetro del lecho y el diámetro de la boquilla, seguidos del ecotipo. La altura de lecho con  $P > 0,05$  tiene muy poco efecto y podría no considerarse como parte del diseño factorial.
- Se obtienen menores concentraciones de saponinas de los dos ecotipos estudiados (todos por debajo del valor aceptable para el consumo humano para quinuas beneficiadas), cuando se procesan las quinuas en el lecho de diámetro más pequeño con la boquilla de diámetro más pequeño y con la mayor altura de lecho. Por otra parte, la Quinua Real Blanca se procesa mejor que la Quinua Real Amarilla.
- Se alcanzan valores de saponinas mínimos (0 - 0,02%) en los intervalos de 1,4 a 1,8 mm para el diámetro de boquilla y 7,5 a 12,5 cm para el diámetro de lecho y una altura de lecho de 12,5 cm. Por consiguiente, para el diseño del prototipo piloto se tomaron en cuenta estos rangos de valores.
- Ninguno de los factores estudiados: diámetro de boquilla, diámetro de lecho, altura de lecho y ecotipo, tiene un efecto significativo sobre el porcentaje de proteínas a un nivel de confianza de 95 %.
- El porcentaje de proteínas en los granos se incrementa con la remoción de saponinas.
- Las fuerzas de choque entre granos de quinua en el surtidor son más intensas debido a las mayores velocidades lineales producidas en el surtidor ( $160$  a  $290 \text{ ms}^{-1}$ ) con la boquilla de 1,4 mm, en comparación de las velocidades producidas por la boquilla de 3,4 mm ( $70$  –  $160 \text{ ms}^{-1}$ ), ocasionando remociones mayores de la primera capa dura y frágil del epispermo que es la que contiene la saponina.
- El proceso de desaponificación no es homogéneo cuando las muestras se tratan en el reactor grande y usando la boquilla de mayor diámetro (3,4 mm). Por el contrario, muestras tratadas en el reactor pequeño y usando boquillas de menor diámetro (1,4 mm) tienen una muy buena remoción de la capa externa, llegando a niveles de saponina por debajo del valor aceptable para el consumo (0,12 %).
- El consumo unitario de energía eléctrica es alto cuando se utiliza un compresor comercial a pistón.
- Las saponinas extraídas durante la desaponificación se recuperan en su totalidad.

##### Cinética del proceso en condiciones óptimas

- En general, tanto la remoción de saponinas como la pérdida de masa ocurren a mayor velocidad durante los primeros 5 minutos. La velocidad de remoción disminuye paulatinamente en minutos posteriores. Este aspecto puede explicarse por la fragilidad de la capa externa del epispermo donde se concentra la saponina. Las capas interiores son lisas y más compactas [11].
- Dentro de los ecotipos tratados, las más resistentes a la fricción entre granos de quinua son: (1) Toledo (Anaranjada) de Salinas de G. Mendoza; (2) Blanca de Uyuni; (3) Blanca de Salinas de G. Mendoza; (4) Amarilla de Uyuni y (5) Rosada (Pandela) de Uyuni.
- Todas los ecotipos tratados alcanzaron contenidos de saponinas menores al valor de aceptación del consumidor ( $< 0,12\%$ ) a los 15 minutos, menores al valor referencial de comercialización de  $0,06\%$  a los 20 minutos y menores al valor reportado por el CPTS ( $0,01\%$ ) a los 30 minutos, excepto el ecotipo Toledo.
- Las mezclas de quinua real (blanca, rosada y amarilla) en las proporciones porcentuales más comunes (50%, 40% y 10%, respectivamente), son tratadas eficazmente por el lecho de tipo surtidor, logrando la eliminación completa de las saponinas, bajo las condiciones óptimas determinadas en este estudio.

### Desempeño del prototipo piloto

- Se obtienen excelentes remociones de saponina en tiempos de proceso de 30 minutos, logrando valores más bajos que el valor requerido para la comercialización (0,06 %) e iguales al valor referencial indicado por el CPTS (0,01 %).
- El consumo específico de energía disminuye en comparación al registrado para las condiciones óptimas (0,621 vs. 1,259 kWh/kg).
- El desempeño de remoción de saponinas del prototipo piloto de paredes planas y sección rectangular es similar al del lecho de sección circular operado bajo las condiciones óptimas.

Como conclusión general se puede afirmar que la configuración del lecho fluidizado de tipo surtidor que no utiliza agua, es idónea para la remoción de saponinas de diferentes ecotipos y variedades de quinua amarga en escala de laboratorio.

### 5. AGRADECIMIENTOS

El presente estudio corresponde a la 1ª Fase de Investigación del Informe final: “Proyecto de prefactibilidad para un proceso de beneficiado en seco de variedades amargas de quinua, basado en la aplicación de un lecho fluidizado de tipo surtidor”, que fue realizado con financiamiento otorgado por la Embajada de Dinamarca a través del Programa de Investigaciones Estratégicas en Bolivia (PIEB) en el marco de la Convocatoria: “Formulación de Propuestas para la Producción Sostenible de Quinua en Oruro y Potosí”

Los autores agradecen al PIEB por la continua retroalimentación técnica-científica recibida durante la ejecución del estudio. Asimismo, agradecen la valiosa ayuda de Nicolas Casanovas, Lizeth Orosco, Mauricio Obando y Eliana Garrón, estudiantes de la Carrera de Ingeniería de la Producción de la UPB, quienes trabajaron en la realización de las corridas experimentales.

### 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] M. J. Koziol. “Chemical Composition and Nutritional Evaluation of Quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.)” *Journal of Food Composition and Analysis*, vol. 5, pp. 35-68, 1992.
- [2] N. T. Ahamed et al. “A lesser-known grain, *Chenopodium quinoa*: Review of the chemical composition of its edible parts,” in *Food and Nutritional Bulletin*, vol. 19, pp. 61-71, 1998.
- [3] R. Repo-Carrasco et al. “Valor Nutricional y Usos de la Quinua (*Chenopodium quinoa*) y de la Kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*)” Internet: <http://www.scribd.com/doc/12412360/Valor-Nutricional-y-Usos-de-La-Quinua-y-la-Kaniwa> [27 Septiembre 2010].
- [4] J. Ruales. “Development of an infant food from quinoa *Chenopodium quinoa* Wild, Technological aspects and nutritional consequences.” Doctoral Thesis, University of Lund, Sweden, 1992.
- [5] INE Bolivia. “Estadísticas Internacionales. Comercio Exterior de Bolivia.” Internet: <http://www.ine.gob.bo:8082/comex/Main>. [30 de Septiembre de 2010].
- [6] R. Miranda. “Caracterización Agromorfológica de 685 Acciones de Quinua (*Chenopodium quinoa* Willdenow) Pertenecientes al Banco de Germoplasma de Granos Altoandinos del CIBREF – UTO en el CEAC.” Tesis de Grado, Universidad Técnica de Oruro, Bolivia, 2010.
- [7] S. Villacorta y V. Talavera. *Anatomía del Grano de Quinua (*Chenopodium Quinoa* Wild.)*. Anales Científicos UNA, vol. 14, pp. 39-45, 1976.
- [8] O. Guglu-Ustundag and G. Mazza. “Saponins: Properties, Applications and Processing.” *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 47, pp. 231–258, 2007.
- [9] Kuljanabhadgavad T. and Wink M., *Biological activities and chemistry of saponins from *Chenopodium quinoa* Wild.* *Phytochem Rev.*, 8, pp. 473–490, 2009.
- [10] Centro de Promoción de Tecnologías Sostenibles (CPTS) Tecnología para el beneficiado de quinua. Internet: <http://www.cpts.org/tecquinua/Tecquinua.pdf>. 2004. [10 Junio 2009].
- [11] C. Quiroga et al. *Informe final -Proyecto de prefactibilidad para un proceso de beneficiado en seco de variedades amargas de quinua, basado en la aplicación de un lecho fluidizado de tipo surtidor.* Convocatoria: “Formulación de Propuestas para la Producción Sostenible de Quinua en Oruro y Potosí (PIEB)”, pp. 31-34, 2010.