

Escalado y dimensionamiento de una planta piloto para la producción de un extracto acuoso de *Chuquiraga jussieui* J.F Gmel

Scale up and design of a pilot plant to produce an aqueous extract of Chuquiraga jussieui J.F Gmel

MSc. Alex Dueñas-Rivadeneira^I, aduenas@utm.edu.ec, MSc. Ulbio Alcívar-Cedeño^I,
MSc. Ely Sacon-Vera^{II}, PhD Neibis Casdolo^{III}, PhD. Gretel Villanueva-Ramos^{III}

^IDepartamento de Procesos Agroindustriales. Universidad Técnica de Manabí, Manabí, Ecuador;

^{II}Carrera de Agroindustrias. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí, Ecuador,

^{III}Facultad de Ingeniería Química Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Santa Clara, Cuba

Resumen

El objetivo del presente trabajo es dimensionar el equipamiento de una planta piloto destinada a la producción de un extracto acuoso de la especie vegetal *Chuquiraga jussieui* J.F Gmel autóctona del Ecuador que será utilizado como materia prima principal en la producción de bebidas funcionales con actividad antioxidante. Se establece mediante un estudio de mercado el consumo promedio y la demanda potencial de las bebidas funcionales en Manabí, Ecuador, además se definen las etapas del proceso a nivel de laboratorio, se analiza la estabilidad del extracto acuoso mediante el método de estabilidad acelerada, se confecciona el diagrama de flujo y esquema tecnológico para el procesamiento y posteriormente se realiza el escalado y selección del equipamiento a escala piloto. Los resultados obtenidos demuestran que existe un mercado potencial para el consumo de bebidas funcionales que requieren para su elaboración 46 litros de extracto acuosodiaris, se establecen las etapas del proceso a nivel de laboratorio y se define que el extracto acuoso presenta una estabilidad de 30 días a 4 grados Celsius, además se determina que la principal operación dentro del proceso es la operación de extracción sólido líquido y se realiza el escalado de la misma hasta el nivel requerido usando los criterios de similitud geométrica y potencia por unidad de Volumen constante.

Palabras clave: diseño tecnológico, bebidas funcionales, *chuquiraga jussieui*, escalado.

Abstract

The objective of this work is to design a pilot plant for the production of an aqueous extract of *Chuquiraga jussieui* J.F Gmel native species of Ecuador that will be used as the main raw material to produce functional beverages with antioxidant activity. The average consumption and the potential of functional beverages in Manabí Ecuador are set by a market study. After process steps were defined at laboratory level, the stability of the aqueous extract at three temperatures and three times is analyzed by accelerated stability method, the flowchart and technological scheme for processing is constructed and then the scaling and selection of pilot scale equipment is performed. The results show that a potential market for functional drinks consumption for processing 1400 liters daily exists, the process steps are set at the laboratory and is defined that the aqueous extract has a stability of 30 days at 4 Celsius degrees, because the main operation in process is the solid-liquid extraction and the main equipment used for this

is a mixing tank, it was scale up usinggeometric similarity and mixing power per volumeconstant criteria.

Keywords: *technological design, functional beverages. Chuquiraga jussieui, scale up*

Introducción

Las bebidas funcionales están destinadas a proteger y dar bienestar a los consumidores y actualmente es una tendencia de mercado, al dejar un poco de lado las bebidas tradicionales tales como gaseosas o jugos de origen sintético, aunque las características sensoriales no sean tan agradables como las de las bebidas tradicionales. La aplicación de diferentes métodos de extracción de metabolitos presentes en materias primas vegetales es cada vez más aplicada por la ciencia y al utilizarlos en la formulación de bebidas darán valor adicional a las mismas. La importancia de los compuestos polifenólicos y su demostrada efectividad como agentes antioxidantes es considerada como un aporte en la nutrición de las personas, actualmente es recomendado ingerir vino tinto por sus efectos bondadosos con el sistema cardiovascular, sin embargo debe considerarse que el contenido de alcohol pudiera afectar el organismo [9]. La especie *Chuquiraga jussieui* es altamente consumida en el Ecuador por sus propiedades medicinales y en otros estudios se ha demostrado que es rica en compuestos fenólicos [7] y que posee actividad antioxidante[6] además de que su seguridad ha sido probada [8] todo esto permite que pueda ser utilizada como materia prima para la elaboración de una bebida funcional sin alcohol para todo público y aportar significativamente a mejorar la calidad de vida de personas que padecen diferentes patologías y disminuir el envejecimiento y stress oxidativo.

Para el diseño de una planta piloto de bebidas funcionales es fundamental determinar la estabilidad del producto, ya que en base a esto se establecerá si el proceso es continuo o discontinuo. Además conocer la demanda que existe en el mercado y en base a esta información establecer el volumen de producción, así como definir las etapas del proceso a nivel de laboratorio, estudiar las mismas calcular las dimensiones de la planta que será utilizada para la producción piloto, por lo que el objetivo del presente trabajo es dimensionar el equipamiento de una planta piloto destinada a la producción de un extracto acuoso de la especie vegetal *Chuquiraga jussieui* J.F Gmel

autóctona del Ecuador que será utilizado como materia prima principal en la producción de bebidas funcionales con actividad antioxidante.

Fundamentación teórica

Las bebidas funcionales tienen origen a partir de la concepción de alimentos funcionales, que a pesar de no tener una definición ni estructura claramente dilucidada, se establece que a partir de la ingesta de ciertos alimentos o bebidas estos contienen metabolitos que causarán un efecto en beneficio del consumidor en pro de su salud y calidad de vida, estos alimentos o bebidas pueden haber sido mezclados o potencializados con otros agentes de diferentes características, y se consideran nutraceuticos [5]. A las bebidas funcionales que actualmente se encuentran en el mercado con actividad antioxidante se les atribuyen propiedades que mejoran el sistema cardiovascular protegiendo el corazón, contribuyen al fortalecimiento del sistema inmunológico y mejoran la digestión y la salud de las articulaciones, entre otras.

Antes de comenzar el desarrollo de un proceso es necesario conocer la demanda existente del producto, muchas veces existe una gama amplia de productos, sobre todo si se trabaja con sustancias naturales y se abren grandes posibilidades de desarrollo de procesos, antes de decidir por uno o varios es necesario conocer la demanda previendo su posible aumento o disminución. Este aspecto permitirá dedicar las fuerzas en un momento dado a un proceso, teniendo una reserva de otros a los que se pudiera dedicar un estudio posterior. El estudio de mercados describe una estructura para conocer el mercado objetivo, con la finalidad de establecer la oportunidad de que un producto entre al mercado [12]. Se debe realizar una investigación de mercado para la elaboración de un plan de inversión, es decir, indagar sobre la demanda y oferta de determinado producto. Uno de los objetivos primordiales es determinar la cantidad de bienes y servicios que se van a ofrecer provenientes de una nueva unidad de producción y que la sociedad estaría dispuesta a adquirir a determinados precios [4].

Para un nuevo producto además de conocer la demanda, es importante tener en cuenta sus requerimientos de pureza y estabilidad. La estabilidad de los productos naturales es fundamental, pues la composición de la materia prima

puede variar, sin embargo para comercializar un producto, es necesario que éste tenga bien definidas sus especificaciones finales, esta es una de las principales dificultades al procesar productos naturales. La estabilidad es el tiempo en el cual un producto mantiene las propiedades y características que poseía en el momento de su elaboración, según las condiciones y el periodo de almacenamiento, estas propiedades son las características organolépticas, microbiológicas y los parámetros físicos y químicos que permitirán determinar el periodo de caducidad y las condiciones a las que se debe almacenar para posteriormente ser comercializado[10].

Una vez decidido el desarrollo de un proceso se parte de una extracción optimizada en el laboratorio, esto no se hace de forma continua, si no que se optimizan cada una de las etapas por separado. Esto por supuesto lleva a que el próximo paso sea diseñar una planta piloto que conforme el concepto de proceso y servir de base a una producción que permita ajustes del proceso así como pruebas de aceptación del producto. El ir de una etapa a otra viene dado por el factor de escalado que depende de la operación unitaria que se escala así como de la capacidad de la planta [2].

El escalado es el método de diseño más antiguo que existe y consiste en el desarrollo de una secuencia de trabajos experimentales en los que el sistema se somete a estudios en aparatos de dimensiones cada vez mayores. Cuando en dos etapas sucesivas se reproducen resultados satisfactorios, se considera que se puede proceder al diseño del equipo a escala industrial sin mayores riesgos, siempre que el cambio de escala se encuentre dentro de los límites tolerables. El problema del escalado está en encontrar precisamente, el factor que involucra la razón de las dimensiones lineales del modelo y el prototipo. La verdad sobre el escalado es casi imposible de encontrar, pues la verdadera similitud no existe. Es necesario combinar diferentes técnicas que van desde el análisis matemático, hasta la comparación de las correlaciones existentes de los resultados obtenidos cuando se realiza un intento de escalado. Para proceder al diseño por escalado, es de suma importancia que el cambio de escala sea el mayor posible, ya que el costo de los experimentos es directamente proporcional al tamaño de los aparatos. Sin embargo, el factor de escala a utilizar depende en gran medida de la naturaleza del sistema y del conocimiento que se tenga del mismo [1].

Cuando la operación fundamental del proceso es el mezclado, se tiene en cuenta el procedimiento para el escalado de tanques agitados. Para desarrollar el escalado de equipos es necesario tener en cuenta principios de similitud, estos pueden considerarse como:

- Similitud geométrica.
- Similitud mecánica y cinemática.
- Similitud térmica.
- Similitud química

La similitud geométrica es la primera que debe tenerse en cuenta, esta requiere que los sistemas tengan la misma forma. Dos cuerpos son geoméricamente similares, cuando sus dimensiones guardan una relación de escala modelo-prototipo. En principio, la similitud geométrica es fácil de ejecutar, simplemente porque se basa en un modelo al cual se le conoce su forma y geometría, parámetros que en el prototipo deben ser similares, especialmente si la razón de escalado es grande.

Los parámetros más importantes a considerar en el escalado de los sistemas de mezclado son los que se reportan en la tabla 1. Estos deben permanecer constantes entre el modelo y el prototipo [11].

Tabla 1
Parámetros más usados para el escalado de sistemas de mezclado

Parámetros	Ecuación
Potencia / volumen	$P \cdot N^3 \cdot D^5 / V$
Torque / volumen	$N^2 \cdot D^5 / V$
Número de Reynolds	$N \cdot D^2 \cdot \rho / \mu$
Número de Froude	$N^2 \cdot D / g$
Flujo	$N \cdot a \cdot N \cdot D \rho$
Número de Weber	$\rho \cdot N^2 \cdot D^3 / \sigma$
Número de mezclado	N
Velocidad de cizallamiento	$\pi \cdot N \cdot D$

El criterio de potencia del agitador por unidad de volumen constantees apropiado cuando la tarea fundamental del agitador es el mezclado del líquido. Se considera que este es el criterio de escalado más usado sobre todo en procesos controlados por carga.

A partir de este criterio se puede mantener constante la turbulencia en la descarga del agitador, sin embargo, trae como consecuencia una disminución en la velocidad rotacional del agitador con el consecuente incremento en el tiempo de circulación total, aunque la velocidad de cizallamiento se incrementa. También la capacidad total de bombeo por unidad de volumen disminuye. Por otra parte el número de Reynolds se incrementa con el volumen escalado acorde a P/V constante. Se reporta además, que la turbulencia generada en la pared disminuye considerablemente con el incremento del tamaño del recipiente a partir de este criterio.

Materiales y métodos

La materia prima utilizada es la *Chuquiraga jussieui* J.F Gmel, especie vegetal autóctona de Ecuador, la que será utilizada en la producción de un extracto acuoso el cual servirá de materia prima para la elaboración de bebidas funcionales.

Para establecer la disposición de ingerir bebidas funcionales que tengan como ingrediente principal la *Chuquiraga jussieui* J.F Gmel se realizó un estudio de mercado tomando la población de las tres ciudades más pobladas de la Provincia de Manabí Ecuador, las cuales fueron Portoviejo 280 029 hab. Manta 226 477 hab. y Bahía de Caraquez 57159 hab. Para determinar la muestra y población se utilizan los datos del Censo Nacional del Ecuador 2014, con el fin de que los resultados que se obtengan se encuentren dentro de los parámetros de confiabilidad aceptables para validar el presente estudio. Para el cálculo del tamaño de la

muestra se utiliza la ecuación (1):

$$n = \frac{z^2 \times P \times Q \times N}{(N - 1) \times E^2 \times Z^2 \times P \times Q} \quad (1)$$

Una vez determinado el tamaño de la muestra a encuestar, se procede a definir el consumo promedio, y la demanda potencial lo que permitirá fijar la producción de la futura planta piloto.

Definición de las etapas del proceso

A partir de resultados experimentales obtenidos en trabajos anteriores se definen las etapas que conforman el proceso de obtención del extracto acuoso de *Chuquiraga jussieui* J.F Gmel que va a servir como materia prima para la producción de bebidas funcionales y se confeccionan el Diagrama de Flujo que fue usado en las pruebas a nivel de laboratorio.

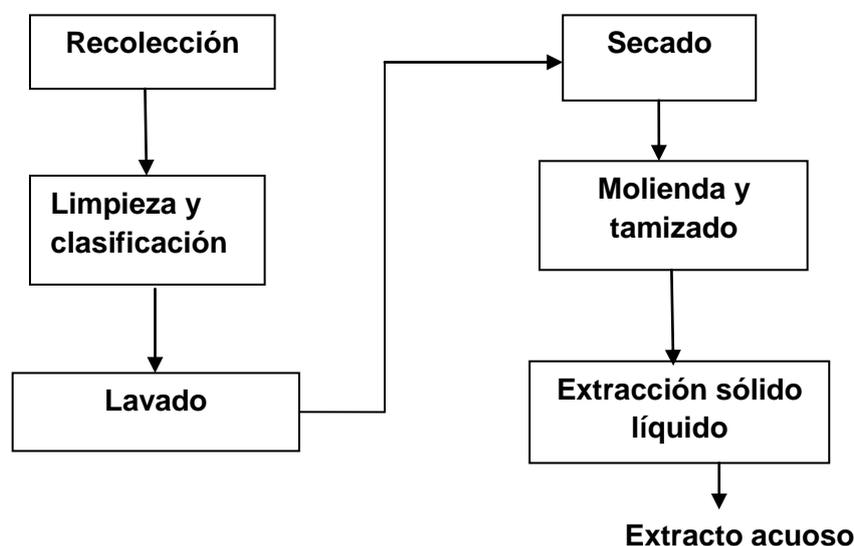


Fig.1 Proceso de obtención de extracto acuoso de *Chuquiraga jussieui* en el laboratorio.

Utilizando el procedimiento que se muestra en la figura 1 donde ya son fijados los parámetros de extracción que serán utilizados a escalas superiores, se obtuvo el extracto acuoso al que se evaluó la estabilidad acelerada mediante la prueba de estante a temperaturas de 4, 20 y 32 °C y 15, 30 y 45 días, en todos los casos la humedad relativa del aire se mantuvo en 75 %. Los parámetros a evaluar fueron control organoléptico, control físico, y control químico. Para el control organoléptico se evaluó el color, olor y aspecto, en el control físico se midieron el pH, y la viscosidad. El control químico se realizó determinando el contenido fenólico mediante el método de Folin Ciocalteu.

Después de fijada la producción diaria de la futura planta piloto, el escalado del extractor se realiza sobre la base del estudio realizado en el volumen de un litro. Del modelo se obtienen los siguientes datos usados en pruebas de laboratorio.

Tabla 2
Datos del equipo de laboratorio

Volumen total (Vt)	1 L
Volumen efectivo (v)	0,430 L
Diámetro del Mezclador (Dr)	0,115 m
Diámetro del impelente (D= 0,5.Dr)	0,075 m
Velocidad de agitación (N)	60rpm
Altura total del tanque (H)	0,144 m
Altura de llenado del tanque (h)	0,053 m
Temperatura del sistema de mezclado (Tr)	40 °C
Temperatura del medio de intercambio (Tm)	80 °C
Reynold (Re)	34,410
Potencia del agitador (P = Np.ρ.N3.D5)	0,04 X10 ⁻³ W

Para el escalado se siguieron los siguientes criterios:

1. Similitud geométrica. (2)

$$D' / D'r = D / Dr = (V't' / vt) ^{1/3} \quad (2)$$

2. Criterio P / V constante (3)

$$(P/v) = (P' / v') \quad (3)$$

Por último se seleccionan los equipos auxiliares del proceso y se definen las corrientes de trabajo a nivel piloto.

Resultados y discusión

La determinación de la muestra para realizar las encuestas del estudio de mercado se realiza utilizando la ecuación (1), se trabaja con el 95 % de confianza (z=1,96) y con un error muestral máximo admisible del 5 % dado que las probabilidades de éxito y fracaso estadísticamente son de 50%. El valor de la muestra fue de 400 personas, las que fueron encuestadas y el 72,25% respondió positivamente, demostrando que existe una tendencia de consumo para este tipo de bebidas. Al considerar la frecuencia del consumo de bebidas funcionales por las personas encuestadas se determina que satisfaciendo a un 5% de la población encuestada la cantidad producción requerida es de 1409 L, por lo que la planta piloto procesadora de bebidas funcionales se calcula para producir 46L de extracto que una vez formulada la bebida permita fabricar 1400 L de producto final.

De acuerdo al esquema establecido en la figura 1 la descripción de las etapas se enuncia a continuación:

Recepción de la materia prima: se realiza la recepción de las partes aéreas de la especie vegetal, tallos hojas y flores.

Limpieza y clasificación: se seleccionan las hojas y las flores que van a entrar en proceso y se retiran los tallos.

Lavado: se lava el material vegetal con abundante agua potable en una relación de 1 L de agua por kg de planta, y se retira el residuo obtenido del lavado

Secado: el material vegetal se lleva al secadero a 40 °C hasta alcanzar una humedad de 11%.

Molienda y tamizado: el material vegetal seco se pasa por un molino de cuchillas de alta velocidad acoplado a un tamiz de 3mm de espesor con el fin de reducir y homogenizar el tamaño de partícula.

Extracción de sólido-liquido: el material vegetal pulverizado es llevado a un baño termostatzado con temperatura y agitación controlada y se adiciona agua tratada por osmosis inversa, en trabajos anteriores quedó definido que las variables que influyeron principalmente en el proceso de lixiviación fueron el tiempo de contacto entre las fases de 45 min y una relación sólido disolvente de 1 g de sólido /10 mL de disolvente.

Filtración y envasado. se realiza el proceso de filtración utilizando filtración al vacío y se procede a realizar el envasado en envases plásticos de polietileno.

Estabilidad. Los resultados de los parámetros organolépticos, físicos y químicos de la estabilidad acelerada mediante la prueba de estante del extracto acuoso se presentan en la tabla 3.

Tabla 3
Resultados del estudio de estabilidad acelerada de extracto acuoso de
Chuquiragajussieui

CONTROL	PARÁMETROS	CONDICIÓN	TIEMPO		
			15 DÍAS	30 DÍAS	45 DÍAS
ORGANOLÉPTICOS	COLOR	4 °C	Verde Oscuro	Verde Oscuro	Verde Oscuro
		20 °C	Verde Oscuro	Verde Oscuro	Verde amarillento
		32 °C	Verde Oscuro	Verde Amarillento	Verde pálido
	OLOR	4 °C	Herbal amargo	Herbal amargo	Herbal amargo
		20 °C	Herbal amargo	Herbal amargo	Herbal acido
		32 °C	Herbal amargo	Herbal acido	deteriorado
	ASPECTO	4 °C	Líquido Verde Oscuro	Líquido Verde Oscuro	Líquido Verde Oscuro
		20 °C	Líquido Verde Oscuro	Líquido Verde Oscuro	Líquido Verde amarillento
		32 °C	Líquido Verde Oscuro	Líquido Verde Amarillento	Líquido Verde pálido
FÍSICOS	pH	4 °C	6,04	6,04	6,02
		20 °C	6,04	5,98	5,86
		32 °C	6,04	5,5	5,02
	VISCOSIDAD (Pa.s .10 ⁶)	4 °C	1400	1400	1440
		20 °C	1150	1220	1220
		32 °C	915	930	930
QUÍMICO	CONTENIDO FENÓLICO (mg de ácido gálico equivalentes/g de sólido)	4 °C	760	760	700
		20 °C	760	650	400
		32 °C	660	460	300

Con estos resultados se establece que el producto debe ser almacenado a 4° C por un periodo de hasta 30 días sin que se alteren sus características y pueda ser utilizado en la elaboración de bebidas funcionales.

Escalado del proceso

Como se planteó anteriormente, la producción de bebidas funcionales será de 1400 L diarios para lo que se requieren 46 L de extracto, lo que implica la necesidad de utilizar un extractor con una capacidad de 100 L

Tabla 4
Datos del prototipo

Volumen total (Vt)	100 L
Volumen efectivo (v)	60 L
Diámetro del Mezclador (Dr)	0,45 m
Diámetro del impelente (D= 0.5.Dr)	0,30 m
Velocidad de agitación (N)	16rpm
Altura total del tanque (H)	0,5m
Altura de llenado del tanque (h)	0,375 m
Temperatura del sistema de mezclado (Tr)	40 °C
Temperatura del medio de intercambio (Tm)	80 °C
Reynold (Re)	17.546
Potencia del agitador (P = Np.ρ.N3.D5)	5,581 X10 ⁻³ W

A partir de estos resultados y el criterio de aplicación de análisis de proceso de escalado [3] se confecciona el diagrama de flujo del proceso y se selecciona el equipamiento necesario para la planta piloto que a continuación se muestran en las figura 2 y 3.

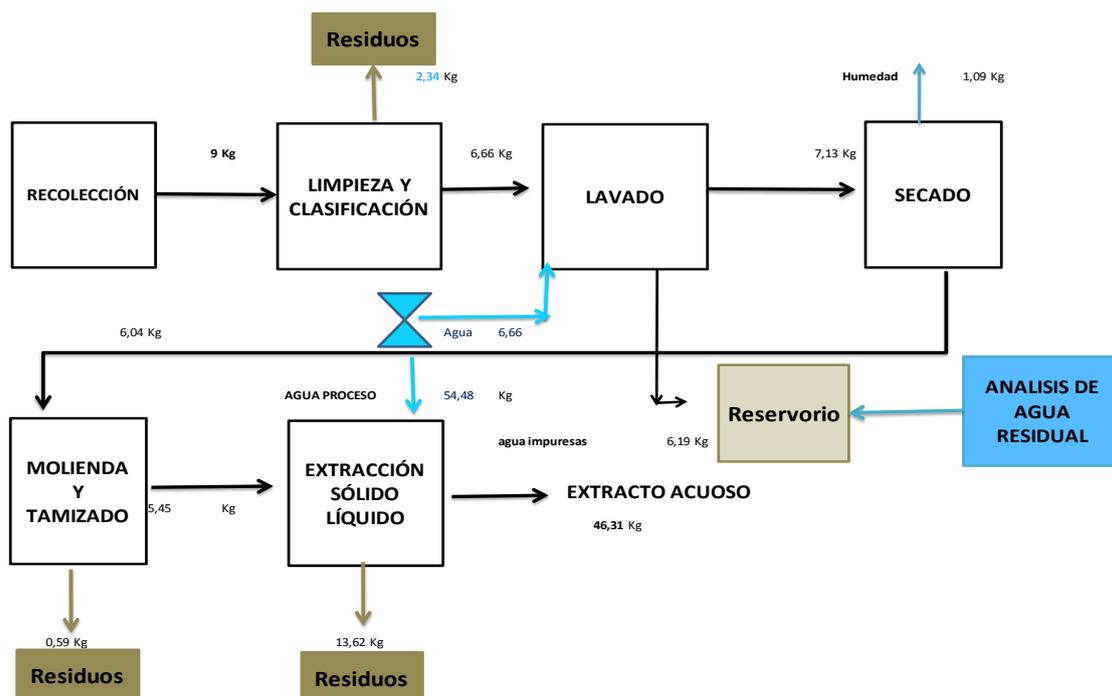


Fig. 2 Proceso de Obtención de extracto acuoso de *Chuquiraga jussieui* a escala piloto.

La selección del equipamiento que será utilizado en la planta piloto se refiere a partir del Esquema Tecnológico que aparece en la figura 3.

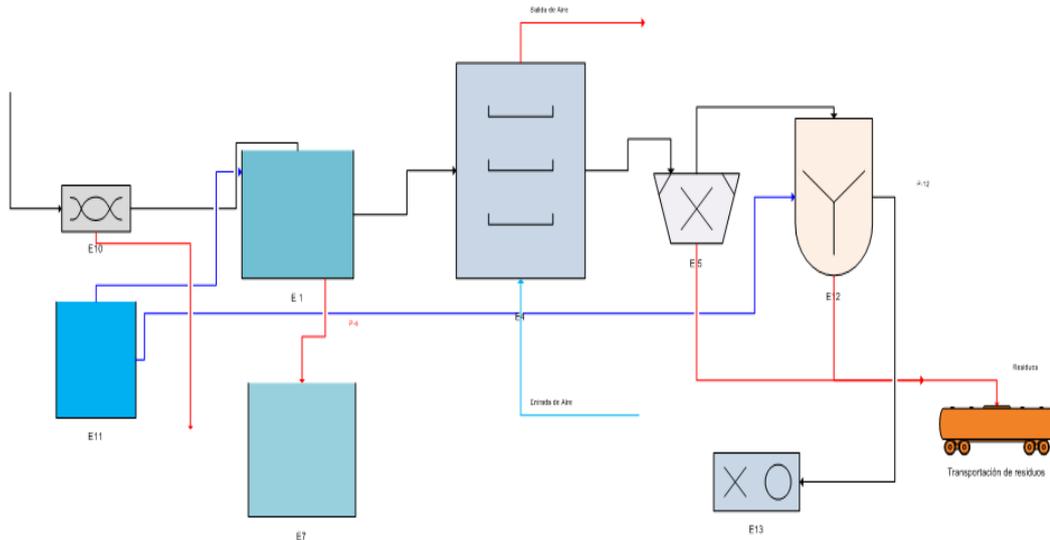


Fig. 3 Equipamiento para la producción de extracto acuoso de *Chuquiraga jussieui* J.F.Gmel.

Lista de equipamiento	
Texto mostrado	Descripción
E-1	Tanque de Lavado
E-10	Mesa de Clasificación
E-11	Tanque de Agua
E-12	Tanque Mezclado
E-13	Envasado
E-4	Secadero
E-5	Molino de Cuchillas
E-7	Tanque Agua R

Conclusiones

1. Existe un mercado potencial para el consumo de bebidas funcionales para producir 1400 litros diarios para lo que se requieren 46 L de extracto Acuoso de *Chuquiraga jussieui* J.F. Gmel.
2. El extracto acuoso presenta una estabilidad de 30 días almacenado a 4 °C.
3. La principal operación dentro del proceso de obtención del extracto acuoso a escalar es la operación de extracción sólido líquido por lo

que se utiliza el criterio de potencia del agitador por unidad de volumen constante.

- 4. Las dimensiones del extractor de planta piloto son: Volumen total 100 L, Volumen efectivo 60 L, diámetro del mezclador 0,45 m, diámetro del impelente 0,30 m, velocidad de agitación 16rpm y altura total del tanque 0,5m.**
- 5. La planta piloto una vez puesta en funcionamiento podrá ser usada en la evaluación final del producto.**

Nomenclatura

n = Tamaño de la muestra

Z = Nivel de confianza

P = Probabilidad de que el proyecto tenga éxito

Q = Probabilidad de que el proyecto no tenga éxito

N = Universo poblacional

E = Error muestral

Bibliografía

1. BIRD, R. Fenómenos de Transporte. Departamento de Ing. Química, Universidad Wisconsin, Editorial Reverté. España 1992.
2. BISSIO, A. Scaleup of chemical processes: Conversion from laboratory scale test to successful commercial size design". Wiley-Interscience, USA. 1985, 698 p.
3. CAÑIZARES, T. Aplicación del análisis de proceso al escalado del reactor G-0./ Tania Cañizares Domínguez. - TGC; UCLV; Cuba Tesis Doctoral. 1997.
4. CORDOVA, A. "Introducción a la Investigación por Muestreo"; prólogo Dr. Leslie Kish. Séptima edición, CEDATOS Ecuador 2006.
5. DE COCK P; CLAIRE-LISE B. "Erythritol. bunctionality in noncaloric functional beverages". Pure and Applied Chemistry. USA. 2009. Volume 74, Issue 7, págs.. 1281–1289, ISSN (Online) 1365-3075
6. DUEÑAS, A et al. "Toxicidad aguda del extracto hidroalcohólico de la planta Chuquiraga jussieui administrado vía oral en ratas". 2013. La Técnica. Ecuador. N°. 10, junio-diciembre 2013. pp. 12-17
7. DUEÑAS, A. et al. "Análisis fitoquímico y de seguridad de los extractos de Chuquiraga jussieui J. F. Gmel." Centro Agrícola, Cuba. 2014, Vol. 41 N° 2, p. 79-84.

8. DUEÑAS, A. *et al.* “Efecto antioxidante de la Chuquiraga jussieui J. F. Gmel en el ensayo dehemólisis.”.Medicentro Electrónica. Cuba.2014, Abril-jun, Vol 18, Nº 2
9. GARCIA-SALAS, P. *et al.* “Phenoliccompound-extraction systems for fruit and vegetable samples”. Molecules. Switzerland. 2010, Vol 15, 8813–8826.
- 10.MENNICKENT S. *et al.* “Estudio de la estabilidad química de comprimidos de ácido acetilsalicílico mediante un control de estanterías en farmacias de Concepción, Chile.”Revista Médica de Chile.2002, Vol.130, Nº.4
- 11.JU, L. CHASE, G., “Improve scaleup strategies of bioreactors”. Bioprocess Engineering Journal. Korean. 1992, Vol 8, 49-53.
- 12.RESTREPO, A; RUIZ, F. “Estrategia de producción de mercado y servicios de salud”. Bogota, pág. 55, JAVERIANO, 2001