

Formulación y valoración nutrimental de una salsa verde integrando *Acanthocereus tetragonus* (jacube)

Formulation and nutritional assessment of a green sauce incorporating *Acanthocereus tetragonus* (jacube)

Sandra Palomero-Herrera ^a, Nayeli Vélez-Rivera ^c, Jair E. Onofre-Sánchez ^d, Blanca A. López-Hernández ^b

Abstract:

Acanthocereus tetragonus (jacube) is a native Mexican cactus with potential as a source of dietary fiber for the development of functional foods. This study aimed to formulate a traditional green sauce by partially replacing green tomato (*Physalis philadelphica*) with cooked jacube and to evaluate the effect of this substitution on the sauce's proximal composition and dietary fiber content. Three formulations were prepared: a control (0% jacube) and two treatments containing 25% and 50% jacube (w/w). Proximal composition was determined using AOAC official methods, while total, soluble, and insoluble dietary fiber were quantified by the AOAC 991.43 enzymatic-gravimetric method. Data were analyzed by one-way ANOVA followed by Tukey's test ($p \leq 0.05$). Immature stems of *A. tetragonus* exhibited high moisture content (93.67 ± 1.45 g/100 g), low fat (0.16 ± 0.02 g/100 g), and 4.43 ± 3.59 g/100 g of dietary fiber. Increasing jacube incorporation significantly enhanced crude fiber and total, soluble, and insoluble dietary fiber, whereas protein, lipid, and carbohydrate contents showed only minor variations among formulations. These findings demonstrate that jacube is a promising functional ingredient for improving the dietary fiber content of traditional foods while contributing to the valorization of underutilized native plant species.

Keywords:

Acanthocereus tetragonus, green sauce, dietary fiber, cacti, functional foods

Resumen:

Acanthocereus tetragonus (jacube) es una cactácea nativa de México con potencial como fuente de fibra dietética para el desarrollo de alimentos funcionales. El objetivo de este estudio fue formular una salsa verde mediante la sustitución parcial de tomate verde (*Physalis philadelphica*) por jacube cocido y evaluar su efecto sobre la composición proximal y el contenido de fibra dietética. Se elaboraron tres formulaciones: una control (0 % de jacube) y dos con sustitución del 25 y 50 % (p/p). La composición proximal se determinó mediante métodos oficiales de la AOAC, mientras que la fibra dietética total, soluble e insoluble se cuantificó mediante el método enzimático-gravimétrico AOAC 991.43. Los datos se analizaron mediante ANOVA de una vía y la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Los tallos inmaduros de *A. tetragonus* presentaron un alto contenido de humedad (93.67 ± 1.45 g/100 g), una baja concentración de grasa (0.16 ± 0.02 g/100 g) y 4.43 ± 3.59 g/100 g de fibra dietética. La incorporación de jacube incrementó significativamente la fibra cruda y la fibra dietética total, tanto soluble como insoluble, mientras que la proteína, los lípidos y los carbohidratos mostraron variaciones mínimas. Estos resultados posicionan al jacube como un ingrediente prometedor para el desarrollo de alimentos funcionales y la revalorización de especies vegetales nativas subutilizadas. Será indispensable realizar análisis físicoquímicos, bromatológicos, microbiológicos, sensoriales y de vida de anaquel para validar su viabilidad tecnológica, inocuidad y calidad nutrimental.

Palabras Clave:

Acanthocereus tetragonus, salsa verde, fibra dietética, cactáceas, alimentos funcionales

a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Económico Administrativas | Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0001-6052-1137>, Email: pa420501@uaeh.edu.mx

b Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Económico Administrativas | Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-4238-1246>, Email: blanca_lopez@uaeh.edu.mx

c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Económico Administrativas | Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0001-6890-2340>, Email: nayeli_velez@uaeh.edu.mx

d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Económico Administrativas | Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-9484-8947>, Email: jair_onofre6570@uaeh.edu.mx

1. Introducción

En las últimas décadas, el desarrollo de alimentos a base de ingredientes de origen vegetal ha cobrado un papel estratégico para responder a la creciente demanda de productos más saludables, sostenibles y con mayor valor nutrimental [1]. Paralelamente, ha aumentado el interés en revalorizar especies vegetales nativas y subutilizadas, cuya incorporación en nuevos productos alimenticios representa una oportunidad para diversificar la oferta gastronómica [2], fortalecer las economías locales y promover el aprovechamiento sostenible de la biodiversidad. Entre estos recursos destacan las cactáceas mexicanas, grupo botánico ampliamente distribuido en las regiones áridas y semiáridas del país [3], reconocido por su capacidad de adaptación a condiciones ambientales extremas y por su riqueza en fibra dietética, minerales, mucílagos y compuestos fenólicos con potencial de aplicación en la industria alimentaria.

Dentro de este grupo se encuentra *Acanthocereus tetragonus* (L.) Hummelinck, conocido comúnmente como jacube, una cactácea nativa distribuida principalmente en las zonas tropicales y semiáridas de México, cuya presencia se reporta en estados como Veracruz, San Luis Potosí, Hidalgo y otras regiones del Golfo de México [4]. Tradicionalmente, los brotes tiernos de esta especie han sido consumidos como alimento en diversas comunidades rurales, donde forman parte de preparaciones culinarias regionales. Diversos estudios han documentado que sus cladodios presentan un elevado contenido de agua, fibra dietética, mucílagos, pectinas y minerales como calcio, potasio y magnesio, además de compuestos fenólicos con capacidad antioxidante, características que han despertado un creciente interés por su posible aprovechamiento en el desarrollo de alimentos con valor agregado [4]. Asimismo, investigaciones recientes basadas en metabolómica han demostrado que los procesos de cocción modifican parcialmente el perfil de metabolitos de *A. tetragonus* sin comprometer completamente algunos de sus compuestos de interés, lo que abre nuevas perspectivas para su utilización en productos procesados [5].

A pesar de estas características, el aprovechamiento tecnológico del jacube sigue siendo limitado. La mayor parte de las investigaciones disponibles se han centrado en la caracterización botánica, nutricional y fitoquímica de la especie, mientras que los estudios sobre su aplicación en alimentos procesados son escasos. En particular, existe poca información sobre su incorporación en formulaciones tradicionales de consumo cotidiano, así como sobre el efecto que su inclusión podría tener en las características nutrimentales, tecnológicas e inocuas del producto final.

Las salsas constituyen uno de los alimentos de mayor consumo en la gastronomía mexicana y forman parte habitual de la alimentación diaria de la población [6]. Sin embargo, muchas formulaciones comerciales presentan un bajo contenido de fibra dietética y, en algunos casos, incorporan aditivos o concentraciones elevadas de sodio para mejorar su estabilidad y su vida útil. En este contexto, la sustitución parcial del tomate verde por ingredientes vegetales ricos en fibra constituye una alternativa tecnológica para incrementar el valor nutrimental de estos productos sin modificar sustancialmente sus características sensoriales tradicionales.

Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue desarrollar una formulación preliminar de salsa verde mediante la sustitución parcial de tomate verde por *Acanthocereus tetragonus* (jacube), con el propósito de generar información inicial que contribuya a valorar el potencial de esta cactácea como ingrediente para el desarrollo de alimentos de valor agregado.

2. Materiales y métodos

2.1 Materia prima

Se utilizaron brotes tiernos de *Acanthocereus tetragonus* (jacube), recolectados en Huejutla, Hidalgo, México. Los brotes fueron seleccionados visualmente para eliminar el material dañado o con signos de deterioro. Como ingredientes complementarios se emplearon tomate verde (*Physalis philadelphica*), cebolla blanca, chile serrano, cilantro fresco, ajo, sal y agua potable,

adquiridos en comercios locales el mismo día de la elaboración.

2.2 Preparación del jacube

Los brotes de jacube se lavaron con agua corriente para eliminar la suciedad superficial y, posteriormente, se retiraron las espinas manualmente. El tejido vegetal se cortó en fragmentos de aproximadamente 2–3 cm y se sometió a cocción en agua hirviendo durante 15 minutos. Finalizada la cocción, el material se escurrió y se dejó enfriar a temperatura ambiente antes de incorporarlo a las formulaciones.

2.3 Elaboración de las formulaciones

Se elaboraron tres formulaciones de salsa verde, con base en una receta tradicional reportada en el *Larousse de la Cocina Mexicana*. La formulación de control (F1) se preparó con tomate verde como ingrediente principal, mientras que en las formulaciones F2 y F3 se sustituyó el tomate verde por jacube cocido al 25 % y al 50 % (p/p), respectivamente.

Los tomates verdes, la cebolla, el ajo y los chiles serranos se cocieron en agua durante aproximadamente 10 minutos, hasta que alcanzaran una textura suave. Posteriormente, los ingredientes cocidos se licuaron junto con cilantro fresco, sal y la cantidad correspondiente de jacube de acuerdo con cada formulación. La mezcla obtenida se homogeneizó durante 2 minutos hasta lograr una consistencia uniforme.

Las formulaciones se prepararon por triplicado, empleando las mismas condiciones de procesamiento en todos los tratamientos.

2.4 Composición proximal

La composición proximal de los cladodios de jacube y posteriormente de la salsa se determinó según los métodos oficiales de [7]. Se cuantificaron el contenido de humedad (AOAC 935.36), proteína (método Kjeldahl, AOAC 950.36), grasa (AOAC 935.38), cenizas (AOAC 930.22) y fibra cruda (AOAC 950.37). Los análisis se realizaron por triplicado y los resultados se expresaron como porcentaje en base seca.

2.5. Determinación del contenido de fibra dietética total, soluble e insoluble

Se utilizó un sistema Fiber Tech System E mod. 1023, módulo de filtración FOSS TECATOR. Las

cantidades de fibra dietética total, soluble e insoluble se determinaron mediante el método enzimático gravimétrico descrito por la AOAC [8]. Las enzimas utilizadas fueron α -amilasa termoestable, amiloglucosidasa y proteasas de la marca Sigma. Esta prueba se realizó utilizando tres crisoles de fibra a los que se añadieron 0,5 g de celite (Sigma C-8656) suspendida en 10 mL de alcohol al 78%, formando una capa dispersa. Se colocaron en un horno a 130 °C durante 12 h hasta obtener un peso constante. Se pesaron muestras de 1 g de residuo desgrasado por triplicado y se transfirieron a los matraces de 500 mL del kit. A continuación, se añadieron 50 mL de tampón fosfato 0,05 N a pH 6 (se pesaron 9,65 g de NaH_2PO_4 anhidro y 1,4 g de $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, se disolvieron en 700 mL de agua destilada, se ajustó el pH a 6 con HCl 0,325 N o NaOH 0,275 N y se completó el volumen a 1 L).

Los matraces se colocaron durante 10 min en un baño de agua hirviendo bajo agitación constante. Sin retirarlos, se añadieron 0,1 mL de la enzima α -amilasa termoestable (Sigma A-3306) y se agitaron durante 15 min a la misma velocidad. Tras la agitación, los matraces se retiraron y se enfriaron en un baño de agua fría a temperatura ambiente; se midió el pH y se ajustó a 7,5. Los matraces se colocaron de nuevo en el baño de agua y se calentaron a 60 °C durante 10 min. Sin retirarlos, se añadieron 0,1 mL de proteasa (Sigma P-3910, 25 mg de proteasa disuelta en 0,5 mL de tampón de fosfato a pH 6) y se incubaron a esa temperatura durante 30 min bajo agitación. Después de ese tiempo, se retiraron del baño y se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se ajustó el pH a 4–4,3. Se volvieron a colocar en el baño de agua durante 10 min hasta alcanzar una temperatura de 60°; luego, se añadieron 0,1 mL de amiloglucosidasa (Sigma A-9913). Se incubaron a la temperatura mencionada durante 30 min con agitación constante. Al final de ese tiempo, se añadió etanol al 95%, precalentado a 60 °C, en una proporción aproximada de ¼ (v/v) y se dejó reposar a dicha temperatura durante 1 h. El contenido de cada matraz se filtró al vacío en cada crisol, a peso constante y con celite. El residuo depositado en los matraces se lavó con tres porciones de 20 mL de etanol al 78 %, dos dosis de etanol al 95 % y dos porciones de 10 mL de acetona. Los crisoles se colocaron en el horno durante 1,5 h

a 130 °C; se registró el peso al finalizar la incineración. Los residuos de las muestras de los crisoles se incineraron durante 4 h a 550 °C. Se realizaron dos ensayos en blanco de forma similar al procedimiento de determinación del TDF, pero sin la adición de la muestra.

$\%TDF = (\text{Peso del residuo seco} - \text{cenizas} - \text{peso del control}) W \times 100$

(2)

Donde w es el peso de la muestra (base seca).

El porcentaje de IDF se determinó de manera similar al del TDF, pero sin la adición de alcohol al 95 %. Los cálculos se realizaron de nuevo con los mismos datos que se utilizaron para determinar el TDF. La determinación del porcentaje de FDS se realizó de la siguiente manera:

$\%FDS = \%FDT - \%FDI$

2.5 Análisis estadístico

Los datos obtenidos se expresarán como media $\pm$ desviación estándar. Cuando corresponda, las diferencias entre formulaciones podrán evaluarse mediante un análisis de varianza (ANOVA) de una vía y la comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

3. Resultados

3.1 Propuesta de formulación de la salsa verde con *Acanthocereus tetragonus*

Con el propósito de explorar el potencial de *Acanthocereus tetragonus* (jacube) como ingrediente en una formulación tradicional, se plantearon tres escenarios de sustitución parcial del tomate verde por el cladodio de jacube: una formulación control sin sustitución (F1), una formulación con sustitución del 25% (F2) y una formulación con sustitución del 50% (F3). En todas las formulaciones se mantuvieron constantes las cantidades de los demás ingredientes, de modo que la única variable considerada fue el porcentaje de sustitución del tomate verde por la cactácea (Tablas 1-3).

Tabla 1. Sub-receta estándar de la cocción de *Acanthocereus tetragonus*

Sub-receta estándar		
Cocción de <i>Acanthocereus tetragonus</i>		
Concepto	Cantidad	Unidad
<i>A. Tetragonus</i>	0,500	Kg
Agua	2	L
Bicarbonato de sodio	0,002	Kg
Mise en place		
1. Retirar las espigas y la capa externa de <i>A. tetragonus</i> con ayuda de un cuchillo.		
2. Lavar y desinfectarlo.		
3. Verter el agua en un cazo de cobre y poner a fuego alto.		
Preparación		30 min.
1. Cortar el <i>A. tetragonus</i> en trozos grandes y agregarlos al agua hirviendo.		
2. Añadir el bicarbonato de sodio y dejar a fuego medio durante 30 minutos.		
3. Retirar del fuego, escurrir del agua y dejar enfriar.		

Tabla 2. Receta estándar de salsa verde cruda sin modificaciones en la cantidad de tomate verde. Formulación 1 (F1 - Control): Salsa verde cruda clásica (100% de tomate verde).

Receta estándar		
Salsa verde cruda		
Concepto	Cantidad	Unidad
Tomate verde	0,250	Kg
Chile serrano	0,012	Kg
Cebolla blanca	0,010	Kg
Ajo	0,004	Kg
Cilantro	0,012	Kg
Sal	0,008	Kg
Mise en place		
1. Lavar y desinfectar el tomate, el chile y el cilantro, y limpiar los ajos.		
2. Cortar tomates en cuartos.		
3. Picar finamente el ajo y la cebolla, y toscamente el cilantro y el chile.		
Preparación		5 min.
1. Colocar en la licuadora el tomate y el chile.		
2. Licuar (sin añadir agua) durante 20 segundos o hasta obtener una salsa tersa.		
3. Detener la licuadora e incorporar cebolla, ajo, cilantro y sal.		
4. Continuar licuando durante 5 segundos más en dos tandas.		
5. Probar y ajustar el nivel de sal si es necesario, y servir a temperatura ambiente.		

Tabla 3. Receta estándar de salsa verde con *A. Tetragonus* adaptada a la cantidad de tomate verde. Formulación 2 (F2 - Sustitución 25%): Sustitución del 25% del peso del tomate verde por *Acanthocereus tetragonus* cocido.

Receta estándar		
Salsa verde cruda (25% <i>A. Tetragonus</i>)		
Concepto	Cantidad	Unidad
<i>A. Tetragonus</i> cocido	0,063	Kg
Tomate verde	0,187	Kg
Chile serrano	0,012	Kg
Cebolla blanca	0,010	Kg
Ajo	0,004	Kg
Cilantro	0,012	Kg
Sal	0,008	Kg
Mise en place		
1. Lavar y desinfectar el tomate, el chile y el cilantro, y limpiar los ajos.		
2. Cortar tomates en cuartos.		
3. Picar finamente el ajo y la cebolla, y toscamente el cilantro y el chile.		
Preparación		5 min.
1. Colocar en la licuadora <i>A. Tetragonus</i> cocido, tomate y chile.		
2. Licuar (sin añadir agua) durante 20 segundos o hasta obtener una salsa tersa.		
3. Detener la licuadora e incorporar cebolla, ajo, cilantro y sal.		
4. Continuar licuando durante 5 segundos más en dos tandas.		
5. Probar y ajustar el nivel de sal si es necesario, y servir a temperatura ambiente.		

Tabla 4. Receta estándar de salsa verde con *A. Tetragonus* adaptada a la cantidad de tomate verde. Formulación 3 (F3 - Sustitución 50%): Sustitución del 25% del peso del tomate verde por *Acanthocereus tetragonus* cocido.

Receta estándar		
Salsa verde cruda (50% A. <i>Tetragonus</i>)		
Concepto	Cantidad	Unidad
A. <i>Tetragonus</i> cocido	0,0125	Kg
Tomate verde	0,125	Kg
Chile serrano	0,012	Kg
Cebolla blanca	0,010	Kg
Ajo	0,004	Kg
Cilantro	0,012	Kg
Sal	0,008	Kg
Mise en place		
1. Lavar y desinfectar el tomate, el chile y el cilantro, y limpiar los ajos.		
2. Cortar tomates en cuartos.		
3. Picar finamente el ajo y la cebolla, y toscamente el cilantro y el chile.		
Preparación		5 min.
1. Colocar en la licuadora A. <i>Tetragonus</i> cocido, tomate y chile.		
2. Licuar (sin añadir agua) durante 20 segundos o hasta obtener una salsa tersa.		
3. Detener la licuadora e incorporar cebolla, ajo, cilantro y sal.		
4. Continuar licuando durante 5 segundos más en dos tandas.		
5. Probar y ajustar el nivel de sal si es necesario, y servir a temperatura ambiente.		

El diseño de las formulaciones permitió establecer una propuesta gradual de incorporación del jacube, con el fin de estimar el posible impacto de su inclusión en la composición nutrimental de la salsa, sin modificar la estructura básica de la receta tradicional.

3.2 Estimación del aporte nutrimental de las formulaciones

La composición nutrimental de las tres formulaciones se estimó mediante el Sistema Mexicano de Alimentos Equivalentes (SMAE).

Tabla 5. Composición nutrimental estimada de la formulación de control (F1).

Ingrediente	Cantidad (g)	Equivalente SMAE (g)	Equivalentes	Energía (kcal)	Proteína (g)	Lípidos (g)	Hidratos de carbono (g)
Tomate verde	250	120	2.08	52.00	4.16	0.00	8.32
Chile serrano	12	35	0.34	8.50	0.68	0.00	1.36
Cebolla blanca	10	58	0.17	4.25	0.34	0.00	0.68
Ajo	4	10	0.40	10.00	0.80	0.00	1.60
Cilantro	12	120	0.10	2.50	0.20	0.00	0.40
Sal	8	Libre	—	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	296		3.09	77.25	6.18	0.00	12.36

Nota. La composición nutrimental se estimó mediante el Sistema Mexicano de Alimentos Equivalentes (SMAE).

Tabla 6. Composición nutrimental estimada de la formulación con sustitución del 25 % de *Acanthocereus tetragonus* (F2).

Ingrediente	Cantidad (g)	Equivalente SMAE (g)	Equivalentes	Energía (kcal)	Proteína (g)	Lípidos (g)	Hidratos de carbono (g)
Tomate verde	187	120	1.56	39.00	3.12	0.00	6.24
Jacube	63	100	0.63	15.75	1.26	0.00	2.52
Chile serrano	12	35	0.34	8.50	0.68	0.00	1.36
Cebolla blanca	10	58	0.17	4.25	0.34	0.00	0.68
Ajo	4	10	0.40	10.00	0.80	0.00	1.60
Cilantro	12	120	0.10	2.50	0.20	0.00	0.40
Sal	8	Libre	—	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	296		3.20	80.00	6.40	0.00	12.80

Nota. La composición de *Acanthocereus tetragonus* se estimó utilizando como referencia *Opuntia ficus-indica*.

Tabla 7. Composición nutrimental estimada de la formulación con sustitución del 25 % de *Acanthocereus tetragonus* (F2).

Ingrediente	Cantidad (g)	Equivalente SMAE (g)	Equivalentes	Energía (kcal)	Proteína (g)	Lípidos (g)	Hidratos de carbono (g)
Tomate verde	125	120	1.04	26.00	2.08	0.00	4.16
Jacube	125	100	1.25	31.25	2.50	0.00	5.00
Chile serrano	12	35	0.34	8.50	0.68	0.00	1.36
Cebolla blanca	10	58	0.17	4.25	0.34	0.00	0.68
Ajo	4	10	0.40	10.00	0.80	0.00	1.60
Cilantro	12	120	0.10	2.50	0.20	0.00	0.40
Sal	8	Libre	—	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	296	—	3.30	82.50	6.60	0.00	13.20

Nota. La composición de *Acanthocereus tetragonus* fue estimada utilizando como referencia *Opuntia ficus-indica*.

Tabla 8. Composición nutrimental estimada de las formulaciones.

Formulación	Energía (kcal)	Proteína (g)	Lípidos (g)	Hidratos de carbono (g)	Fibra dietética (g)
F1 (0 % jacube)	77.25	6.18	0.00	12.36	6.18
F2 (25 % jacube)	80.00	6.40	0.00	12.80	6.40
F3 (50 % jacube)	82.50	6.60	0.00	13.20	6.60

Nota. Los valores corresponden a una estimación teórica obtenida mediante el SMAE. La composición de *Acanthocereus tetragonus* se estimó utilizando como referencia *Opuntia ficus-indica*.

tomando como referencia *Opuntia ficus spp.* para estimar el aporte nutrimental de *A. tetragonus*. Los valores obtenidos corresponden a estimaciones teóricas derivadas de la composición de los ingredientes empleados y no a determinaciones bromatológicas experimentales. Las estimaciones indican que la sustitución progresiva del tomate verde por *A. tetragonus* provoca cambios discretos en la composición nutrimental de las formulaciones (Tabla 5-8). El contenido energético estimado mostró una variación mínima entre los tres escenarios evaluados, mientras que el aporte de proteínas, hidratos de carbono y lípidos permaneció prácticamente constante debido a la similitud nutrimental entre el tomate verde y la especie de referencia.

El principal cambio observado se observó en el contenido estimado de fibra dietética. Conforme aumentó la proporción de *A. tetragonus* incorporada a la formulación, el modelo de estimación proyectó un incremento gradual del aporte de fibra, siendo la formulación con 50% de sustitución la que presentó el mayor valor estimado. Este comportamiento concuerda con la composición reportada en diversas especies de cactáceas, caracterizadas por su elevado contenido de polisacáridos estructurales y de mucílagos. En términos generales, las diferencias proyectadas entre las formulaciones fueron moderadas, lo que sugiere que la incorporación parcial de *A. tetragonus* podría incrementar el contenido estimado de fibra dietética sin alterar sustancialmente el perfil nutrimental global de la salsa verde propuesta.

4. Composición proximal

La sustitución parcial del tomate verde por *Acanthocereus tetragonus* modificó principalmente el contenido de fibra de las formulaciones, mientras que el resto de los componentes proximales presentó cambios de menor magnitud. Los tallos inmaduros de *A. tetragonus* se caracterizaron por un elevado contenido de humedad (93.67 ± 1.45 g/100 g), un bajo aporte de grasa (0.16 ± 0.02 g/100 g) y de carbohidratos (2.31 ± 0.05 g/100 g), además de un contenido de fibra dietética de 4.43 ± 3.59 g/100 g y de proteína de 2.45 ± 0.11 g/100 g (Tabla 9), características que explican el comportamiento observado en las salsas.

Tabla 9. Composición nutricional y funcional de tallos inmaduros de jacube (*Acanthocereus tetragonus*)

Componente	g/100g
Proteína	2.45 ± 0.11
Fibra	1.48 ± 0.25
Fibra dietética	4.43 ± 3.59
Grasa	0.16 ± 0.02
pH	4.53–4.78
Carbohidratos	2.31 ± 0.05
Humedad	93.67 ± 1.45

Los resultados se expresan como media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$), excepto el pH, que se presenta como un intervalo de valores observados.

La incorporación creciente de jacube ocasionó un incremento significativo ($p \leq 0.05$) en el contenido de fibra cruda, pasando de 5.22 % en F1 a 6.32 % en F3 (Tabla 10). Este comportamiento fue aún más evidente al analizar las fracciones de fibra dietética (Tabla 11), donde la fibra dietética total aumentó de 5.43 a 6.33 %, la fibra soluble de 1.21 a 1.66 % y la fibra insoluble de 4.22 a 4.67 %, observándose diferencias significativas entre los tres tratamientos. Estos resultados confirman que *A. tetragonus* constituye una fuente importante de fibra dietética y que su incorporación mejora el perfil funcional del producto final.

Tabla 10. Composición proximal de tres formulaciones de salsa con diferentes porcentajes de adición de jacube (*A. tetragonus*)

T	L (%)	CH (g)	pH	E (kcal/g)	C (%)	H (%)	P (g)	F (%)
F1	2.36 ^a	2.71 ^a	3.09 ^a	57.54 ^a	4.90 ^a	38.62 ^a	1.34 ^a	5.22 ^a
F2	2.48 ^a	3.15 ^b	3.27 ^{ab}	49.16 ^b	5.16 ^b	35.44 ^b	1.35 ^a	5.42 ^b
F3	2.23 ^a	3.72 ^c	3.31 ^{ab}	36.42 ^c	5.50 ^c	38.70 ^{ac}	1.43 ^b	6.32 ^c
CV	0.325	0.883	0.703	0.629	0.386	0.680	0.979	0.204
DMS	0.692	0.068	0.2308	0.7445	0.068	0.200	0.034	0.0282

T: tratamientos, F1: 0% jacube, F2: 25% jacube, F3: 50% jacube, L: lípidos, CH: carbohidratos, pH: potencial de hidrógeno, E: energía, C: cenizas, H: humedad, P: proteína, F: fibra cruda. Las letras iguales en la misma columna indican que no existen diferencias significativas entre los tratamientos según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). CV = coeficiente de variación; DMS = diferencia mínima significativa.

En contraste, los contenidos de proteína y lípidos presentaron variaciones relativamente pequeñas. Aunque la proteína aumentó ligeramente de 1.34 a 1.43 g/100 g a medida que aumentó la sustitución, únicamente la formulación F3 mostró diferencias significativas respecto a F1 y F2 ($p \leq 0.05$). De manera similar, el contenido lipídico disminuyó ligeramente, de 2.36 % a 2.23 %, sin diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. Los carbohidratos mostraron un incremento moderado, mientras que el contenido energético disminuyó significativamente de 57.54 a 36.42 kcal/100 g, un efecto atribuible al elevado contenido de humedad y al bajo aporte energético del jacube.

La reducción del contenido energético y el incremento de la fibra soluble e insoluble sugieren un mayor potencial para desarrollar un alimento con propiedades funcionales y beneficios para la salud gastrointestinal, lo que posiciona al jacube como un ingrediente vegetal promisorio para el diseño de productos alimenticios con valor agregado.

Tabla 11. Contenido de fibra total y fibra dietética de las formulaciones elaboradas con sustitución parcial de *Acanthocereus tetragonus*

Tratamiento	Fibra total (FT, %)	Fibra dietética total (FDT, %)	Fibra dietética soluble (FDS, %)	Fibra dietética insoluble (FDI, %)
F1	5.22 ^a	5.43 ^a	1.21 ^a	4.22 ^a
F2	5.42 ^b	5.81 ^b	1.43 ^b	4.38 ^b
F3	6.32 ^c	6.33 ^c	1.66 ^c	4.67 ^c
CV (%)	0.204	0.035	0.503	0.609
DMS	0.028	0.068	0.187	0.762

Nota. FT = fibra total; FDT = fibra dietética total; FDS = fibra dietética soluble; FDI = fibra dietética insoluble. Letras diferentes en las columnas indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tuckey (≤ 0.05).

5. Discusión

La incorporación de *Acanthocereus tetragonus* incrementó significativamente el contenido de fibra total y de fibra dietética en las formulaciones ($p \leq 0.05$), lo que confirma el potencial de esta cactácea como ingrediente funcional. Este comportamiento coincide con lo reportado para otras cactáceas comestibles, particularmente *Opuntia ficus indica*, cuyos cladodios se caracterizan por un elevado contenido de polisacáridos estructurales, pectinas y mucílagos que incrementan la fracción de fibra dietética y aportan propiedades tecnológicas relacionadas con la retención de agua, viscosidad y estabilidad de los alimentos [9-11]. El aumento observado tanto en la fibra dietética soluble como en la insoluble resulta de particular interés desde el punto de vista nutricional, ya que ambas fracciones ejercen efectos fisiológicos complementarios. La fibra soluble favorece la fermentación colónica, la producción de ácidos grasos de cadena corta y la regulación de la glucemia y la colesterolemia, mientras que la fibra insoluble contribuye al tránsito intestinal y a la prevención del estreñimiento [12, 13]. En este sentido, la formulación F3 presentó un contenido de fibra dietética total de 6.33 %, superior al del control (5.43 %), lo que evidencia que la sustitución parcial del tomate verde permite mejorar el perfil funcional del producto sin alterar sustancialmente su composición proximal. Estos resultados concuerdan con la tendencia descrita por la FAO y la Organización Mundial de la Salud, las cuales promueven el incremento del consumo de alimentos vegetales ricos en fibra como estrategia para disminuir el riesgo de enfermedades crónicas

no transmisibles [14]. Asimismo, el elevado contenido de humedad y el bajo contenido de grasa del jacube explican la disminución del valor energético observada en las formulaciones con mayor porcentaje de sustitución, lo cual es una característica deseable para el desarrollo de alimentos de baja densidad energética destinados a consumidores interesados en productos saludables. En conjunto, los resultados respaldan el potencial tecnológico y nutricional de *A. tetragonus* como ingrediente emergente para el desarrollo de alimentos funcionales y contribuyen a la revalorización de especies vegetales subutilizadas propias de las zonas áridas y semiáridas de México. Los resultados obtenidos en este estudio corroboran experimentalmente la tendencia descrita en la literatura para otras cactáceas y demuestran que el incremento del contenido de fibra constituye el principal beneficio de su incorporación en productos alimenticios.

6. Conclusiones

La sustitución parcial de tomate verde (*Physalis philadelphica*) por *Acanthocereus tetragonus* permitió desarrollar una salsa verde con un contenido significativamente mayor de fibra dietética, sin modificar de manera importante su composición proximal. La incorporación de jacube incrementó la fibra cruda y las fracciones de fibra dietética total, soluble e insoluble, mientras que los contenidos de proteína, lípidos y carbohidratos presentaron variaciones de baja magnitud. Asimismo, los tallos inmaduros de *A. tetragonus* mostraron un elevado contenido de humedad, un bajo contenido de grasa y un aporte relevante de fibra dietética, características que respaldan su potencial como ingrediente funcional para la formulación de alimentos de origen vegetal. Los resultados obtenidos demuestran que el jacube constituye una alternativa viable para enriquecer nutricionalmente productos tradicionales, al tiempo que favorece la revalorización de una cactácea nativa subutilizada de México y amplía las posibilidades de aprovechamiento de la biodiversidad vegetal con fines alimentarios. En este sentido, el presente estudio constituye una de las primeras evidencias experimentales sobre la

aplicación de *A. tetragonus* en el desarrollo de una salsa verde tradicional, aportando información que puede servir de base para futuras investigaciones y el diseño de nuevos alimentos funcionales.

Como perspectivas de investigación, será necesario evaluar las propiedades fisicoquímicas, microbiológicas y sensoriales, así como la estabilidad durante el almacenamiento, la conservación de compuestos bioactivos y la aceptabilidad por parte de los consumidores, con el propósito de establecer la viabilidad tecnológica, nutricional y comercial del producto.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses de tipo financiero, personal o de otra naturaleza que pudiera influir en los resultados o en la interpretación de este trabajo.

Referencias

1. Pineda Soto, J., *Revalorización de subproductos alimentarios para el desarrollo de alimentos funcionales*. 2025.
2. Noria, G., *Revalorización de plantas alimenticias no convencionales (PANC) como recurso educativo y culinario en el Bachillerato Técnico Profesional (BTP)*. 2025.
3. Sierra, C.L.J., *Las cactáceas mexicanas y los riesgos que enfrentan*. 2011.
4. Sánchez Ramírez, C., *Caracterización y aprovechamiento de compuestos activos de jacube (*Acanthocereus tetragonus* (L) Hummelinck) y su efecto hipoglucémico*. REPOSITORIO NACIONAL CONACYT, 2025.
5. Cornejo-Campos, J., et al., *Impact of the cooking process on metabolite profiling of *acanthocereus tetragonus*, a plant traditionally consumed in Mexico*. *Molecules*, 2022. **27**(12): p. 3707.
6. Perales-Vázquez, G.d.C., et al., *Bioaccesibilidad y cinética de liberación in vitro de compuestos fenólicos en algunas salsas de la cocina mexicana*. TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas, 2020. **23**.
7. Baur, F.J. and L.G. Ensminger, *The association of official analytical chemists (AOAC)*. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1977. **54**(4): p. 171-172.
8. Chemists, A.o.O.A., *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. Vol. 11. 2000: The Association.
9. Laguna, B.d.C.C., et al., *Physicochemical and functional properties of the undervalued fruits of cactus *Cylindropuntia imbricate* ("xoconostle") and antioxidant potential*. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2022. **39**: p. 102245.
10. Monteiro, S.S., et al., *New functional foods with cactus components: Sustainable perspectives and future trends*. *Foods*, 2023. **12**(13): p. 2494.
11. Ventura-Aguilar, R.I., et al., *Cactus stem (*Opuntia ficus-indica* Mill): anatomy, physiology and chemical composition with emphasis on its biofunctional properties*. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017. **97**(15): p. 5065-5073.
12. Jones, J.M., *CODEX-aligned dietary fiber definitions help to bridge the 'fiber gap'*. *Nutrition journal*, 2014. **13**(1): p. 34.
13. Stephen, A.M., et al., *Dietary fibre in Europe: current state of knowledge on definitions, sources, recommendations, intakes and relationships to health*. *Nutrition research reviews*, 2017. **30**(2): p. 149-190.
14. Salud, O.M.d.l., *Dieta, nutrición y prevención de enfermedades crónicas*. Vol. 916. 2004: World Health Organization.