

|Formulación y evaluación fisicoquímica de un champú sólido a base de productos apícolas y
meliponícolas

Bramdon Andrés Afanador Puentes y Natalia Lucía Torrado Coronel

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Químico

Modalidad Trabajo de Investigación

Director: José Gabriel López Ortiz

MSc. en Ingeniería Química

Codirector: Débora Alcida Nabarlatz

PhD. en Ingeniería de Procesos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, porque gracias a él todo esto fue posible.

A mis padres, Gloria y Fredy, quienes siempre han estado para mí, brindándome su apoyo incondicional y todo lo necesario para que pudiera culminar esta etapa profesional.

A Jimena, una de las personas más maravillosas que me dejó la universidad, por estar a mi lado de manera incondicional y por motivarme a dar siempre lo mejor de mí.

A mis mejores amigos, Natalia y Juan Manuel, compañeros de aventuras a lo largo de la carrera; y a Natalia, por ser también mi compañera en este proyecto tan importante para mi vida.

Y, finalmente, me lo dedico a mí mismo, por dar mi mayor esfuerzo para sacar adelante esta carrera y este proyecto.

Bramdon Andrés Afanador Puentes

A mis padres, Sandra y Robeiro, quienes con su amor infinito y su apoyo incondicional han sido el cimiento firme sobre el que he construido cada paso de mi vida. Gracias por ser el refugio al que siempre pude regresar cuando las fuerzas me faltaban, por iluminar mis días más oscuros y por cada sacrificio silencioso que hicieron para que mis sueños encontraran camino. Espero que algún día puedan sentirse tan orgullosos de ser mis padres como yo lo estoy, profundamente, de ser su hija.

A mi hermano, Sebastián, con la esperanza de que este logro le recuerde siempre que los sueños no tienen límite. Ojalá pueda ser para ti un ejemplo que te inspire a creer en todo lo que eres capaz de alcanzar.

A mi hijo perruno, Bonny, cuya presencia, incluso en la distancia, llenó mis días con la dosis exacta de amor y me recordó siempre dónde está el hogar.

A la memoria de mi abuelo, Luis, cuyo recuerdo se convirtió en la ola que me impulsó a navegar cuando mi barco comenzaba a hundirse, porque su amor y sus enseñanzas permanecen acompañándome incluso ahora que ya no está aquí.

Y a mí misma, por permanecer cuando rendirse parecía más fácil; por sostenerme en los días de sueño, estrés, tristeza, enojo, felicidad y angustia, pero también llenos de admiración y gratitud. Por seguir de pie, con el corazón lleno de sueños y con las ganas intactas de comerme el mundo.

Natalia Lucía Torrado Coronel

Agradecimientos

A mi director, el profesor José Gabriel, y a mi codirectora, la profesora Débora, por su guía y acompañamiento durante todo este proceso.

A todos los profesores que hicieron parte de mi proceso de formación académica, por sus enseñanzas y aportes, fundamentales en mi desarrollo profesional.

Al Tecnoparque SENA, por sus servicios prestados durante las primeras etapas del proyecto.

A mis compañeros de estudio, por el trabajo colaborativo y el intercambio de conocimientos que contribuyeron a mi formación académica.

Bramdon Andrés Afanador Puentes

A mis padres, Sandra y Robeiro, ojalá pudiera escribir sus nombres en cada página de este trabajo, porque cada una de ellas es, al final, reflejo de lo que soy gracias a ustedes.

A mi director y codirectora, gracias por la oportunidad brindada, así como por sus orientaciones, consejos y apoyo durante la realización de este exigente, pero enriquecedor proyecto.

A mi pareja, Johan, por ser mi compañero incondicional durante esta etapa, por estar presente en cada desvelo y en cada momento de duda. Gracias por ser la calma en medio de la frustración, por escucharme incluso cuando las palabras no alcanzaban y por recordarme, una y otra vez, de lo que soy capaz.

A mis amigos y compañeros de universidad, Bramdon y Malagón, por acompañarme en cada etapa de este camino, por las horas de estudio, las experiencias compartidas y por hacer de este proceso algo más llevadero.

A mi familia de otra sangre: Gabriela, Lizeth, Manuela, Juan José y Stiven, gracias por ser ese espacio de recarga en cada descanso, por su compañía y por recordarme lo sencillo que es ser un amigo leal. De manera especial a Gabriela, mi mejor amiga, gracias por escucharme tanto en la alegría de mis triunfos como en la tristeza de mis derrotas, por acompañarme en cada etapa y por demostrarme que la distancia nunca será más fuerte que nuestra amistad.

Al Tecnoparque SENA, por sus servicios prestados durante las primeras etapas del proyecto.

Finalmente, gracias a todos ustedes, porque, al final, somos el eco de aquellos que creyeron en nosotros antes de que siquiera aprendiéramos a creer en nosotros mismos.

Natalia Lucía Torrado Coronel

Tabla de contenido

Introducción	16
1. Objetivos	17
1.1 Objetivo general.....	17
1.2 Objetivos específicos	17
2. Estado del arte.....	18
3. Metodología	20
3.1 Fase 1. Determinación del Perfil de Calidad deseado del Producto	21
3.1.1 Búsqueda de información técnica y científica	21
3.1.2 Establecimiento de Atributos Críticos de Calidad (CQAs), Materiales Críticos (CMAs) y Parámetros de Proceso (CPPs)	21
3.1.3 Estudios preliminares.....	22
3.1.3.1 Determinación del índice de saponificación.....	22
3.1.3.2 Preparación y saponificación del champú sólido.....	22
3.1.3.3 Evaluación experimental.....	22
3.2. Fase 2. Aplicación del Diseño Experimental.....	26
3.2.1 Diseño experimental	26
3.2.2 Desarrollo experimental.....	27
3.2.3 Análisis estadístico.....	27
4. Resultados	27

4.1 Determinación del Perfil de Calidad deseado del Producto.....	27
4.1.1 Establecimiento de Atributos Críticos de Calidad (CQAs), Materiales Críticos (CMAs) y Parámetros de Proceso (CPPs)	27
4.1.2 Estudios preliminares.....	29
4.1.2.1 Determinación del índice de saponificación.....	29
4.1.2.2 Preparación y saponificación del champú sólido.....	29
4.1.2.3 Evaluación experimental.....	30
4.2 Fase 2. Aplicación del Diseño experimental.....	34
4.2.1 Diseño experimental	34
4.2.2 Desarrollo experimental.....	34
4.2.3 Análisis estadístico.....	34
5. Conclusiones	49
6. Recomendaciones	51
Apéndices.....	62

Lista de Tablas

Tabla 1 Variables de salida evaluadas	23
Tabla 2 Sistema de puntuación del daño capilar en función del pH	25
Tabla 3 Criterios de aceptación del daño capilar según el valor promedio obtenido	26
Tabla 4 Factores y niveles evaluados en el diseño experimental.....	26
Tabla 5 Formulaciones preliminares de champú sólido evaluadas.....	29
Tabla 6 Resultados de la validación experimental de la formulación con mejores condiciones y comparación con los valores predichos por el modelo	47
Tabla 7 Escala de agrietamiento o cracking del champú sólido, expresado en grados....	64
Tabla 8 Materiales críticos (CMAs) y su influencia en los atributos críticos de calidad (CQAs) del champú sólido.....	65
Tabla 9 Índices de saponificación	66
Tabla 10 Rangos porcentuales recomendados para las materias primas en la formulación del champú sólido	66
Tabla 11 Matriz del diseño experimental codificado.....	69
Tabla 12 Análisis de varianza (ANOVA) para la capacidad espumante	73
Tabla 13 Análisis de varianza (ANOVA) para el pH	75
Tabla 14 Análisis de varianza (ANOVA) para el cracking	77
Tabla 15 Análisis de varianza (ANOVA) para la dureza.....	77
Tabla 16 Análisis de varianza (ANOVA) para el daño capilar.....	79
Tabla 17 Parámetros establecidos para las mejores condiciones mediante función de deseabilidad.....	81

Tabla 18 Solución obtenida mediante función de deseabilidad para hallar la formulación con las mejores condiciones..... 81

Tabla 19 Predicción de respuesta múltiple para la formulación con mejores condiciones 81

Lista de Figuras

Figura 1 Diagrama de flujo de la metodología empleada	20
Figura 2 Escala de referencia para la clasificación del daño capilar observada mediante microscopía óptica	24
Figura 3 Ejemplo del procedimiento de clasificación y obtención del promedio del daño capilar.....	25
Figura 4 Escala de aceptabilidad y matriz de selección de las formulaciones preliminares	33
Figura 5 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la capacidad espumante... 35	35
Figura 6 Gráfica de contornos para la capacidad espumante.....	36
Figura 7 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el pH.....	37
Figura 8 Gráfica de contornos para el pH.....	38
Figura 9 Gráfica de superficie para el cracking	40
Figura 10 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la dureza	41
Figura 11 Gráfica de contornos para la dureza	41
Figura 12 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el daño capilar	42
Figura 13 Gráfica de contornos para el daño capilar	43
Figura 14 Gráfico de mejores condiciones mediante función de deseabilidad.....	46
Figura 15 Comportamiento de la capacidad espumante y estabilidad de la espuma en las formulaciones preliminares.....	67
Figura 16 Comportamiento del pH en las formulaciones preliminares	67
Figura 17 Comportamiento del cracking en las formulaciones preliminares	68
Figura 18 Comportamiento de la dureza en las formulaciones preliminares	68

Figura 19 Comportamiento del daño capilar en las formulaciones preliminares	69
Figura 20 Registro fotográfico de las formulaciones preliminares de champú sólido	69
Figura 21 Comportamiento de la capacidad espumante en las formulaciones del DOE. 70	
Figura 22 Comportamiento del pH en las formulaciones del DOE.....	71
Figura 23 Comportamiento de la dureza en las formulaciones del DOE	71
Figura 24 Comportamiento del cracking en las formulaciones del DOE	72
Figura 25 Comportamiento del daño capilar en las formulaciones del DOE	72
Figura 26 Registro fotográfico de las formulaciones del diseño experimental (DOE) ...	73
Figura 27 Gráfica de probabilidad normal de los residuos para la capacidad espumante	74
Figura 28 Gráfica de residuos vs ajustes para la capacidad espumante.....	74
Figura 29 Gráfica de residuos vs orden para la capacidad espumante	74
Figura 30 Gráfica de probabilidad normal de los residuos para el pH	76
Figura 31 Gráfica de residuos vs ajustes para el pH.....	76
Figura 32 Gráfica de residuos vs orden para el pH.....	77
Figura 33 Gráfica de probabilidad normal de los residuos para la dureza	78
Figura 34 Gráfica de residuos vs ajustes para la dureza	78
Figura 35 Gráfica de residuos vs orden para la dureza.....	79
Figura 36 Gráfica de probabilidad normal de los residuos para el daño capilar	80
Figura 37 Gráfica de residuos vs ajustes para el daño capilar	80
Figura 38 Gráfica de residuos vs orden para el daño capilar.....	81
Figura 39 Evidencia microscópica en cabello sano	82
Figura 40 Evidencia microscópica en cabello con daño moderado.....	82
Figura 41 Evidencia microscópica en cabello con daño severo	82

Figura 42 Registro fotográfico de la formulación final 83

Lista de Apéndices

Apéndice A. Determinación del índice de saponificación (ISO 3657:2020).....	62
Apéndice B. Saponificación en caliente para la elaboración del champú sólido.....	63
Apéndice C. Escala de agrietamiento o cracking del champú sólido, expresado en grados	64
Apéndice D. Materiales críticos (CMAs) y su influencia en los atributos críticos de calidad (CQAs) del champú sólido.....	65
Apéndice E. Índices de saponificación	65
Apéndice F. Rangos porcentuales recomendados para las materias primas en la formulación del champú sólido.....	66
Apéndice G. Comportamiento de las variables de salida en las formulaciones preliminares	67
Apéndice H. Registro fotográfico de las formulaciones preliminares de champú sólido	69
Apéndice I. Matriz del diseño experimental codificado	69
Apéndice J. Comportamiento de las variables de salida en las formulaciones del DOE	70
Apéndice K. Registro fotográfico de las formulaciones del diseño experimental (DOE)	72
Apéndice L. Análisis estadístico.....	73
Apéndice M. Evidencia microscópica del daño capilar en las formulaciones evaluadas	82
Apéndice N. Registro fotográfico de la formulación final.....	82

Resumen

Título: Formulación y evaluación fisicoquímica de un champú sólido a base de productos apícolas y meliponícolas*

Autor: Bramdon Andrés Afanador Puentes, Natalia Lucía Torrado Coronel**

Palabras claves: Champú sólido, productos apícolas y meliponícolas, formulación cosmética, saponificación en caliente, diseño experimental, propiedades fisicoquímicas.

Descripción: El diseño de formulaciones cosméticas sólidas a partir de materias primas de origen natural representa un desafío en términos de control de calidad, desempeño funcional y estabilidad del producto. En este contexto, los productos apícolas y meliponícolas emergen como una alternativa de interés debido a sus propiedades bioactivas y su potencial aplicación en el cuidado capilar. El presente estudio aborda la formulación de un champú sólido empleando estos insumos, bajo el enfoque de Quality by Design (QbD), con el propósito de establecer la relación entre variables de formulación, condiciones de proceso y propiedades fisicoquímicas del producto final.

Inicialmente, se definió el perfil de calidad objetivo (QTPP) y se identificaron los atributos críticos de calidad (CQAs), los materiales críticos (CMAs) y los parámetros críticos del proceso (CPPs). La formulación base se desarrolló mediante saponificación en caliente, seguida de la evaluación de propiedades como capacidad espumante, pH, dureza, resistencia al agrietamiento (cracking) y daño capilar. Posteriormente, se implementó un diseño experimental factorial 3^2 para estudiar el efecto de la concentración de NaOH y del contenido de miel sobre las variables de respuesta, empleando análisis de varianza (ANOVA) y superficies de respuesta.

Los resultados evidenciaron que la concentración de NaOH influye significativamente en la dureza, la formación de espuma y el cracking, mientras que la miel contribuye a la reducción del daño capilar. Se identificó una formulación con 8.98 % de NaOH y 4.79 % de miel que presentó un desempeño integral favorable y una deseabilidad global de 0.94.

Finalmente, los resultados experimentales confirmaron la capacidad del modelo estadístico para describir el sistema estudiado, así como la viabilidad de desarrollar un champú sólido sostenible con propiedades funcionales adecuadas, evidenciando la aplicabilidad del enfoque QbD en el diseño de formulaciones cosméticas.

*Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: José Gabriel López Ortiz, MSc. en Ingeniería Química. Codirector: Débora Alcida Nabarlatz, PhD. en Ingeniería de Procesos.

Abstract

Title: Formulation and physicochemical evaluation of a solid shampoo based on bee and meliponicultural products*

Author(s): Brandon Andrés Afanador Puentes, Natalia Lucía Torrado Coronel**

Key Words: Solid shampoo, bee and meliponicultural products, cosmetic formulation, hot saponification, experimental design, physicochemical properties.

Description: The design of solid cosmetic formulations from natural raw materials represents a challenge in terms of quality control, functional performance, and product stability. In this context, apicultural and meliponicultural products emerge as an alternative of interest due to their bioactive properties and potential application in hair care. The present study addresses the formulation of a solid shampoo using these inputs, under the Quality by Design (QbD) approach, with the aim of establishing the relationship between formulation variables, process conditions, and the physicochemical properties of the final product.

Initially, the Quality Target Product Profile (QTPP) was defined, and the Critical Quality Attributes (CQAs), Critical Material Attributes (CMAs), and Critical Process Parameters (CPPs) were identified. The base formulation was developed through hot saponification, followed by the evaluation of properties such as foaming capacity, pH, hardness, resistance to cracking, and hair damage. Subsequently, a 3^2 factorial experimental design was implemented to study the effect of NaOH concentration and honey content on the response variables, using analysis of variance (ANOVA) and response surface methodology.

The results showed that NaOH concentration significantly influences hardness, foam formation, and cracking, while honey contributes to the reduction of hair damage. A formulation containing 8.98% NaOH and 4.79% honey was identified, exhibiting favorable overall performance and a global desirability of 0.94.

Finally, the experimental results confirmed the ability of the statistical model to describe the studied system, as well as the feasibility of developing a sustainable solid shampoo with adequate functional properties, demonstrating the applicability of the QbD approach in the design of cosmetic formulations.

*Degree Work

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: José Gabriel López Ortiz, MSc. in Chemical Engineering. Codirector: Débora Alcida Nabarlatz, PhD. in Process Engineering.

Introducción

El mercado de productos capilares ha experimentado un crecimiento sostenido en las últimas décadas, impulsado por la creciente preocupación ambiental y la demanda de alternativas sostenibles. En este contexto, la industria cosmética ha orientado su desarrollo hacia productos más naturales y ecológicos (Brito y otros, 2023). Dentro de esta tendencia, el champú sólido ha emergido como una opción innovadora frente a los productos convencionales, destacándose por su menor impacto ambiental y la creciente aceptación entre consumidores que buscan opciones más saludables y sostenibles (López Salas , 2023).

No obstante, en el mercado colombiano su adopción aún enfrenta barreras culturales significativas, tales como la preferencia tradicional por champús líquidos (Doria Quintero, 2023), la percepción de menor practicidad y la desconfianza respecto a su efectividad (Luna Cárdenas y otros, 2024).

Simultáneamente, los productos derivados de la apicultura y la meliponicultura poseen propiedades, tales como actividad hidratante, antimicrobiana, regenerativa y fortalecedora (Hernández Gómez y otros, 2023) (Ortiz Quiceno y otros, 2022). Sin embargo, su incorporación en formulaciones capilares sólidas aún representa un desafío técnico.

En consecuencia, surge la necesidad de desarrollar un champú sólido sostenible que integre ingredientes apícolas y melipónicas garantizando sus propiedades fisicoquímicas y funcionales, promoviendo así su adopción en un mercado orientado al consumo consciente. -A partir de lo anterior, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo influye la incorporación de derivados apícolas y melipónicas en las propiedades fisicoquímicas y el comportamiento funcional de un champú sólido formulado por saponificación?

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

- Formular un champú sólido a base de productos apícolas y meliponícolas, mediante la aplicación de la metodología Quality by Design (QbD), considerando propiedades funcionales, estructurales y fisicoquímicas.

1.2 Objetivos específicos

- Aplicar la metodología QbD para definir los atributos críticos de calidad (CQAs), los parámetros críticos del proceso (CPPs) y los materiales críticos (CMAs) que influyen en el desempeño y estabilidad del producto.
- Elaborar prototipos experimentales de champú sólido siguiendo un diseño de experimentos de superficie de respuesta (DOE).
- Seleccionar una formulación a partir del análisis estadístico de los datos obtenidos, estableciendo las condiciones de proceso que maximicen el desempeño funcional y las propiedades fisicoquímicas del producto.
- Caracterizar el prototipo seleccionado mediante análisis fisicoquímicos, estructurales y funcionales que permitan determinar su comportamiento en condiciones de uso y su estabilidad.

2. Estado del arte

El desarrollo de champús sólidos constituye una tendencia creciente en la industria cosmética, impulsada por la reducción del uso de agua y envases plásticos (Brito y otros, 2023), así como por la incorporación de ingredientes naturales con propiedades funcionales. Diversas investigaciones recientes han demostrado la viabilidad de sustituir formulaciones líquidas tradicionales por versiones sólidas, resaltando la importancia de evaluar parámetros fisicoquímicos que garanticen estabilidad y desempeño adecuado del producto.

Gran parte de la literatura actual se centra en formulaciones tipo Syndet (detergentes sintéticos). Por ejemplo, el estudio (Silva de Lima y otros, 2023), se desarrollaron nueve formulaciones de champú sólido a partir de diferentes combinaciones de tensoactivos (*Sodium Cocoyl Isethionate*, *Sodium Coco Sulfate* y *Sodium Lauryl Sulfoacetate*), evaluando estabilidad, capacidad espumante y propiedades estructurales de la barra. Los resultados evidenciaron que la dureza y resistencia al agrietamiento (cracking) son variables críticas que deben mejorarse mediante pruebas fisicoquímicas para asegurar la calidad del producto final.

Asimismo, investigaciones enfocadas en la incorporación de ingredientes naturales, han demostrado que estos pueden modificar el comportamiento fisicoquímico de la matriz sólida. En (Rodríguez Almeida y otros, 2025), se formuló un champú sólido con extracto de *Hibiscus sabdariffa*, evaluando su actividad antioxidante y parámetros fisicoquímicos, evidenciando que la concentración del extracto influye en el sistema. De manera similar, en (Francisco da Costa y otros, 2023) se desarrollaron champús sólidos con pigmentos derivados de *Spirulina*, confirmando que la inclusión de compuestos bioactivos requiere un control adecuado de estabilidad microbiológica y estructural.

En el ámbito terapéutico, en (Cruz Oliveira y otros, 2024) se formuló un champú sólido con acción anticasca empleando sulfato de selenio y aceites esenciales, reforzando la importancia de evaluar estabilidad y comportamiento físico al incorporar ingredientes con alta actividad biológica. Por su parte, en (Jiménez Tamayo y otros, 2024) se desarrolló un champú sólido a base de aceite de *Oenocarpus bataua*, manteca de cacao y *Cinchona officinalis*, mejorando propiedades como espuma y pH mediante diseño experimental.

En paralelo, el interés por ingredientes de origen natural ha impulsado la exploración de derivados apícolas en formulaciones cosméticas. La apicultura, entendida como la crianza, manejo y aprovechamiento productivo de abejas exclusivamente del género *Apis*, principalmente *A. mellifera*, para la obtención de productos como miel, cera, propóleos y jalea real (Acosta Suárez, 2025), representa un importante potencial económico por la calidad de los productos, la aptitud de los predios agrícolas, las características de los ecosistemas y las posibilidades de comercialización, tanto nacional como internacional (Racines Arévalo , 2024). De forma complementaria, la meliponicultura corresponde a la cría o cultivo de abejas sin aguijón de la tribu *Meliponini*, destacándose por su papel en la conservación de especies nativas y la generación de ingresos en comunidades rurales (Rosso Londoño & Nates Parra, 2013).

Dentro de estos derivados, la miel destaca por su contenido de azúcares higroscópicos y compuestos antioxidantes, los cuales favorecen la retención de humedad, el acondicionamiento capilar y la estabilidad de formulaciones cosméticas, aportando propiedades humectantes relevantes en sistemas sólidos (Wagner Cespedes y otros, 2021). Por su parte, la cera de abejas presenta propiedades emolientes y estructurantes, actuando como agente formador de película y contribuyendo a la cohesión, dureza y resistencia mecánica de formulaciones sólidas, además de favorecer la protección de la fibra capilar frente a la pérdida de humedad (Nong y otros, 2023).

En conjunto, estos estudios evidencian avances significativos en la formulación y caracterización fisicoquímica de champús sólidos, particularmente en lo referente a pH, estabilidad de espuma, dureza y resistencia estructural. No obstante, aún es necesario evaluar de manera integral cómo la incorporación simultánea de derivados apícolas y meliponícolas influye en el desempeño fisicoquímico y estructural de champús sólidos obtenidos mediante procesos de saponificación, con el fin de generar sustento experimental que respalde su aplicación en este tipo de formulaciones capilares.

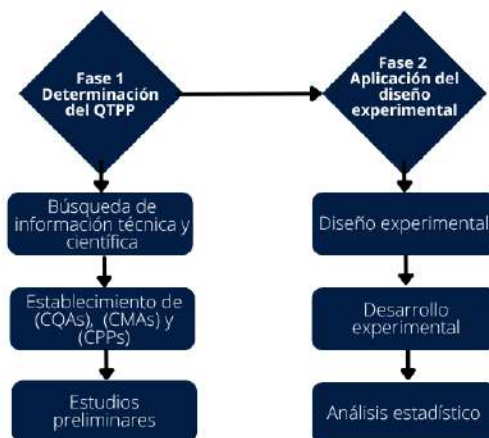
3. Metodología

La metodología orientó al desarrollo de un champú sólido a base de ingredientes naturales y derivados apícolas y meliponícolas, empleando la técnica Quality by Design (QbD) para garantizar la calidad, seguridad, eficacia y reproducibilidad desde el diseño (Khan y otros, 2023).

En la Figura 1 se presenta un esquema de las fases metodológicas desarrolladas.

Figura 1

Diagrama de flujo de la metodología empleada



Para la ejecución de la metodología experimental se utilizó una balanza analítica RADWAG AS 220.R2, un durómetro LX Tire Durometer Type A (ASTM 2240), un pH-metro OHAUS Starter 300 y un microscopio óptico Leica Microsystems DM750.

Asimismo, se emplearon aceites vegetales comerciales: aceite de girasol, aceite de ricino y aceite de coco. Como agentes estructurantes se incorporaron manteca de karité, alcohol cetílico y alcohol cetosteárico y ácido esteárico.

Dentro de los ingredientes naturales se incluyeron miel de abeja angelita y cera de abejas provenientes de mercados locales. Como reactivos químicos se emplearon ácido láctico (Suquin S.A.S., 85% p/p) y una solución de hidróxido de sodio (50 % p/p).

3.1 Fase 1. Determinación del Perfil de Calidad deseado del Producto

3.1.1 Búsqueda de información técnica y científica

Se realizó una revisión técnico-científica de literatura especializada en cosmética natural para identificar ingredientes con propiedades capilar fundamentando el desarrollo y la selección de materias primas, aditivos y parámetros de proceso necesarios para obtener un champú sólido eficaz y seguro.

3.1.2 Establecimiento de Atributos Críticos de Calidad (CQAs), Materiales Críticos (CMAs) y Parámetros de Proceso (CPPs)

Con base en la información recopilada, se definió el Perfil de Calidad del Producto Deseado (QTPP). A partir de este, se establecieron los Atributos Críticos de Calidad (CQAs), los Materiales Críticos (CMAs) y los parámetros de proceso (CPPs) a controlar durante la elaboración (Herrera Hernandez & Rodriguez Rodriguez , 2022).

3.1.3 Estudios preliminares

3.1.3.1 Determinación del índice de saponificación

Las materias grasas empleadas fueron caracterizadas determinando su índice de saponificación (IS), con el fin de establecer la cantidad teórica de hidróxido de sodio requerida para la formulación del champú sólido y verificar que los valores obtenidos se encuentren dentro de los rangos reportados en la literatura. La determinación se realizó conforme a la norma ISO 3657:2020, con adecuaciones, cuyo procedimiento se detalla en el Apéndice A.

3.1.3.2 Preparación y saponificación del champú sólido

Con base en los resultados obtenidos, se elaboraron formulaciones preliminares mediante un proceso de saponificación en caliente, empleando baño María y manteniendo la mezcla a 70–75 °C durante las etapas de fundición y reacción. La fase grasa fundida se mezcló con una solución acuosa de hidróxido de sodio bajo agitación hasta alcanzar el punto de traza; posteriormente, la masa fue moldeada y solidificada a temperatura ambiente en condiciones secas. El procedimiento detallado se presenta en el Apéndice B.

3.1.3.3 Evaluación experimental

Las formulaciones desarrolladas serán evaluadas mediante variables fisicoquímicas, estructurales y funcionales previamente definidas, con el fin de analizar su desempeño inicial y seleccionar una formulación base para la aplicación del diseño experimental en la Fase 2.

Las variables de salida consideradas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1*Variables de salida evaluadas*

Variable	Método	Rango aceptación
Capacidad espumante	Agitación en cilindro ^a	>50 [mL] ^f
pH	pH-metro ^b	4,5-7 ^g
Cracking	Agrietamiento por inmersión ^c	Véase Apéndice C
Dureza	Durómetro Shore A ^d	24-32 [Shore A] ^h
Daño capilar	Microscopía óptica ^e	-

Nota. ^a Basado en (Ihoeghian & Akwara, 2021) (Nagolkar y otros, 2025), ^b Basado en (Jiménez Tamayo y otros, 2024), ^c Basado en (Orellana Martínez , 2019), ^d Conforme a (International Organization for Standardization, 2003), ^e Elaboración propia, ^f Basado en el valor de espuma generado por la marca comercial utilizada como control, ^g Basado en (Huaman CCapcha & Huilca Yapura , 2022), ^h Basado en (Orellana Martínez , 2019).

^e *Lavado:*

Se emplearon mechones de cabello natural con una longitud aproximada de 3 cm. Se preparó una solución de lavado de champú al 5 % (p/p) utilizando agua hasta obtener una dispersión homogénea.

Posteriormente, los mechones de cabello fueron sumergidos en la solución y sometidos a agitación constante a 400 rpm durante 10 minutos, con el fin de simular las condiciones de lavado capilar. Finalizado este proceso, las muestras fueron enjuagadas con agua destilada para eliminar residuos del producto y secadas mediante aire caliente utilizando un secador de cabello hasta alcanzar condiciones secas.

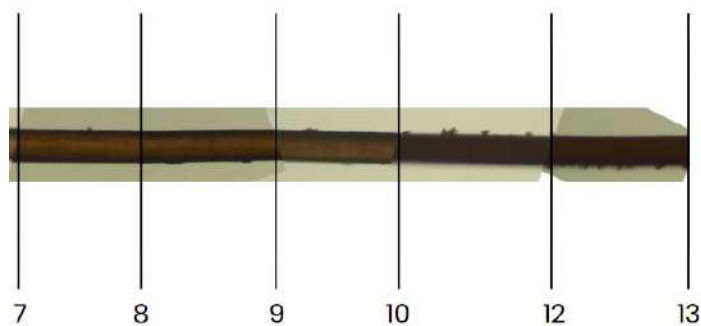
Evaluación y clasificación del daño capilar mediante microscopía óptica:

La clasificación del daño capilar se realizó mediante la observación de fibras de cabello bajo microscopía óptica después de su exposición a las diferentes formulaciones de champú sólido. Cada fibra fue analizada individualmente y documentada visualmente, permitiendo identificar posibles alteraciones estructurales en la superficie de la cutícula, tales como irregularidades o agrietamientos. Con base en estas observaciones, cada fibra fue ubicada en la Figura 2, obteniendo el valor de pH correspondiente según la escala establecida.

La escala presentada en la Figura 2 fue construida mediante el mismo procedimiento de lavado descrito anteriormente, sin embargo, en este caso las fibras capilares no fueron lavadas con soluciones de champú al 5 %, sino con soluciones de NaOH preparadas a diferentes concentraciones, con el fin de simular valores específicos de pH. Las concentraciones de NaOH empleadas fueron 1×10^{-7} , 1×10^{-6} , 1×10^{-5} , 1×10^{-4} y 1×10^{-2} (M) correspondientes a valores de pH de 7, 8, 9, 10 y 12, respectivamente.

Figura 2

Escala de referencia para la clasificación del daño capilar observada mediante microscopía óptica



Posteriormente, cada fibra fue clasificada utilizando el sistema de puntuación basado en el valor de pH, presentado en la Tabla 2. Este sistema asigna un puntaje a cada observación de acuerdo con el nivel de alteración identificado, permitiendo cuantificar el grado de afectación de la fibra capilar.

Tabla 2

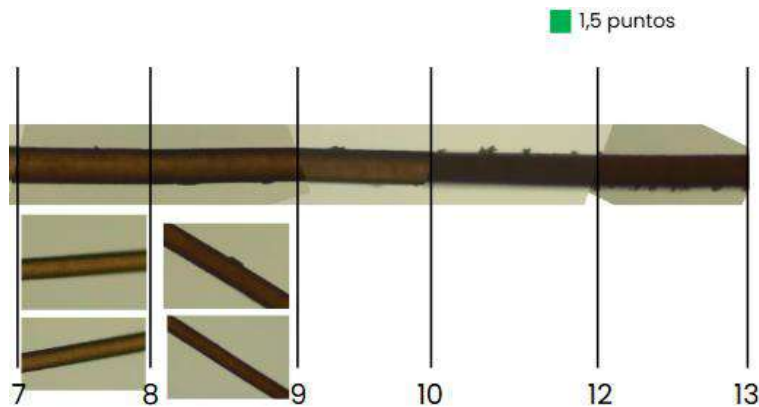
Sistema de puntuación del daño capilar en función del pH

Valor de pH asociado al daño	Puntaje en escala de daño	Interpretación
7	1	Cabello sano
8	2	Daño leve
9	3	Daño notable
10	4	Daño severo
12	6	Daño muy severo

Una vez obtenidos los puntajes individuales, estos fueron promediados para todas las fibras analizadas en cada formulación, con el fin de obtener un valor representativo del comportamiento global del sistema.

Figura 3

Ejemplo del procedimiento de clasificación y obtención del promedio del daño capilar



Finalmente, el valor promedio obtenido fue interpretado de acuerdo con el criterio de aceptación establecido en la Tabla 3.

Tabla 3*Criterios de aceptación del daño capilar según el valor promedio obtenido*

Puntaje	Color	Criterio
<2	Verde	Aceptación
2-2,5	Amarillo	Aceptable con observaciones
>2,5	Rojo	Rechazo

3.2. Fase 2. Aplicación del Diseño Experimental**3.2.1 Diseño experimental**

Para encontrar la formulación del champú sólido con las mejores condiciones, se aplicó un diseño factorial 3², el cual permitió evaluar de manera simultánea el efecto de dos factores críticos y su interacción con las variables de respuesta (Rahul, 2023) (Gutiérrez Liñán, 2017). El diseño incluyó 9 formulaciones principales (3²), incluyendo replicados para garantizar la confiabilidad de los resultados.

Tabla 4*Factores y niveles evaluados en el diseño experimental*

Variable	Niveles (% p/p)		
	-1	0	1
NaOH (lejía)	6.5%	8%	9.5%
Miel	3%	6%	9%

Este diseño permitió identificar la influencia individual y combinada de los factores sobre las propiedades críticas de calidad del champú sólido, sirviendo como base para la etapa posterior de análisis estadístico.

3.2.2 Desarrollo experimental

Se ejecutarán las corridas establecidas en el diseño experimental, elaborando las formulaciones correspondientes bajo las condiciones previamente estandarizadas y evaluándolas mediante las variables definidas en la Fase 1.

3.2.3 Análisis estadístico

El análisis estadístico de los resultados se realizó en Minitab Statistical Software versión 22.1. El modelo fue validado a través de análisis de varianza (ANOVA), pruebas de significancia, coeficientes de determinación (R^2 ajustado y R^2 predicho) y análisis de residuos (Minitab, s.f.).

La formulación con mejores condiciones se encontró mediante superficies de respuesta y función de deseabilidad, obteniéndose la formulación en triplicado y aceptando una desviación menor al 10 %. Para esta formulación de mejores condiciones se evaluaron todas las variables de salidas definidas para asegurar que cumple con los criterios de desempeño y calidad establecidos.

4. Resultados

4.1 Determinación del Perfil de Calidad deseado del Producto

4.1.1 Establecimiento de Atributos Críticos de Calidad (CQAs), Materiales Críticos (CMAs) y Parámetros de Proceso (CPPs)

En el desarrollo de productos cosméticos, como el champú sólido, es fundamental garantizar un desempeño consistente, estabilidad y aceptación sensorial del producto final. Para lograrlo, se aplicó la metodología Quality by Design (QbD), que permite identificar de manera sistemática el perfil de calidad del producto deseado (QTPP), los atributos críticos de calidad (CQAs), los materiales críticos (CMAs) y los parámetros críticos del proceso (CPPs). Esta aproximación proporciona un marco estructurado para el diseño, control y mejora de

formulaciones, asegurando que las variaciones en materias primas o condiciones de proceso no comprometan la calidad del producto.

Perfil de calidad del producto deseado (QTPP – Quality Target Product Profile)

El QTPP define las características globales que se esperan del champú sólido desde la perspectiva del usuario, estableciendo los objetivos de calidad del producto final (Khan y otros, 2023). Para este champú sólido, el perfil de calidad deseado incluye: 1. Espuma abundante y estable durante el uso, 2. Suavidad e hidratación del cabello, 3. pH seguro y agradable para el cuero cabelludo, 4. Minimización del daño a la fibra capilar y 5. Integridad estructural adecuada de la barra durante almacenamiento y uso.

Atributos críticos de calidad (CQAs)

Los CQAs son propiedades medibles que permiten confirmar que se ha alcanzado el QTPP (Khan y otros, 2023). Para el champú sólido se identifican los siguientes: 1. Dureza de la barra, 2. Capacidad y estabilidad de la espuma, 3. Integridad estructural (Ausencia de cracking) y 4. Evaluación microscópica de cutícula.

Materiales críticos (CMAs)

Los CMAs son las propiedades de las materias primas que pueden influir directamente en los CQAs y, por ende, en el desempeño y la aceptación del producto final (Khan y otros, 2023). Los CMAs definidos para el champú sólido se encuentran en el Apéndice D.

Parámetros críticos del proceso (CPPs)

Los CPPs son las variables del proceso de fabricación que pueden influir directamente en los atributos críticos de calidad (CQAs) del champú sólido (Khan y otros, 2023). Los CPPs

definidos para este desarrollo incluyen: 1. Temperatura de reacción, 2. Tiempo de reacción, 3. Orden de adición, 4. Temperatura de moldeado y 5. Tiempo de agitación.

4.1.2 Estudios preliminares

4.1.2.1 Determinación del índice de saponificación

Los resultados de los índices de saponificación, utilizados como base para establecer la cantidad teórica de hidróxido de sodio requerida en la formulación del champú sólido, se presentan en el Apéndice E.

4.1.2.2 Preparación y saponificación del champú sólido

Para la formulación del diseño de experimentos fue necesario contar con una formulación inicial cercana a las mejores condiciones, de modo que permitiera alcanzar los atributos críticos de calidad del producto. Sin embargo, la revisión bibliográfica evidenció la ausencia de formulaciones reportadas para champús sólidos obtenidos mediante saponificación en caliente, particularmente aquellas que incorporan ingredientes apícolas y meliponícolas. Por esta razón, se desarrollaron formulaciones preliminares, en las cuales se incorporaron o retiraron ingredientes dentro de los rangos de concentración reportados en el Apéndice F. Este procedimiento permitió definir una formulación base adecuada que permitiera plantear el diseño experimental.

Tabla 5

Formulaciones preliminares de champú sólido evaluadas

Nombre	Descripción
Formulación #2	Formulación base + sin ácido láctico
Formulación #3	Formulación base + ácido láctico
Formulación #4	Formulación base + sin alcoholes + variación en los porcentajes de aceites y grasas duras + sin ácido láctico

Formulación #5	Formulación base + sin alcoholes+ variación en los porcentajes de aceites y grasas duras + ácido láctico
Formulación #6	Formulación base + variación en los porcentajes de aceites y grasas duras + sin ácido láctico
Formulación #7	Formulación base + variación en los porcentajes de aceites y grasas duras + ácido láctico
Formulación #10	Formulación base + variación en los porcentajes de aceites y grasas duras + sin alcoholes + ácido esteárico + sin ácido láctico
Formulación #11	Formulación base + variación en los porcentajes de aceites y grasas duras + sin alcoholes + ácido esteárico + ácido láctico
Formulación marca comercial	SCI, ácido esteárico, cúrcuma, miel, manteca de karité, agua

Donde:

Formulación base: Aceite de girasol, aceite de ricino, aceite de coco, manteca de karité, cera de abejas, alcohol cetílico, alcohol cetoestearílico, sosa cáustica, miel y agua destilada.

Las formulaciones #1, #8 y #9 fueron descartadas desde el inicio del estudio, ya que no generaron barras de champú firmes debido a la composición empleada; por lo tanto, no se les realizaron pruebas y el análisis se continuó con las demás formulaciones.

4.1.2.3 Evaluación experimental

Capacidad espumante

En la Figura 15 del Apéndice G se presentan los resultados de capacidad espumante y estabilidad de la espuma para las formulaciones evaluadas, incluyendo un champú sólido comercial como referencia ante la ausencia de datos en la literatura. Como se observa, todas las formulaciones desarrolladas superan el volumen de espuma del producto comercial tipo syndet. Aunque estos suelen generar mayor espuma debido a la presencia de tensoactivos sintéticos, los cuales favorecen la formación y estabilidad de la espuma al reducir la tensión superficial (Rosen

& Kanjappu, 2012), los champús obtenidos por saponificación también pueden presentar una alta capacidad espumante cuando se emplean materias primas adecuadas.

En particular, el aceite de coco y otros aceites empleados en la formulación favorecen la formación y estabilidad de la espuma. El aceite de coco, rico en ácidos grasos como el láurico y mirístico, produce barras con alta capacidad espumante (Aisy y otros, 2022). En este sentido, las formulaciones #4, #5, #6, #10 y #11 presentan los mejores resultados, lo cual se asocia a su mayor contenido de estos aceites. Además, al mantenerse constante el sobreengrasado, un mayor contenido de aceites implica una mayor cantidad de NaOH, favoreciendo la formación de jabones con mayor capacidad espumante.

pH

En la Figura 16 del Apéndice G se presentan los valores de pH obtenidos para las formulaciones evaluadas. Como se observa, todas presentan valores superiores al del champú comercial, lo cual es consistente con productos elaborados por saponificación, que suelen ser más alcalinos debido a la formación de sales de ácidos grasos y la posible presencia de trazas de NaOH sin reaccionar (Mogollón Melgarejo , 2021).

Entre las formulaciones, aquellas que contienen ácido láctico muestran los valores de pH más bajos, lo que se atribuye a su función como agente regulador, capaz de disminuir la alcalinidad y ajustar el pH hacia rangos más adecuados para aplicaciones capilares.

Cracking

En la Figura 17 del Apéndice G se presenta los resultados de la prueba de cracking. En el eje de las abscisas se muestran las formulaciones evaluadas, mientras que en el eje de las ordenadas el grado de agrietamiento observado. Las formulaciones #2 y #3 presentan el mayor grado de

agrietamiento, mientras que el resto de las formulaciones cumplen con el criterio de aceptación establecido en el Apéndice C. No obstante, es importante señalar que las formulaciones #4, #5, #6 y #7, aunque no evidencian cracking, presentaron un ligero ablandamiento estructural.

Las formulaciones #2 y #3 se caracterizan por un menor contenido de aceite de coco, manteca de karité y cera de abejas, lo cual se asocia con la mayor presencia de cracking. Este comportamiento puede explicarse debido a que dichos ingredientes contienen ácidos grasos saturados que contribuyen significativamente a la dureza y estabilidad estructural del champú (Nong y otros, 2023).

Dureza

La Figura 18 del Apéndice G muestra los resultados de dureza para las formulaciones desarrolladas. Las formulaciones con ácido láctico (#5, #7 y #11) presentan menores valores de dureza, lo cual se atribuye a su reacción con la sosa libre para formar lactato de sodio, compuesto que tiende a ablandar la estructura de la barra, en concordancia con lo reportado en la literatura (The Ultimate Guide to Soap, 2022).

Por otro lado, las formulaciones sin ácido láctico se encuentran dentro del rango de aceptación, destacándose la formulación #10 por presentar la mayor dureza, atribuida a la presencia de ácido esteárico, el cual aporta consistencia y firmeza a la barra (Del Blanco Hernández, 2017). El champú sólido comercial presenta una mayor dureza, posiblemente por la adición de agentes endurecedores; sin embargo, este valor se encuentra fuera del rango de aceptación establecido en la Tabla 1 y no necesariamente representa un mejor desempeño.

Daño capilar

La Figura 19 del Apéndice G muestra los resultados de daño capilar para las formulaciones evaluadas. Comparando estos resultados con los obtenidos en la prueba de pH, no se observa una relación directa, ya que las formulaciones con ácido láctico, a pesar de presentar pH más bajos, evidencian mayores niveles de daño, mientras que formulaciones como la #4, #6 y #10, con pH más altos, muestran menor afectación.

Finalmente, se elaboró una matriz de selección que resume el desempeño global de las formulaciones, esta matriz y el criterio de clasificación se presentan en la Figura 4.

Figura 4

Escala de aceptabilidad y matriz de selección de las formulaciones preliminares

	Acceptación	Cumple o supera los criterios
	Rechazo	No cumple los criterios
	Acceptable con observaciones	Cumple parcialmente, presenta observaciones o posibles mejoras
	No se realizó prueba	

4.1

Formulación	Prueba					
	pH	Capacidad espumante	Estabilidad de la espuma	Cracking	Dureza	Daño
#2						
#3						
#4						
#5						
#6						
#7						
#10						
#11						
Comercial						

4.2

Como se observa en la Figura 4.1, dos formulaciones presentan cuatro pruebas dentro del rango de aceptación, una prueba aceptable con observaciones y una rechazada: las formulaciones #6 y #10. Ambas no cumplen con el criterio establecido para la prueba de pH; sin embargo, como se evidenció previamente, no existe una relación directa entre el pH y el daño capilar. En este contexto, resulta necesario seleccionar entre la formulación #6, que cumple con la prueba de daño, pero presenta observaciones en la prueba de cracking, y la formulación #10, que satisface el criterio de cracking, aunque presenta observaciones en la evaluación de daño capilar.

Si bien la prueba de daño capilar constituya un parámetro relevante, el cracking se considera un atributo crítico debido a que compromete la estabilidad estructura de la barra. En contraste, el daño capilar puede mitigarse mediante ajustes en la formulación, disminuyendo la cantidad de NaOH o el incremento en la proporción de miel, ingrediente que aporta propiedades humectantes y suavizantes, contribuyendo a prevenir la resequedad y potencialmente reducir el daño capilar (Wagner Cespedes y otros, 2021).

4.2 Fase 2. Aplicación del Diseño experimental

4.2.1 Diseño experimental

Se implementó un diseño experimental factorial de dos factores y tres niveles, con una réplica, para un total de 18 corridas experimentales. Este diseño tuvo como objetivo determinar las mejores condiciones para la formulación del champú sólido, minimizando el daño capilar asociado a la concentración de NaOH, y simultáneamente, aprovechando los beneficios de la miel como agente hidratante y funcional para el cabello. Todo esto se desarrollará tomando como base la formulación #10 definida a partir de las pruebas preliminares. En el apéndice I se muestra la matriz del diseño experimental codificada.

4.2.2 Desarrollo experimental

En el Apéndice J se presentan las Figuras 21 a 25, en las cuales se muestran las 18 formulaciones evaluadas correspondientes al diseño experimental (DOE). El análisis detallado de estos resultados se desarrolla en la sección siguiente, apoyado en el análisis estadístico realizado mediante el software Minitab.

4.2.3 Análisis estadístico

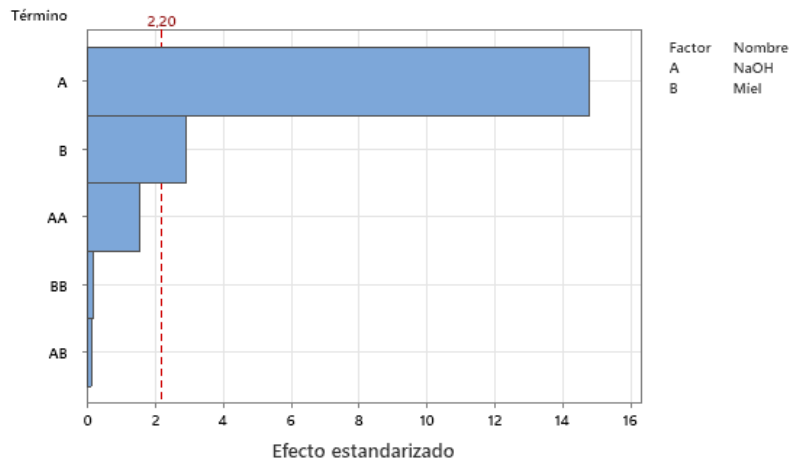
En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del diseño de experimentos aplicado para la determinación de las mejores condiciones de la formulación de champú sólido. El

análisis estadístico fue realizado mediante Minitab Statistical Software versión 22.1, incluyendo análisis de varianza (ANOVA), coeficientes de determinación (R^2 ajustado y R^2 predicho), análisis de residuos y la elaboración de gráficos de contorno y diagramas de Pareto, con el fin de identificar la influencia de los factores evaluados y sus interacciones sobre las variables de respuesta.

Capacidad espumante

Figura 5

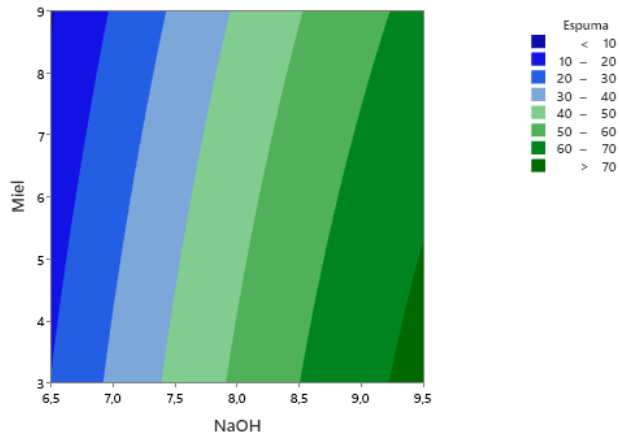
Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la capacidad espumante



El análisis de varianza (ANOVA), mostró que los factores estudiados, concentración de NaOH y contenido de miel, influyen significativamente en la capacidad espumante ($p < 0.05$). Entre ambos, la concentración de NaOH presentó el mayor efecto, lo cual se evidencia en el diagrama de Pareto (Figura 5). Por otra parte, la interacción entre ambos factores no resultó significativa según el modelo estadístico obtenido.

Figura 6

Gráfica de contornos para la capacidad espumante



La Figura 6 indica que, dentro del rango experimental evaluado, un incremento en la concentración de NaOH se asocia con un aumento en la capacidad espumante. Este comportamiento puede explicarse en función del grado de sobreengrasado de las formulaciones. En niveles bajos de NaOH, existe una mayor proporción de grasas sin reaccionar, las cuales pueden actuar como agentes antiespumantes, reduciendo la formación de espuma. Al incrementar la concentración de NaOH, estas grasas residuales reaccionan durante la saponificación, aumentando la cantidad de sales de ácidos grasos, las cuales actúan como agentes tensioactivos responsables de la reducción de la tensión superficial y la formación de espuma, disminuyendo el efecto inhibidor de la espuma asociado a los aceites libres. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Erbaningsih y otros (2025), quienes observaron que el aumento en la concentración de NaOH incrementa el volumen de espuma generado. En contraste, un incremento en la cantidad de miel produce una ligera disminución del volumen de espuma, debido a la presencia de azúcares y compuestos viscosantes en la miel, los cuales incrementan la viscosidad de la fase acuosa, lo que puede afectar fenómenos interfaciales como la formación y la estabilidad de la espuma (Rosen & Kanjappu, 2012).

El modelo obtenido para la capacidad espumante presentó un buen ajuste, con un coeficiente de determinación (R^2) de 95.43 %, indicando que explica la mayor parte de la variabilidad de los datos experimentales. Asimismo, los valores de R^2 ajustado (92.93 %) y R^2 predicho (88.78 %) resultaron cercanos entre sí, lo que sugiere que el modelo es adecuado y posee una buena capacidad predictiva dentro del rango experimental estudiado.

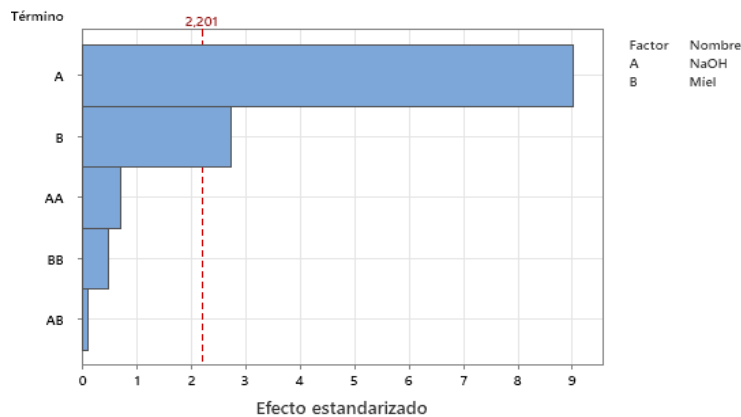
Finalmente, mediante el software Minitab se obtuvo la ecuación de regresión en unidades no codificadas, la cual permite predecir la capacidad espumante del champú en función del porcentaje de NaOH y miel presentes en la formulación.

$$\begin{aligned} \text{Espuma (mL)} = & -224.1 + 52.3 * \%NaOH - 1.51 * \%Miel - 2.17 * \%NaOH * \%NaOH - \\ & 0.065 * \%Miel * \%Miel + 0.064 * \%NaOH * \%Miel \end{aligned} \quad \text{Ec.1}$$

pH

Figura 7

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el pH

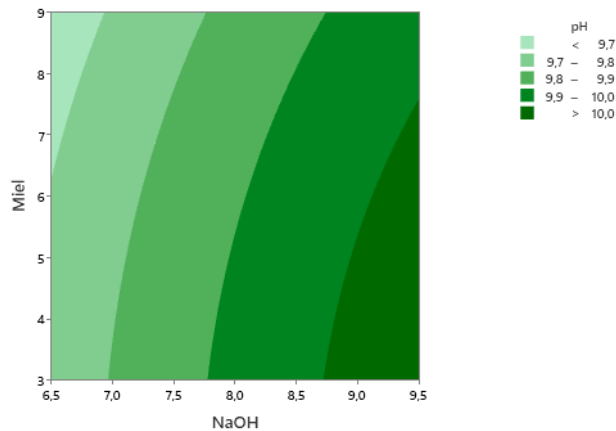


El análisis de varianza (ANOVA) indicó que los factores estudiados, concentración de NaOH y cantidad de miel, influyen significativamente sobre el pH ($p < 0.05$). Entre ambos factores, la concentración de NaOH presentó el mayor efecto, como se evidencia en el diagrama

de Pareto (Figura 7). La interacción entre los factores no mostró un efecto significativo según el modelo estadístico obtenido.

Figura 8

Gráfica de contornos para el pH



La Figura 8 muestra que, dentro del rango experimental evaluado, un incremento en la concentración de NaOH conduce a valores más altos de pH. Este comportamiento puede explicarse desde un enfoque fisicoquímico, considerando que los champús formados corresponden a carboxilatos de sodio, es decir, sales derivadas de ácidos débiles y bases fuertes. En presencia de agua, estos compuestos experimentan un proceso de hidrólisis básica, generando iones hidroxilo (OH^-), lo que incrementa la alcalinidad del medio y, en consecuencia, el pH. Adicionalmente, la posible presencia de hidróxido de sodio no reaccionado contribuye a este efecto.

Por otra parte, un aumento en la cantidad de miel genera una ligera disminución del pH. Esto puede explicarse desde la fenomenología de una reacción ácido-base, ya que los ácidos orgánicos presentes en la miel, principalmente el ácido glucónico, reaccionan directamente con las trazas de hidróxido de sodio no consumido, produciendo su neutralización. Asimismo, estos ácidos contribuyen a consumir iones hidroxilo (OH^-) presentes en el medio, lo que no solo reduce la alcalinidad, sino que también puede desplazar el equilibrio de hidrólisis básica de los carboxilatos

de sodio hacia la formación de especies menos ionizadas. En conjunto, estos efectos conducen a una disminución del pH del sistema, en concordancia con el carácter ácido reportado para la miel, cuyos valores típicos de pH se encuentran entre 3,5 y 6,5 (Bogdanov y otros, 2008).

Para la variable pH, el modelo presentó un coeficiente de determinación (R^2) de 89.42 %, indicando que explica una alta proporción de la variabilidad observada en los datos experimentales. El R^2 ajustado (83.65 %) evidencia un buen ajuste del modelo; sin embargo, el R^2 predicho (72.09 %) resultó menor, lo que sugiere una capacidad predictiva moderada, aunque aún aceptable dentro del rango experimental evaluado. La ecuación de regresión para el pH se presenta a continuación:

$$pH = 8.388 + 0.273 * \%NaOH + 0.0078 * \%Miel - 0.0100 * \%NaOH * \%NaOH - \\ 0.00167 * \%Miel * \%Miel - 0.00056 * \%NaOH * \%Miel \quad \text{Ec. 2}$$

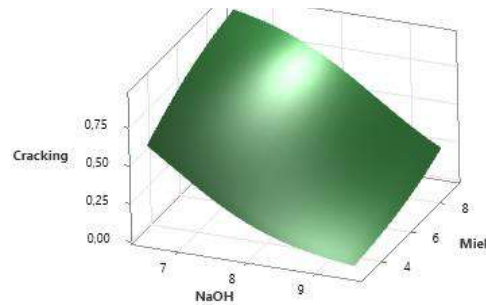
Cracking

La variable cracking no fue analizada mediante metodología de superficies de respuesta, sino a través de un modelo de regresión logística, debido a que la variable de respuesta fue de tipo binario (0 o 7) para las 18 formulaciones evaluadas. Este tipo de modelo se emplea para estimar la ocurrencia de eventos en función de variables independientes (Hosmer y otros, 2013); en este caso, el evento corresponde a la aparición de cracking en función del porcentaje de NaOH y miel presentes en la formulación.

El análisis de varianza asociado al modelo mostró que el único término con influencia significativa sobre la ocurrencia de cracking es el porcentaje de NaOH ($p < 0.05$).

Figura 9

Gráfica de superficie para el cracking



De acuerdo con la Figura 9 se observa que a medida que aumenta el porcentaje de NaOH en la formulación, la probabilidad de que la barra presente agrietamiento severo tiende a disminuir.

Este comportamiento puede explicarse considerando que la concentración de NaOH determina el grado de saponificación de los ácidos grasos presentes en la formulación. A concentraciones bajas de NaOH, se obtiene un menor grado de saponificación, dejando una mayor proporción de lípidos sin reaccionar (sobreengrasado), los cuales actúan como agentes plastificantes. Estas especies se intercalan en la red cristalina de las sales de ácidos grasos, debilitando las interacciones intermoleculares y generando una matriz más blanda y susceptible a daño estructural, lo que favorece el cracking. Por el contrario, al aumentar la concentración de NaOH, se reduce el contenido de lípidos libres y el efecto plastificante, favoreciendo la formación de una estructura más rígida y estable (Gunstone y otros, 2007).

La ecuación obtenida para predecir la probabilidad de ocurrencia de cracking se presenta a continuación:

$$P(7) = \frac{e^{y'}}{1+e^{y'}} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

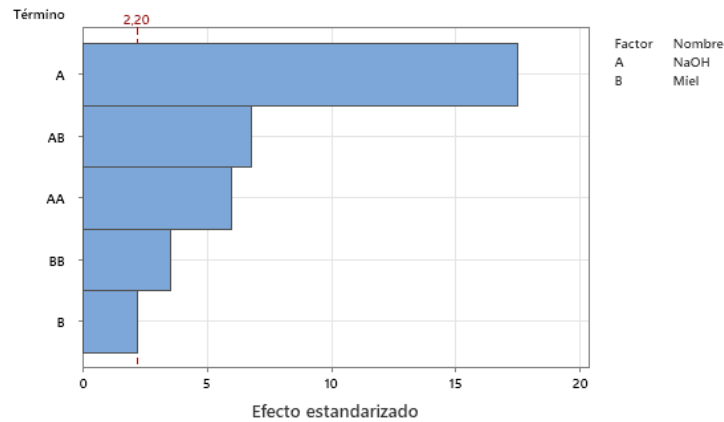
$$Y' = 7.58 - 1.262 * \%NaOH + 0.359 * \%Miel$$

Ec. 4

Dureza

Figura 10

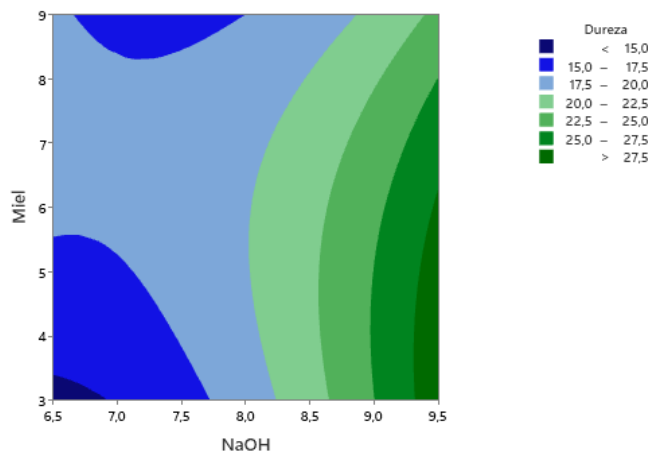
Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la dureza



El análisis de varianza (ANOVA) indicó que, de los factores estudiados (NaOH y miel), únicamente la concentración de NaOH influye significativamente en la dureza ($p < 0.05$). No obstante, los términos cuadráticos y de interacción del modelo también presentan influencia estadísticamente relevante, como se observa en el diagrama de Pareto (Figura 10).

Figura 11

Gráfica de contornos para la dureza



La Figura 11 muestra que, dentro del rango experimental evaluado, un aumento en el porcentaje de NaOH se asocia con una mayor dureza. Este comportamiento puede explicarse porque el incremento de NaOH favorece el proceso de saponificación de los ácidos grasos presentes en la formulación, generando una mayor cantidad de sales sódicas de ácidos grasos. Estas sales constituyen la matriz sólida del champú, por lo que un mayor grado de saponificación se relaciona con barras más firmes y con mayor dureza (Izzuddin Rosman y otros, 2025). Por el contrario, la miel no presenta una tendencia definida sobre esta variable dentro del rango estudiado.

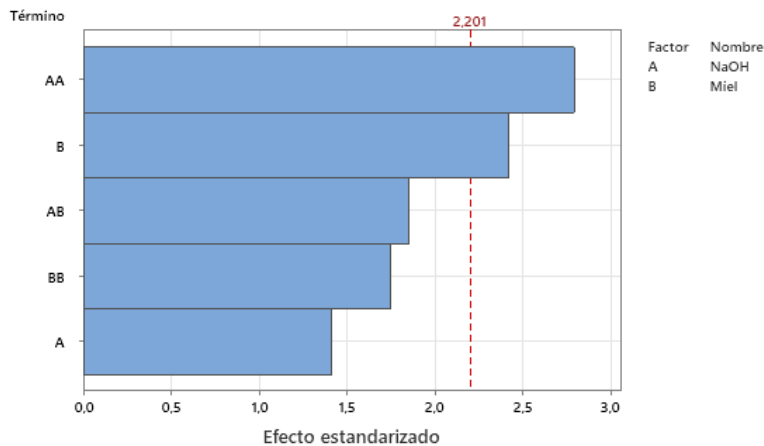
El modelo obtenido para la dureza presentó coeficientes de determinación elevados ($R^2 = 97.37\%$, R^2 ajustado = 95.93% y R^2 predicho = 92.75%), lo que indica que el modelo describe adecuadamente la variabilidad de los datos experimentales y posee una buena capacidad predictiva. La ecuación de regresión para la dureza se presenta a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Dureza (unidades Shore A)} = & 46.3 - 14.54 * \%NaOH + 6.336 * \%Miel + 1.315 * \\ & \%NaOH * \%NaOH - 0.1935 * \%Miel * \%Miel - 0.5278 * \%NaOH * \%Miel \quad \text{Ec. 5} \end{aligned}$$

Daño capilar

Figura 12

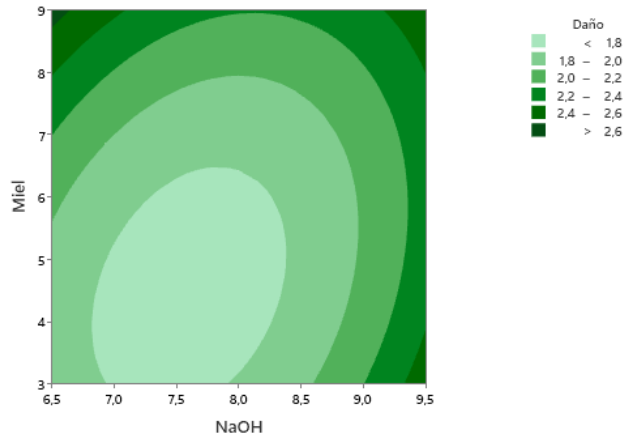
Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el daño capilar



El análisis de varianza (ANOVA) para la variable daño indicó que únicamente el factor miel y el término cuadrático NaOH^2 presentan una influencia significativa sobre la respuesta ($p < 0.05$), como se observa en el diagrama de Pareto (Figura 12).

Figura 13

Gráfica de contornos para el daño capilar



De acuerdo con la Figura 13, se identifica una región dentro del rango de aceptación establecido en el Apéndice L, la cual se encuentra aproximadamente entre 6.5–9 % de NaOH y 3–7.5 % de miel. Esto sugiere que la mayoría de las formulaciones evaluadas en el diseño experimental (DOE) no generan daño capilar significativo.

Como se observó previamente en la sección de resultados de las pruebas preliminares, aunque el pH de las barras pueda ser relativamente alto, esto no necesariamente se traduce en daño capilar. Este comportamiento puede atribuirse a la presencia de ingredientes en la formulación que actúan como agentes protectores físicos, tales como la manteca de karité y los aceites de coco, ricino y girasol, así como la miel. Durante la evaluación *in vitro*, estos componentes depositan una película lipídica sobre la cutícula del cabello, actuando como un recubrimiento hidrófobo que reduce la fricción entre las fibras capilares y retrasa la penetración de los iones OH^- responsables del hinchamiento temporal de la cutícula (Coderch y otros, 2023). Por lo tanto, el efecto observado

no se debe a una mitigación química de la alcalinidad, sino a una protección física y efecto emoliente de los ingredientes sobre la fibra capilar.

El modelo obtenido para la variable daño presentó valores de $R^2 = 66.79\%$, R^2 ajustado = 48.68% y R^2 predicho = 16.98% , lo que indica una capacidad predictiva limitada. Este bajo valor de R^2 predicho se debe a la baja variabilidad observada en los valores de daño, ya que la mayoría de las formulaciones evaluadas no generaron afectaciones significativas en el cabello. En consecuencia, dentro del rango experimental estudiado, la respuesta de daño capilar es prácticamente plana, lo que indica que las formulaciones evaluadas son seguras y no se observan efectos adversos marcados. La ecuación de regresión para el daño capilar se presenta a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Daño}(\text{Nivel de daño}) = & 11.12 - 2.52 * \%NaOH + 0.067 * \%Miel + 0.1778 * \%NaOH * \\ & \%NaOH + 0.0278 * \%Miel * \%Miel - 0.0417 * \%NaOH * \%Miel \end{aligned} \quad \text{Ec. 6}$$

Análisis de residuos

En todas las variables de respuesta, con excepción del cracking, que fue analizado mediante regresión logística, se realizó el análisis de residuos de los modelos obtenidos. En las gráficas de probabilidad normal (Figura 27, 30, 33 y 36 del Apéndice L), se observa que los puntos experimentales se distribuyen cercanos a la línea recta, lo que indica que los residuos siguen aproximadamente una distribución normal. Cabe aclarar que, para el análisis del daño capilar, se promediaron 10 observaciones discretas por corrida, lo que la convierte en una variable pseudo-continua. Aunque esto suaviza la variabilidad y reduce el efecto de los “escalones”, la variable sigue siendo acotada y con poca variación. Esto explica el bajo R^2 predicho (16%) y limita la capacidad del modelo del daño capilar para encontrar tendencias claras.

Adicionalmente, se revisaron las gráficas de Residuos vs Ajustes (Figura 28, 31, 34 y 37 del Apéndice L) y Residuos vs Orden (Figura 29, 32, 35 y 38 del Apéndice L) generadas por Minitab, confirmando que no existen patrones de embudo ni tendencias temporales en los errores. Este comportamiento sugiere que los modelos presentan un ajuste adecuado a los datos experimentales y que se cumplen los supuestos requeridos para el análisis estadístico realizado.

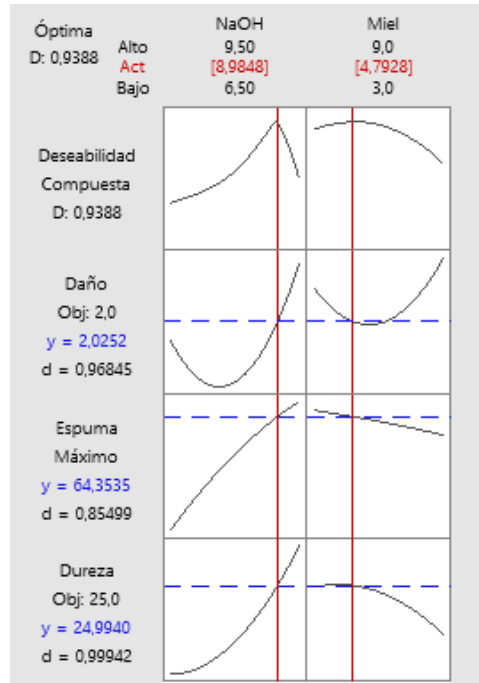
Determinación de las mejores condiciones de formulación dentro del rango experimental

Para determinar las mejores condiciones, se consideraron las variables capacidad espumante, dureza y daño capilar, ya que deben estar dentro de los rangos de aceptación para cumplir con el perfil de calidad del producto (QTPP). El pH no se incluyó, porque no presenta relación directa con el daño capilar en el rango estudiado y podría generar ruido en el modelo, mientras que el cracking fue excluido por haberse analizado mediante un enfoque estadístico diferente.

La mejora de la formulación se realizó usando la función de deseabilidad en Minitab, estableciendo como objetivos maximizar la capacidad espumante, lograr una dureza de 25 unidades Shore A (dentro del rango 24-32) y limitar el daño capilar a un valor máximo de 2, asegurando que todas las respuestas se mantuvieran dentro de los rangos de aceptación.

Figura 14

Gráfico de mejores condiciones mediante función de deseabilidad



El gráfico de mejores condiciones obtenido mediante la función de deseabilidad se presenta en la Figura 14. La solución encontrada por el software corresponde a una formulación con un 8.98% de NaOH y 4.79% de miel en peso, con la cual se predicen valores de 24.99 unidades Shore A, 64.35 mL de volumen de espuma y un nivel de daño de 2.02. Esta solución alcanzó una deseabilidad compuesta de 0.94, lo que indica un alto grado de cumplimiento simultáneo de los objetivos de las mejores condiciones planteadas.

Tabla 6

Resultados de la validación experimental de la formulación con mejores condiciones y comparación con los valores predichos por el modelo

Réplica experimental	Capacidad espumante promedio (mL)	Dureza promedio (unidades Shore A)	Daño capilar promedio (nivel)	pH promedio	Cracking promedio (Grado de agrietamiento)	Estabilidad de la espuma promedio (%)
#1	69.2	25.7	1.9	10.0	0	96.4
#2	67.5	24.8	1.9	9.9	0	97.5
#3	70.8	26.4	1.7	10.1	0	94.1
Promedio experimental	69.2	25.6	1.8	10.0	0	96.0
Desviación estándar	2.4	1.1	0.1	0.1	0	1.7
Valor predicho (Minitab)	64.4	25.0	2.0			
Desviación (%error)	7.5	2.6	9.5			

En la Tabla 6 se presentan los resultados de la validación experimental de la formulación con mejores condiciones. Para ello, se realizaron tres réplicas experimentales en las que se evaluaron las variables capacidad y estabilidad de la espuma, dureza, pH, cracking y daño capilar. Los resultados evidencian una buena reproducibilidad entre las réplicas, reflejada en las bajas desviaciones estándar obtenidas.

Al comparar los valores experimentales con los valores predichos por los modelos generados en Minitab, se observaron errores porcentuales de 7.5 % para la capacidad espumante, 2.6 % para la dureza y 9.5 % para el daño capilar. Para la capacidad espumante y la dureza, los modelos presentan altos valores de R^2 , lo que indica una adecuada capacidad predictiva en la región evaluada. En el caso del daño capilar, el bajo error no refleja predictividad del modelo, sino

que se debe a la baja variabilidad de los datos, ya que la mayoría de las formulaciones evaluadas presentaron niveles de daño similares. Esto sugiere que, dentro de la región estudiada, la formulación es estable y no genera variaciones significativas en el daño capilar, pero no implica que tenga una capacidad predictiva fuera de esta región.

Asimismo, los valores de pH obtenidos se encuentran dentro del rango esperado, conforme a lo determinado en el diseño de experimentos y el análisis estadístico realizado en Minitab. Por otro lado, el análisis de cracking mostró un nivel de agrietamiento igual a cero, en concordancia con lo predicho por la ecuación (Ec. 3), cumpliendo con las condiciones planteadas en el modelo. Finalmente, la estabilidad de la espuma de las barras desarrolladas fue elevada y cercana a la observada en el champú sólido comercial presentado en la Figura 18 del Apéndice G.

5. Conclusiones

La aplicación de la metodología Quality by Design (QbD) permitió identificar y priorizar los atributos críticos de calidad del champú sólido, estableciendo la capacidad espumante, la dureza, el cracking y el daño capilar como variables clave para evaluar el desempeño del producto. A partir del análisis de los materiales y de los resultados obtenidos en las pruebas preliminares realizadas para definir una formulación base, se determinaron como variables críticas de formulación el porcentaje de NaOH y el contenido de miel, lo que permitió estructurar el desarrollo del producto bajo un enfoque sistemático orientado al control de la calidad desde la etapa de diseño.

La implementación del diseño de experimentos basado en superficies de respuesta permitió evaluar cuantitativamente la influencia de los factores de formulación sobre las propiedades fisicoquímicas y funcionales del champú sólido. El análisis de varianza evidenció que el NaOH ejerce una influencia altamente significativa sobre la capacidad espumante, la dureza y el cracking, además de un efecto cuadrático significativo sobre el daño capilar, mientras que la miel influye principalmente en la respuesta asociada al daño capilar. Asimismo, los resultados del diseño de experimentos sugieren que, bajo las condiciones evaluadas, no se observó daño estructural macroscópico en el cabello tras un lavado simulado de 10 minutos, incluso con pH relativamente alto. Esto indica que, en el corto plazo, los ingredientes lipídicos y humectantes presentes en la formulación como la miel, manteca de karité y los aceites de coco, girasol y ricino podrían ejercer un efecto protector sobre la fibra capilar. Sin embargo, no es posible extrapolar estos resultados a exposiciones prolongadas o repetidas.

La mejora simultánea de las respuestas mediante la función de deseabilidad permitió determinar una formulación que satisface los criterios de desempeño establecidos para el producto.

El modelo estadístico predijo una composición ideal de 8.98 % de NaOH y 4.79 % de miel en peso, alcanzando valores estimados de 64.35 mL de espuma, 24.99 unidades de dureza, un grado de agrietamiento (cracking) de 0 y un nivel de daño cercano a 2, que indica que, en las condiciones evaluadas, la barra podría ser considerada segura para la fibra capilar, probablemente gracias al efecto protector y emoliente de los ingredientes lipídicos y humectantes presentes en la formulación. El modelo tiene una deseabilidad compuesta de 0.94, lo que evidencia un alto nivel de cumplimiento del perfil de calidad objetivo.

Finalmente, la validación experimental del prototipo seleccionado mostró desviaciones inferiores al 10 % entre los valores experimentales y los predichos, lo que refleja la estabilidad, reproducibilidad y robustez de la formulación con mejores condiciones en la región de operación evaluada. En particular, para la variable daño capilar, el bajo error se debe a la baja variabilidad de los datos y no a la predictividad del modelo, indicando que la formulación mantiene la integridad de la fibra capilar bajo las condiciones evaluadas. Estos resultados respaldan la viabilidad del prototipo para el desarrollo del champú sólido mediante saponificación bajo un enfoque QbD.

6. Recomendaciones

Se recomienda realizar estudios adicionales de daño capilar mediante exposiciones repetidas o de mayor duración, con el fin de evaluar posibles efectos acumulativos y confirmar la seguridad del producto en condiciones de uso prolongado.

Se recomienda evaluar la estabilidad fisicoquímica de las formulaciones optimizadas bajo diferentes condiciones de almacenamiento (temperatura y humedad), con el propósito de determinar su vida útil y verificar el mantenimiento de los atributos críticos de calidad a lo largo del tiempo.

Se recomienda realizar pruebas de desempeño en condiciones reales de uso, incluyendo evaluaciones sensoriales y de aceptación por parte de usuarios, con el fin de validar la funcionalidad del producto desde una perspectiva práctica.

Se recomienda evaluar el escalamiento del proceso a nivel piloto, verificando que las condiciones operativas se mantengan dentro del espacio de diseño y que los atributos críticos de calidad se conserven bajo condiciones de producción.

Referencias

- Acosta Suárez, C. A. (2025). *La cría de abejas y su relación con el paisaje en la Zona de Reserva Campesina del Guaviare (Colombia)*. Leticia: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/88719>
- Aisy, R., Mardawati, E., Nurliasary, D., Fitriana, H., & Dewantoro, A. (2022). *Optimization of Propolis and Vegetable Oils-based Soap Formulation to Enhance Product Quality and Antioxidant Properties*. Indonesian Journal of Pharmaceutics. <https://doi.org/https://doi.org/10.24198/idjp.v4i2.41229>
- Akoh, C. (2017). *Food Lipids: Chemistry, Nutrition, and Biotechnology*. Boca Raton: Taylor & Francis Group. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781315151854>
- Alchemy. (10 de Julio de 2025). Obtenido de <https://alchemymateriaprima.com/blogs/noticias/guia-aceites-mantecas-jabones-saponificados#:~:text=Cada%20ingrediente%20vegetal%20tiene%20una%20personalidad%20distinta,recetas%2C%20sus%20beneficios%20y%20su%20vida%20%C3%BAtil>.
- Anderson , T. (9 de Enero de 2025). *Lovely Greens*. Obtenido de <https://lovelygreens.com/honey-oats-and-beeswax-soap/>
- Bogdanov, S., Jurendic, T., Robert, S., & Gallmann, P. (2008). Honey for nutrition and health: a review. *American Journal of the College of Nutrition*, 27(6), 677-689. <https://doi.org/10.1080/07315724.2008>

- Brito, I., Ferreira, S., & Santos, L. (2023). *On the Path to Sustainable Cosmetics: Development of a Value-Added Formulation of Solid Shampoo Incorporating Mango Peel Extract*. *Cosmetics*. <https://doi.org/10.3390/cosmetics10050140>
- Chang Vegas, M. S., Cisneros Navarro, M., García Cueva, N., Gómez Zarpán, D. E., & Quiroga Ganoza, L. (2019). *Diseño del proceso productivo de champú en barra artesanal*. Piura: Universidad de Piura. Obtenido de <https://pirhua.udep.edu.pe/item/b8c4508d-998a-4833-b946-fd364086ade0>
- Chela, Japones. (16 de Abril de 2023). *Marcela Burgos*. Obtenido de <https://marcelaburgos.com/jabon-de-avena-y-miel/>
- Coderch, L., Alonso, C., García, M., Pérez, L., & Martí, M. (2023). Hair Lipid Structure: Effect of Surfactants. *Cosmetics*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/cosmetics10040107>
- Cruz Oliveira, I. C., Ignácio de Assis, J., Paula Miguel, L., Lucatelli Elizeu, L., Venerando, M., & Arten Isaac, G. E. (2024). *DESENVOLVIMENTO DE SHAMPOO SÓLIDO COM AÇÃO ANTICASPA E CICATRIZANTE*. São Paulo: Centro Universitário da Fundação de Ensino Octávio Bastos.
- Cursos Sanae. (s.f.). Obtenido de <https://cursos.sanae.pe/acido-estearico-en-jabones-artesanales/>
- Del Blanco Hernández, A. (2017). *Jabones y Cosméticos Artesanales para la Cooperativa Yomol A'Tel-Xaponic*. Jabones y Cosméticos Artesanales para la Cooperativa Yomol A'Tel-Xaponic. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11117/5249>

Doria Quintero, D. K. (2023). *Internationalization of Colombian SMEs in the Cosmetic and Personal Care Industry*. Bogotá: Universidad del Rosario.
https://doi.org/https://doi.org/10.48713/10336_41188

Duodu, K., Winfred Ashong, G., Ndego, A., & Kwaansa-Ansah, E. (2024). *Investigation on the improvement of shea butter yield and quality through enhanced pre-treatment methods: An analytical study on physicochemical properties*. Kumasi: Elsevier.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100840>

Erbaningsih, E., M, L., & Hidayah, M. (2025). *The Effect of NaOH Concentration and Fatty Acid Type on the Physical Properties of Solid Soap in Saponification Reaction Material*. *Jurnal IPA & Pembelajaran IPA*, 9(1), 259-275. Obtenido de <https://doi.org/10.24815/jipi.v9i1.44328>

Francisco da Costa, S. F., Passos Ramos, S., Cavalcante Braga, A. R., & Burck, M. (2023). *Development of Eco-Friendly Solid Shampoo Containing Natural Pigments: Physical-Chemical, Microbiological Characterization and Analysis of Antioxidant Activity*. Sao Paulo: Universidad Federal de Sao Pablo. <https://doi.org/DOI: 10.1089/ind.2023.0011>

Gran Velada. (s.f.). Obtenido de <https://www.hacerjabones.es/endurecer-jabon-casero/#:~:text=Otra%20opci%C3%B3n%20es%20utilizar%20el,total%20de%20aceites%20y%20mantecas.>

Gran Velada . (22 de Agosto de 2024). Obtenido de https://granvelada.com/blog/como-hacer-jabones-naturales/?srsltid=AfmBOoriiPrGKLFfZ_klT5au8XkyIJ78rULk_zx8KPMd0JE4jyLB8cu

Gunstone, F. (2008). *Oil and Fats in the Food Industry*. Wiley-Blackwell.

<https://doi.org/10.1002/9781444302424>

Gunstone, F., Harwood, J., & Dijkstra, A. (2007). *The Lipid Handbook* (3 ed.). CRC Press.

<https://doi.org/10.1201/9781420009675>

Gutiérrez Liñán, J. L. (2017). *Diseño de experimento factorial*. México: Universidad Autónoma

del Estado de México. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.11799/70079>

Hernán. (11 de Julio de 2016). *Youtube* . Obtenido de [https://www.youtube.com/watch?v=6Iv1-](https://www.youtube.com/watch?v=6Iv1-qz4mvs&t=255s)

[qz4mvs&t=255s](https://www.youtube.com/watch?v=6Iv1-qz4mvs&t=255s)

Hernández Gómez, E., Madera Santana, T., Quintana Owen, P., Ortiz Vázquez, E., Ramón Sierra,

J., & Vargas y Vargas, M. (2023). *Propiedades fisicoquímicas y bioactivas de películas comestibles basadas en alginato y miel melipona*. Biotecnia.

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18633/biotecnia.v26i1.2028>

Herrera Hernandez, M. A., & Rodriguez Rodriguez , F. (2022). *Formulación de shampoo a base*

de ingredientes naturales con efecto alisante desarrollado por medio de Quality by Design.

Bogotá: Universidad de Ciencias Ambientales y Aplicadas. Obtenido de

<https://repository.udca.edu.co/handle/11158/4530>

Hosmer, D., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. (2013). *Applied Logistic Regression* (3 ed.). Wiley.

<https://doi.org/10.1002/9781118548387>

Huaman CCapcha, L., & Huillca Yapura , M. (2022). *Control organoléptico, fisicoquímico y*

microbiológico de shampoos comercializados de forma ambulatoria en la Av. Ejército y

sus alrededores en la ciudad del Cusco. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Ihoeghian, N., & Akwara, E. (2021). *Formulation, Evaluation, and Comparison of Herbal Shampoo with Marketed Synthetic Shampoos*. Nigeria: Journal of Science and Technology Research. <https://doi.org/https://doi.org/10.37933/nipes/3.4.2021.34>

International Organization for Standardization. (2003). *ISO 868: Plastics — Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness)*. Obtenido de <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/b00a2780-f641-4857-8bb1>

Izzuddin Rosman, M., Aida Ibrahim, S., & Yusuf Rosman, M. (2025). *Optimisation of NaOH Concentration for Sustainable Soap Production Using Waste Cooking Oil*. JAMEA. Obtenido de <https://doi.org/10.30880/jamea.2025.06.02.005>

Jabonarium. (s.f.). Obtenido de Alcohol cetílico: <https://www.jabonariumshop.com/alcohol-cetilico>

Jabonarium . (s.f.). Obtenido de <https://www.jabonariumshop.com/acido-estearico-o-estearina>

Jiménez Tamayo, F. M., Vinocunga Pillajo, R. D., & Gómez Zurita, S. N. (2024). *Formulación de un champú sólido con aceite de Oenocarpus bataua, manteca de cacao y Cinchona officinalis*. Puyo: Universidad Estatal Amazónica UEA. <https://doi.org/http://doi.org/10.26423/rctu.v11i2.844>

Khan, A., Javed Naquvi, K., Faheem Haider, M., & Ali Khan, M. (2023). *Quality by design- newer technique for pharmaceutical product development*. Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ipha.2023.10.004>

- López Salas , N. (2023). *El sector de la cosmética sostenible en redes sociales : TikTok e Instagram*. Universidad autónoma de Barcelona. Obtenido de <https://ddd.uab.cat/record/284485>
- Luna Cárdenas, A. C., López Molina, G., & Cárdenas Camargo, A. M. (2024). *Exploración de ingredientes locales para la creación de productos de skincare: un enfoque ecológico y sostenible*. Bogotá: Universidad Ean. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10882/13790>
- Minitab. (s.f.). *Model Summary table for One-Way ANOVA*. Obtenido de [https://support.minitab.com/en-us/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/anova/how-to/one-way-anova/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/model-summary-table/#:~:text=con%20sus%20supuestos,-,R%2Dsq%20\(adj\),tico%20medio%20total%20\(EMT\).](https://support.minitab.com/en-us/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/anova/how-to/one-way-anova/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/model-summary-table/#:~:text=con%20sus%20supuestos,-,R%2Dsq%20(adj),tico%20medio%20total%20(EMT).)
- Mogollón Melgarejo , N. (2021). *Elaboración de un champú en barra para cabello normal con ingredientes naturales (aceite de aguacate, ricino, coco, mano de res, aceite esencial de ylang ylang, hojas de albahaca y extractos de aloe vera y jengibre) en Floridablanca, Santander*. Floridablanca: Universidad Industrial de Santander. Obtenido de <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/10179>
- Nagolkar, R., Nikas, S., Samadhan Budhwat, S., Wanare, S., & Gaikwad, S. (2025). *Formulation And Evaluation of Herbal Shampoo*. Maharashtra: International journal of pharmaceutical sciences . <https://doi.org/10.5281/zenodo.15709294>
- Nong, Y., Maloh, J., Natarelli, N., Gunt, H., Tristani, E., & Sivamani, R. (2023). *A review of the use of beeswax in skincare*. J Cosmet Dermatol. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jocd.15718>

Orellana Martínez , K. (2019). *Comparación de las propiedades fisicoquímicas y organolépticas de un jabón cosmético elaborado a partir de base de aceite de coco y aceite de oliva a escala laboratorio*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Obtenido de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/13745>

Ortiz Quiceno, M. J., Millan Trujillo, L. E., Jurado Cardona, L., Arango Rodriguez, D., Bueno Ramirez, Z. A., & Meneses Ramirez, E. A. (2022). *Evaluación de Características fisicoquímicas y actividad antioxidante de propóleos recolectados en cuatro zonas de la región Antioquia, Colombia*. Medellín: Universidad CES. Obtenido de <https://hdl.handle.net/10946/7129>

PanReacAppliChem. (s.f). *Aceite de Ricino* . Obtenido de <https://www.itwreagents.com/iberia/es/product/aceite-de-ricino-bp-ph-eur-puro-grado-farma/144564>

Pochteca Perú. (27 de Septiembre de 2023). *Usos del alcohol cetosteárico en la industria cosmética*. Obtenido de https://peru.pochteca.net/usos-del-alcohol-cetostearyllico-en-la-industria-cosmetica/#elementor-toc__heading-anchor-3

Racines Arévalo , K. (24 de Julio de 2024). *El prometedor negocio de la apicultura en Colombia*. Obtenido de Bienestar Colsanitas: <https://www.bienestarcolsanitas.com/articulo/el-prometedor-negocio-de-la-apicultura-en-colombia>

Rahul, K. (05 de Mayo de 2023). *WallStreetMojo*. Obtenido de Factorial Design: <https://www.wallstreetmojo.com/factorial-design/>

Rodríguez Almeida, N. N., Dahua Gualinga, R. D., Rivera Rojas, F. N., & Rivera Barreto, J. L. (2025). *Propuesta de champú sólido sostenible con propiedades antioxidantes con*

antioxidantes con extracto de hibiscus sabdariffa. Puyo: Universidad Estatal Amazónica.

<https://doi.org/https://doi.org/10.35381/a.g.v6i11.4344>

Rosen, M., & Kanjappu, J. (2012). *Surfactants and Interfacial Phenomena*. Willey.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781118228920.ch7>

Rosso Londoño, J. M., & Nates Parra, G. (2013). *DIVERSIDAD DE ABEJAS SIN AGUIJÓN (Hymenoptera:Meliponini) UTILIZADAS EN MELIPONICULTURA EN COLOMBIA*.

[https://doi.org/Acta biol. Colomb. 18\(3\):415-426](https://doi.org/Acta%20biol.%20Colomb.%2018(3):415-426)

Seladi-Schulman , J. (25 de Mayo de 2025). *Hims*. Obtenido de <https://www.hims.com/blog/shear-butter-for-hair>

Shampora. (s.f.). Obtenido de Aceite de Girasol:

<https://www.shampora.com/es/ingredientes/aceite-de-girasol>

Silva de Lima , L., Calderaro Illiceto, G., Robles Velasco, M. V., & Ferrera Dario, M. (2023).

Development and evaluation of the effectiveness of a solid shampoo bar. São Paulo: Biomedical and Biopharmaceutical Research. <https://doi.org/doi:10.19277/bbr.20.2.326>

Soap Queen. (1 de Octubre de 2018). Obtenido de <https://soapqueen.com/bath-and-body-tutorials/tips-and-tricks/free-beginners-guide-to-soapmaking-common-soapmaking-oils/>

Solverchem. (s.f.). Obtenido de <https://www.solverchem.com/articles/detergent-ingredients-and-properties/where-to-use-cetyl-alcohol-nfproperties/details>

Swettis Beauty Blog. (01 de Abril de 2018). Obtenido de <https://skinchakra.eu/blog/archives/552-How-to-make-a-shower-bar-minimalist-approach.html?>

Swettis Beauty Blog. (17 de Marzo de 2019). Obtenido de <https://skinchakra.eu/blog/archives/623-Black-clay-shampoo-bar.html>

Taylor. (5 de Noviembre de 2014). *The Sage*. Obtenido de <https://blog.thesage.com/2014/11/05/beeswax-in-soap/>

The ultimate guide to soap . (31 de Enero de 2022). Obtenido de <https://www.ultimateguidetosoap.com/post/what-the-suds-cetyl-alcohol-in-soap>

The Ultimate Guide to Soap. (31 de Enero de 2022). *Soapy Science: Citric Acid in Soap Making*. Obtenido de <https://www.ultimateguidetosoap.com/post/soapy-science-citric-acid-in-soap-making>

Typology Paris. (29 de Agosto de 2022). Obtenido de The Benefits of Lactic Acid for Your Hair: <https://uk.typology.com/library/the-benefits-of-lactic-acid-for-your-hair>

UPV, Universidad Politécnica de Valencia . (4 de Octubre de 2017). *Youtube*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=FgduAxadJ80>

Valenzuela , C. (9 de Septiembre de 2019). Obtenido de <https://www.claravalenzuela.com/blogs/cosmetica-natural/como-hacer-jabones-saponificados-naturales-paso-a-paso>

Wagner Cespedes, I., Hurtado Ruiz , S., & Álvarez Fuenmayor , E. (2021). *Diseño y evaluación para la elaboración de un champú seco en polvo*. Bogotá: Universidad EAN. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10882/11414>

Wholesale Supplies Plus. (9 de Mayo de 2024). *Crafter's Choice*. Obtenido de [https://www.crafters-choice.com/handmade101/learn-to-make-articles/liquid-oils-in-soap-making-guide.aspx?](https://www.crafters-choice.com/handmade101/learn-to-make-articles/liquid-oils-in-soap-making-guide.aspx)

Apéndices

Apéndice A. Determinación del índice de saponificación (ISO 3657:2020)

En primer lugar, se pesaron aproximadamente 2,0 g de cada materia grasa utilizando una balanza analítica con precisión de $\pm 0,0001$ g, registrando la masa exacta de cada muestra.

Posteriormente, se adicionaron 25 mL de solución alcohólica de hidróxido de potasio (KOH) 0,5 N a cada muestra. De manera paralela, se preparó un blanco empleando el mismo volumen de solución alcohólica de KOH sin adición de grasa, con el fin de determinar el volumen total disponible antes de la reacción.

Las muestras y el blanco fueron sometidos a calentamiento en baño María a una temperatura entre 60 y 70 °C durante 30 minutos, manteniendo agitación constante para favorecer la completa saponificación de los triglicéridos presentes.

Una vez finalizado el calentamiento, las soluciones se dejaron enfriar a temperatura ambiente. El exceso de KOH no reaccionado fue titulado con solución estándar de ácido clorhídrico (HCl) 1 N, utilizando fenolftaleína al 1 % p/p como indicador ácido-base para determinar el punto final de la titulación.

Finalmente, el índice de saponificación se calculó a partir de los volúmenes de HCl consumidos por el blanco y por cada muestra, empleando la ecuación establecida en la norma ISO 3657:2020:

$$I_s = \frac{(V_0 - V_1) * C * 56,1}{m} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

$V_0 =$ volumen del HCl usado en el ensayo blanco (ml)

$V_1 = \text{volumen del HCl usado en la determinación (ml)}$

$c = \text{concentración exacta de HCl } \left(\frac{\text{mol}}{\text{L}}\right)$

$m = \text{masa de la muestra (g)}$

$56,1 = \text{peso molecular de KOH } \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)$

Este procedimiento se realizó por triplicado para cada materia grasa, con el fin de garantizar la precisión y reproducibilidad de los resultados obtenidos.

Nota. El procedimiento fue adaptado de (UPV, Universidad Politécnica de Valencia , 2017) (Hernán, 2016).

Apéndice B. *Saponificación en caliente para la elaboración del champú sólido*

Este proceso se realiza en un rango de temperatura entre 70 y 75 °C durante las etapas de fundición y reacción, empleando un sistema de calentamiento en baño María para garantizar un control térmico uniforme.

Inicialmente, fueron pesados todos los componentes correspondientes a la fase grasa, es decir, las materias grasas, ceras y demás ingredientes que no correspondían al hidróxido de sodio, agua o aditivos. Estos componentes fueron colocados en un vaso de precipitado y sometidos a calentamiento controlado hasta su completa fusión dentro del rango de temperatura establecido.

Mientras se producía la fundición de la fase oleosa, se pesaron por separado el hidróxido de sodio, el agua destilada —considerando el porcentaje de sobreengrasado definido— y los aditivos correspondientes. Posteriormente, el hidróxido de sodio fue adicionado lentamente sobre

el agua, bajo agitación constante hasta su completa disolución. Esta secuencia es obligatoria debido al carácter exotérmico de la reacción; la adición de agua sobre el hidróxido de sodio puede generar un incremento brusco de temperatura, incrementando el riesgo de salpicaduras y accidentes.

Una vez fundidas las grasas, la solución alcalina fue incorporada gradualmente a la fase oleosa. Inmediatamente después de la incorporación, la mezcla fue agitada manualmente de manera continua hasta alcanzar el punto de traza, identificado cuando la superficie conservó la marca dejada por la espátula.

Posteriormente, la reacción de saponificación continuó bajo control térmico dentro del rango establecido, efectuándose agitación manual cada 10 minutos para mantener la homogeneidad del sistema.

Finalizada la reacción, se incorporaron los aditivos previamente pesados y se homogenizó la mezcla. Posteriormente, el producto fue vertido en moldes y dejado en reposo en un ambiente seco a temperatura ambiente para su solidificación.

Nota. El procedimiento fue adaptado de (Gran Velada , 2024), (Valenzuela , 2019):

Apéndice C. *Escala de agrietamiento o cracking del champú sólido, expresado en grados*

Tabla 7

Escala de agrietamiento o cracking del champú sólido, expresado en grados

Criterio	Grado	Descripción
Aceptación	0	Sin grietas
	1	Con grietas finas (tamaño del grosor de un cabello)
	2	Grieta delgada en uniones laterales
Rechazo	3	Grieta ancha en uniones laterales
	4	Grieta ancha en toda la unión
	5	Grieta abierta en toda la unión
	6	Hendidura profunda en toda la unión

Nota. Basado en (Orellana Martínez , 2019).

Apéndice D. Materiales críticos (CMAs) y su influencia en los atributos críticos de calidad (CQAs) del champú sólido

Tabla 8

Materiales críticos (CMAs) y su influencia en los atributos críticos de calidad (CQAs) del champú sólido

Materia prima	Atributos críticos (CMA)	Referencia
Miel de abejas	Humedad, viscosidad, contenido de azúcares, acidez	(Wagner Cespedes y otros, 2021)
Cera de abejas	Punto de fusión, dureza, impurezas, color	(Nong y otros, 2023)
Aceite de ricino	Viscosidad, índice de saponificación, acidez	(Mogollón Melgarejo , 2021)
Aceite de girasol	Acidez, insaponificables, estabilidad oxidativa	(Shampora, s.f.)
Manteca de karité	Punto de fusión, contenido de ácidos grasos, porcentaje de insaponificables, olor y pureza	(Orellana Martínez , 2019) (Seladi-Schulman , 2025)
Aceite de coco	Índice de saponificación, contenido de ácidos grasos, pureza y estabilidad oxidativa	(Mogollón Melgarejo , 2021) (Chang Vegas y otros, 2019)
Alcohol cetílico	Punto de fusión, pureza, forma física	(Jabonarium, s.f.)
Alcohol cetoestarílico	Punto de fusión, pureza, mezcla de alcoholes	(Pochteca Perú, 2023)
NaOH (Hidróxido de sodio)	Pureza, concentración	(Mogollón Melgarejo , 2021)
Ácido láctico	Concentración, pureza	(Typology Paris, 2022)
Ácido esteárico	Pureza, punto de fusión, concentración, origen (vegetal) y contenido de ácidos grasos libres	(Jabonarium , s.f.)

Apéndice E. Índices de saponificación

Tabla 9*Índices de saponificación*

Parámetro	Cera de abejas	Manteca de karité	Aceite de coco	Aceite de ricino	Aceite de girasol
Muestra 1 IS (mg KOH/g)	112.0	238.1	251.8	185.7	187.8
Muestra 2 IS (mg KOH/g)	109.3	230.5	251.3	189.2	189.5
Muestra 3 IS (mg KOH/g)	106.2	237.9	252.4	185.7	190.5
Promedio (mg KOH/g)	109.2	235.5	251.8	186.8	189.3
Desviación estándar	2.9	4.4	0.5	2.0	1.3
Índice de saponificación (mg KOH/g)	109.2 ± 2.9	235.5 ± 4.4	251.8 ± 0.5	186.8 ± 2.0	189.3 ± 1.3
Rango teórico (mg KOH/g)	90-147 (Akoh, 2017)	170-190 (Duodu y otros, 2024)	248-265 (Gunstone, 2008)	176-187 (PanReacAppliChem, s.f)	188-194 (Gunstone, 2008)
¿Cumple?	Sí	No	Sí	Sí	Sí

Apéndice F. Rangos porcentuales recomendados para las materias primas en la formulación del champú sólido

Tabla 10

Rangos porcentuales recomendados para las materias primas en la formulación del champú sólido

Materia prima	% recomendado	Referencia
Aceite de girasol	5-20	(Alchemy, 2025) (Soap Queen, 2018)
Aceite de ricino	3-10	(Wholesale Supplies Plus, 2024) (Soap Queen, 2018)
Aceite de coco	15-30	(Alchemy, 2025) (Soap Queen, 2018)
Manteca de karité	5-15	(Alchemy, 2025) (Soap Queen, 2018)
Cera de abejas	1-4	(Taylor, 2014) (Anderson, 2025)

Alcohol cetílico	1-3	(Solverchem, s.f.) (The ultimate guide to soap , 2022)
Alcohol cetoestearílico	1-3	Fuente especificada no válida..
Ácido láctico	~1	(Swettis Beauty Blog, 2019) (Swettis Beauty Blog, 2018)
Miel	1-3,3	(Anderson , 2025) (Chela, Japones, 2023)
Ácido esteárico	1-5	(Gran Velada, s.f.) (Cursos Sanae, s.f.)

Apéndice G. Comportamiento de las variables de salida en las formulaciones preliminares

Figura 15

Comportamiento de la capacidad espumante y estabilidad de la espuma en las formulaciones preliminares

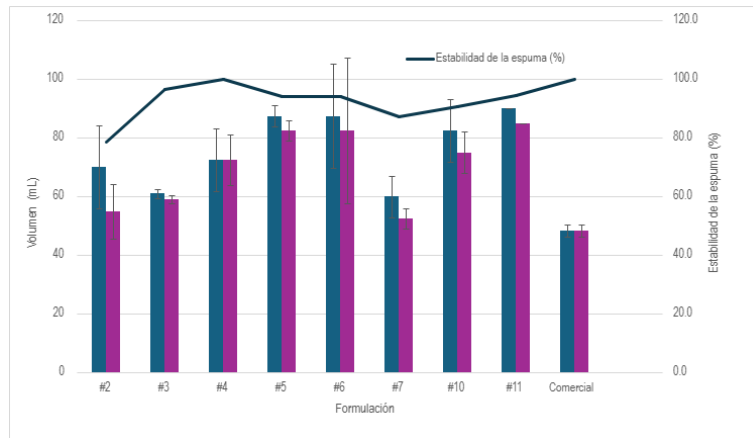


Figura 16

Comportamiento del pH en las formulaciones preliminares

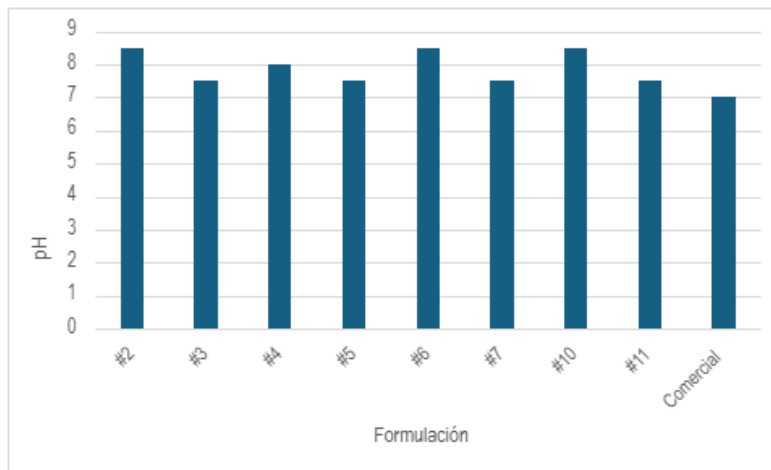


Figura 17

Comportamiento del cracking en las formulaciones preliminares

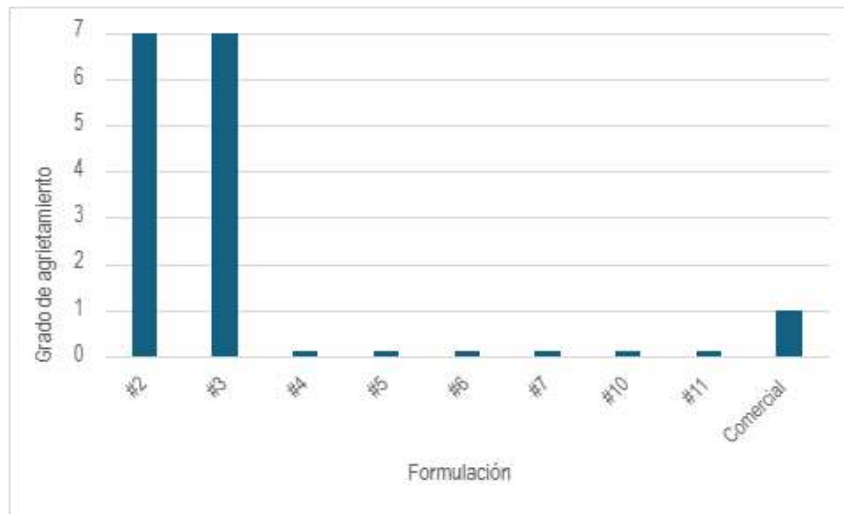


Figura 18

Comportamiento de la dureza en las formulaciones preliminares

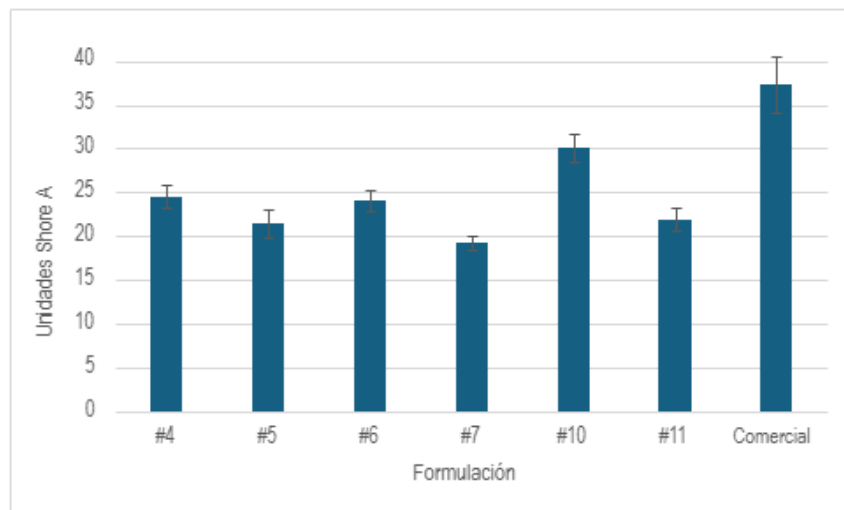
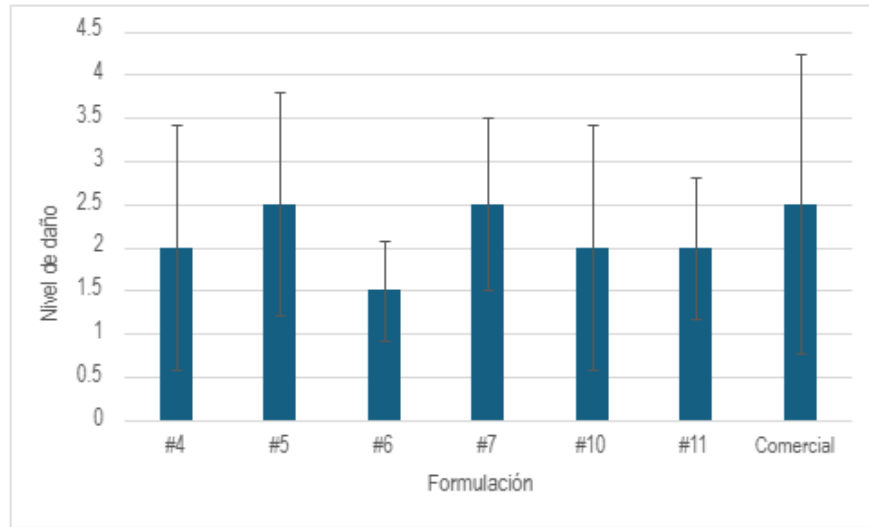


Figura 19

Comportamiento del daño capilar en las formulaciones preliminares



Apéndice H. Registro fotográfico de las formulaciones preliminares de champú sólido

Figura 20

Registro fotográfico de las formulaciones preliminares de champú sólido



20.1

20.2

Apéndice I. Matriz del diseño experimental codificado

Tabla 11

Matriz del diseño experimental codificado

Corrida	NaOH	Miel
1	-1	1
2	-1	-1
3	-1	-1
4	1	0

5	-1	1
6	1	-1
7	-1	0
8	0	-1
9	0	1
10	1	1
11	0	1
12	-1	0
13	1	0
14	1	1
15	0	0
16	1	-1
17	0	0
18	0	-1

Apéndice J. Comportamiento de las variables de salida en las formulaciones del DOE

Figura 21

Comportamiento de la capacidad espumante en las formulaciones del DOE

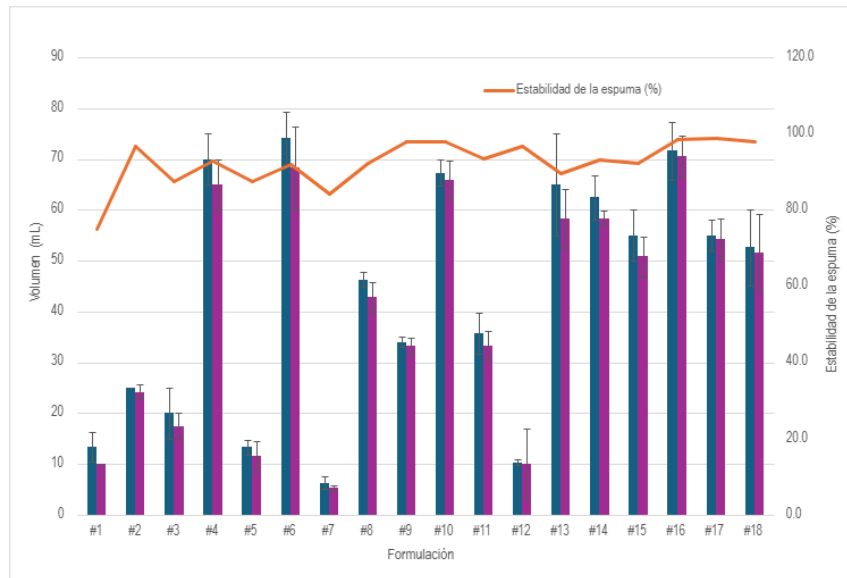


Figura 22

Comportamiento del pH en las formulaciones del DOE

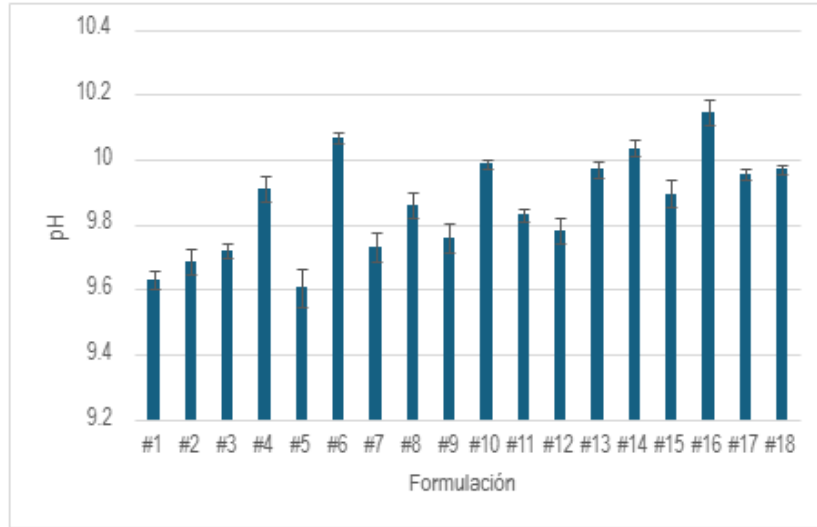


Figura 23

Comportamiento de la dureza en las formulaciones del DOE

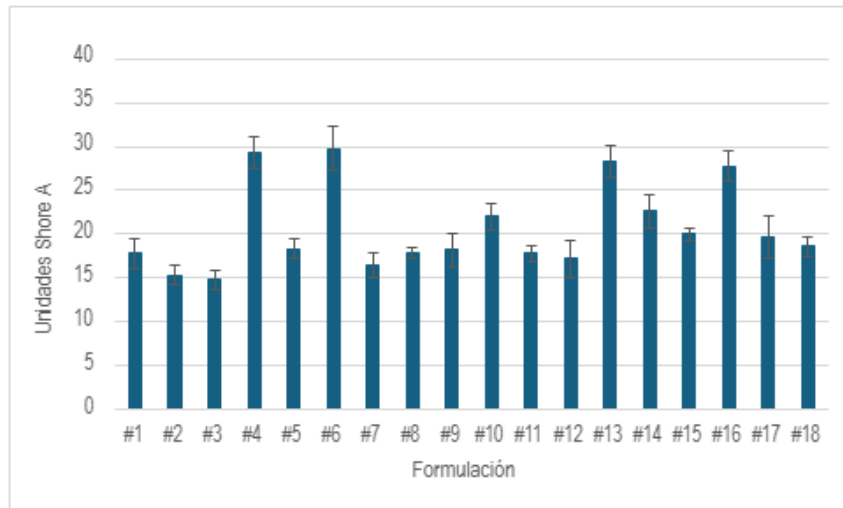


Figura 24

Comportamiento del cracking en las formulaciones del DOE

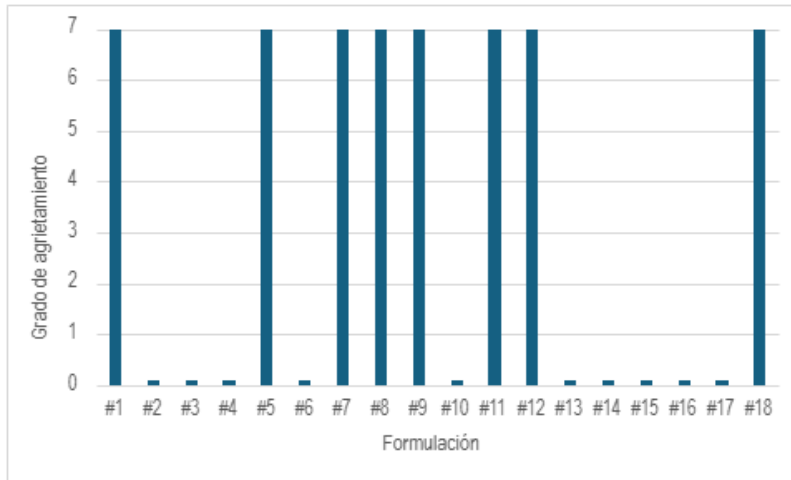
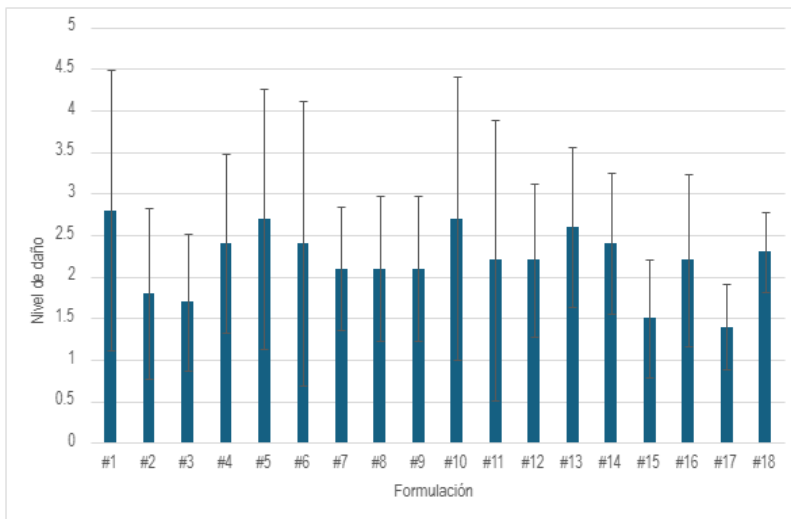
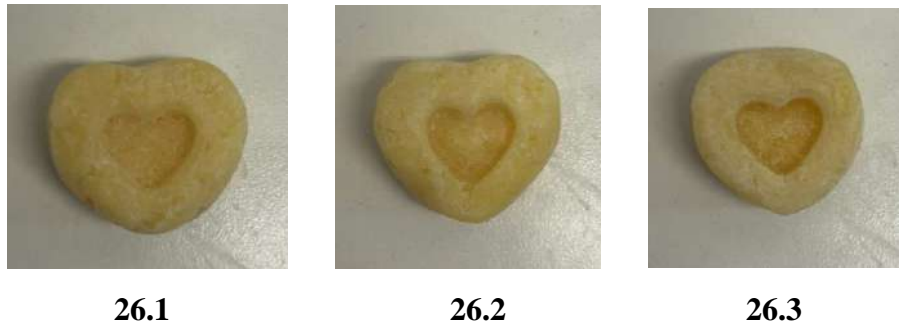


Figura 25

Comportamiento del daño capilar en las formulaciones del DOE



Apéndice K. Registro fotográfico de las formulaciones del diseño experimental (DOE)

Figura 26*Registro fotográfico de las formulaciones del diseño experimental (DOE)***Apéndice L. Análisis estadístico****Tabla 12***Análisis de varianza (ANOVA) para la capacidad espumante*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	9110.74	1518.46	38.25	0.000
Bloques	1	1.56	1.56	0.04	0.846
Lineal	2	9011.77	4505.88	113.52	0.000
NaOH	1	8672.56	8672.56	218.49	0.000
Miel	1	339.20	339.20	8.55	0.014
Cuadrado	2	96.75	48.37	1.22	0.333
NaOH*NaOH	1	95.39	95.39	2.40	0.149
Miel*Miel	1	1.36	1.36	0.03	0.856
Interacción de 2 factores	1	0.66	0.66	0.02	0.900
NaOH*Miel	1	0.66	0.66	0.02	0.900
Error	11	436.63	39.69		
Total	17	9547.37			

Figura 27

Gráfica de probabilidad normal de los residuos para la capacidad espumante

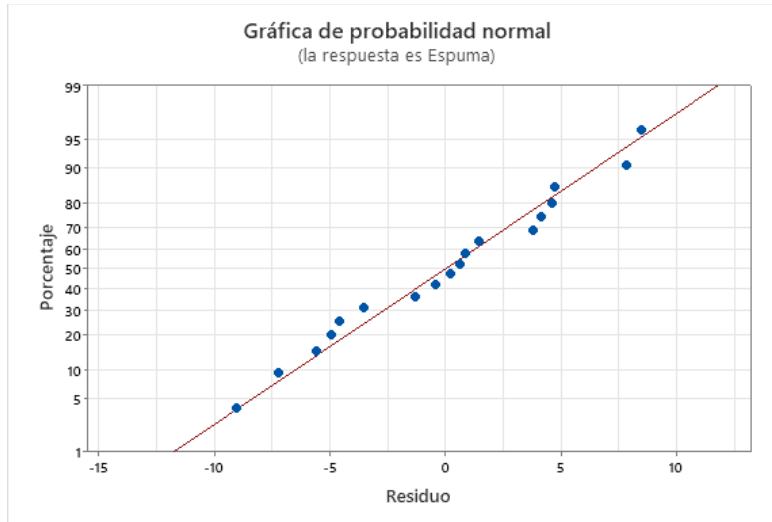


Figura 28

Gráfica de residuos vs ajustes para la capacidad espumante

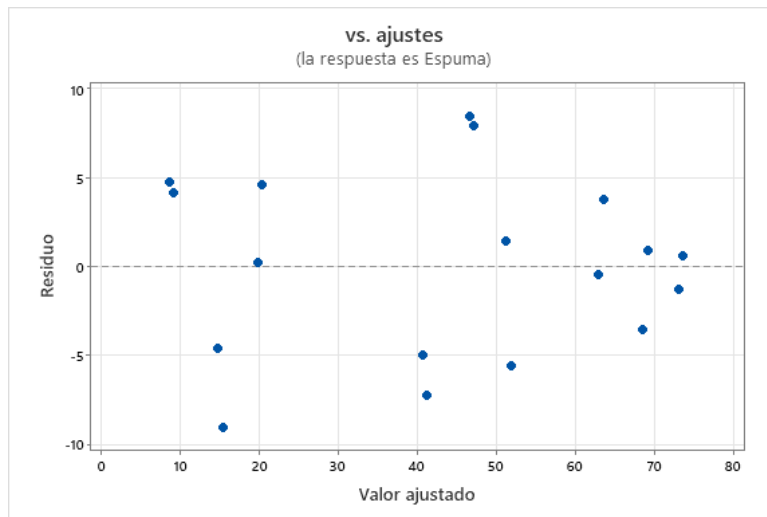


Figura 29

Gráfica de residuos vs orden para la capacidad espumante

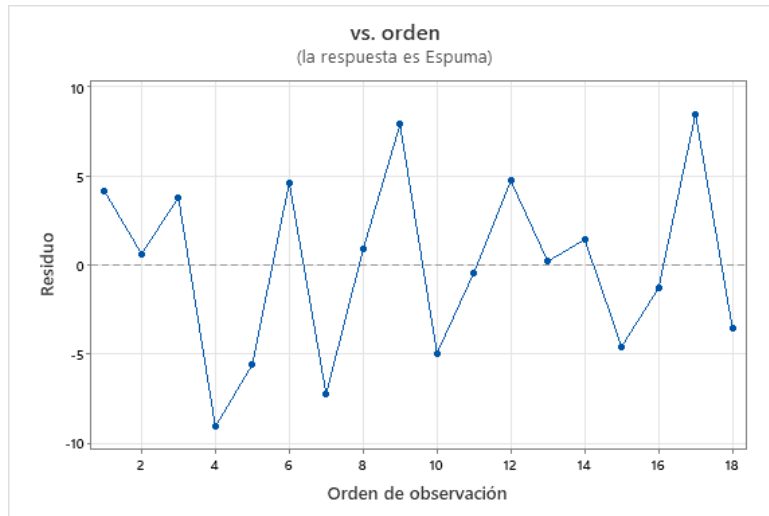


Tabla 13

Análisis de varianza (ANOVA) para el pH

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	0.369722	0.061620	15.50	0.000
Bloques	1	0.013339	0.013339	3.36	0.094
Lineal	2	0.353408	0.176704	44.45	0.000
NaOH	1	0.323408	0.323408	81.36	0.000
Miel	1	0.030000	0.030000	7.55	0.019
Cuadrado	2	0.002925	0.001463	0.37	0.700
NaOH*NaOH	1	0.002025	0.002025	0.51	0.490
Miel*Miel	1	0.000900	0.000900	0.23	0.644
Interacción de 2 factores	1	0.000050	0.000050	0.01	0.913
NaOH*Miel	1	0.000050	0.000050	0.01	0.913
Error	11	0.043728	0.003975		
Total	17	0.413450			

Figura 30

Gráfica de probabilidad normal de los residuos para el pH

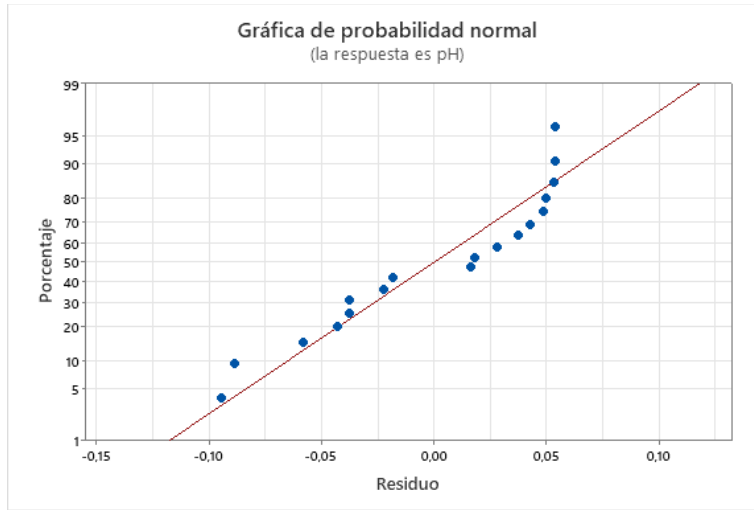


Figura 31

Gráfica de residuos vs ajustes para el pH

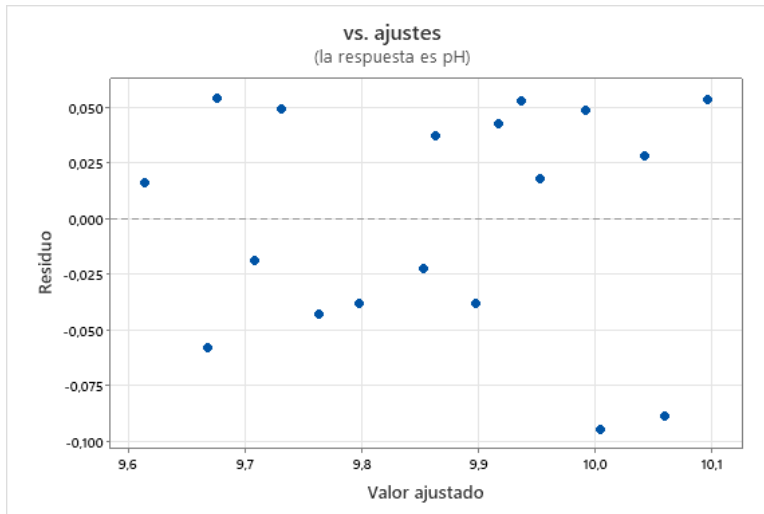


Figura 32

Gráfica de residuos vs orden para el pH

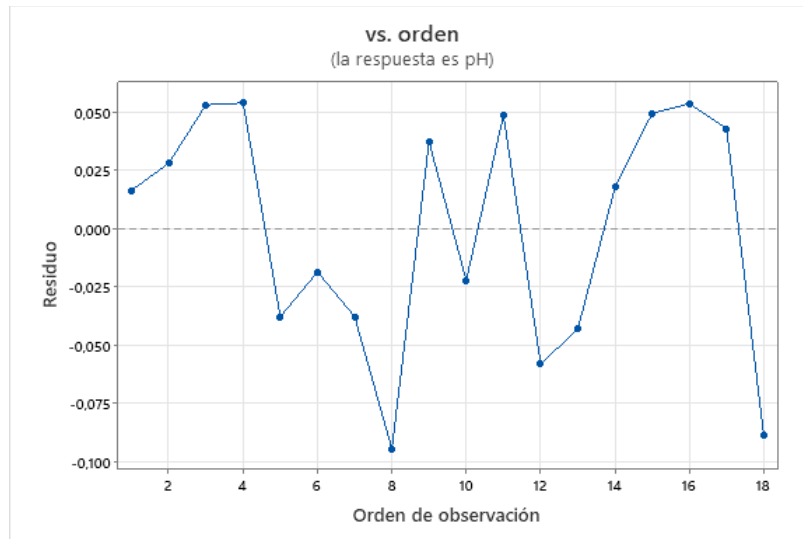


Tabla 14

Análisis de varianza (ANOVA) para el cracking

Fuente	GL	Chi-2	Valor p
Regresión	2	4.65	0.098
NaOH	1	4.39	0.036
Miel	1	1.73	0.189

Tabla 15

Análisis de varianza (ANOVA) para la dureza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	396.134	66.022	67.81	0.000
Bloques	1	0.180	0.180	0.18	0.676
Lineal	2	303.688	151.844	155.95	0.000
NaOH	1	299.001	299.001	307.08	0.000
Miel	1	4.687	4.687	4.81	0.051
Cuadrado	2	47.141	23.570	24.21	0.000
NaOH*NaOH	1	35.007	35.007	35.95	0.000
Miel*Miel	1	12.134	12.134	12.46	0.005
Interacción de 2 factores	1	45.125	45.125	46.34	0.000
NaOH*Miel	1	45.125	45.125	46.34	0.000
Error	11	10.711	0.974		

Total	17	406.844
--------------	----	---------

Figura 33

Gráfica de probabilidad normal de los residuos para la dureza

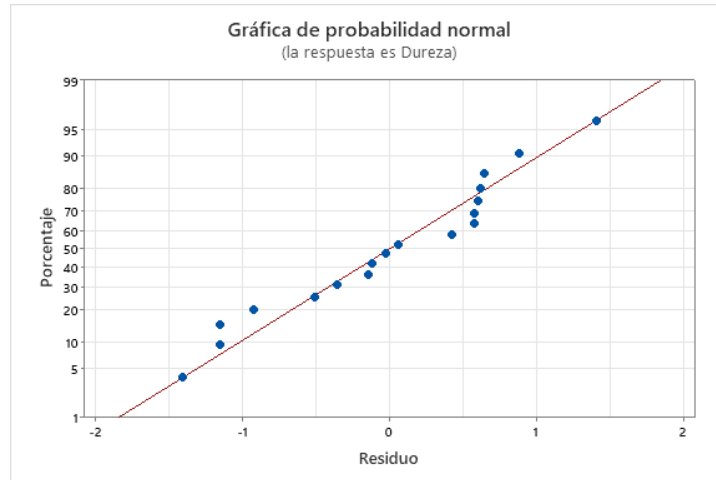


Figura 34

Gráfica de residuos vs ajustes para la dureza

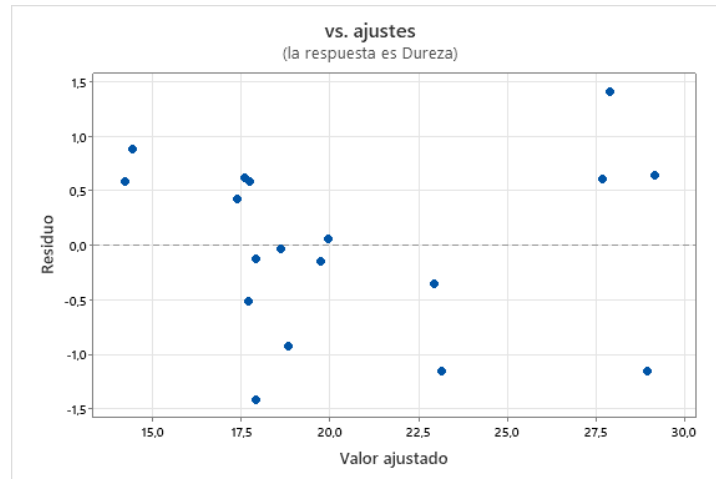


Figura 35

Gráfica de residuos vs orden para la dureza

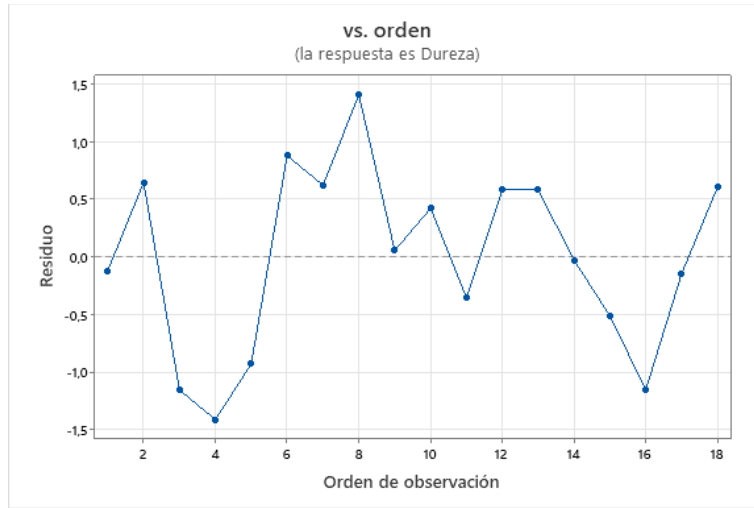


Tabla 16

Análisis de varianza (ANOVA) para el daño capilar

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	1.81681	0.302801	3.69	0.029
Bloques	1	0.00222	0.002222	0.03	0.872
Lineal	2	0.64333	0.321667	3.92	0.052
NaOH	1	0.16333	0.163333	1.99	0.186
Miel	1	0.48000	0.480000	5.85	0.034
Cuadrado	2	0.89000	0.445000	5.42	0.023
NaOH*NaOH	1	0.64000	0.640000	7.79	0.018
Miel*Miel	1	0.25000	0.250000	3.04	0.109
Interacción de 2 factores	1	0.28125	0.281250	3.43	0.091
NaOH*Miel	1	0.28125	0.281250	3.43	0.091
Error	11	0.90319	0.082109		

Figura 36

Gráfica de probabilidad normal de los residuos para el daño capilar

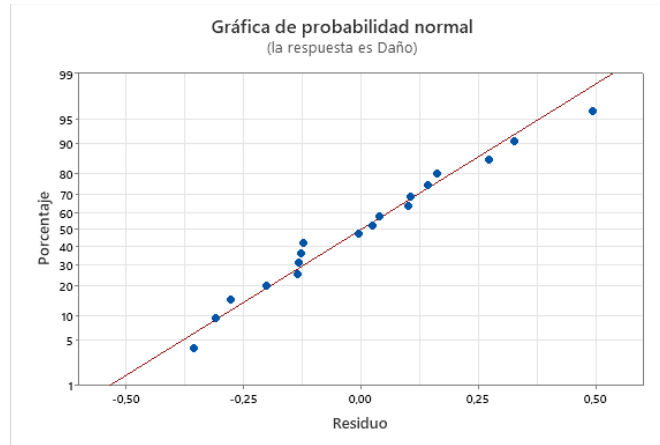


Figura 37

Gráfica de residuos vs ajustes para el daño capilar

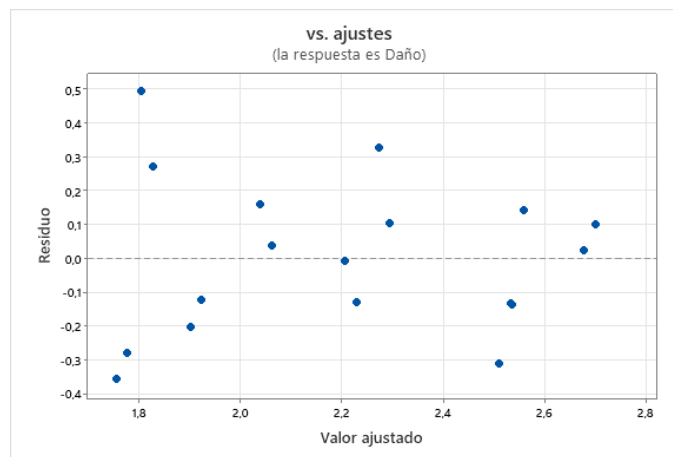


Figura 38

Gráfica de residuos vs orden para el daño capilar

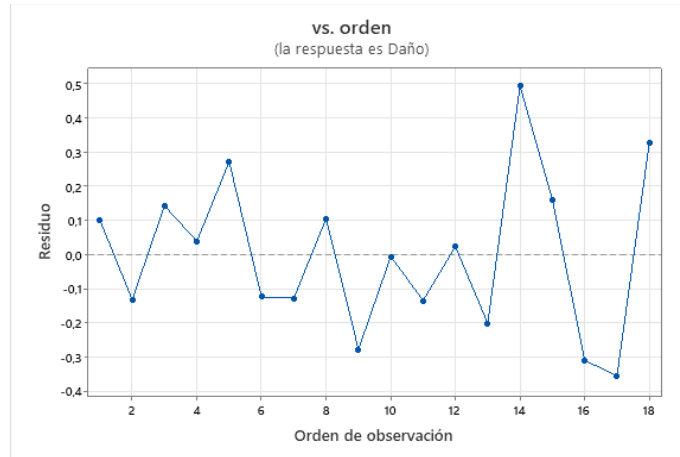


Tabla 17

Parámetros establecidos para las mejores condiciones mediante función de deseabilidad

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
Daño	Objetivo	1.4	2.0	2.8	1	1
Espuma	Máximo	6.3	74.2	—	1	1
Dureza	Objetivo	14.8	25.0	29.8	1	1

Tabla 18

Solución obtenida mediante función de deseabilidad para hallar la formulación con las mejores condiciones

Solución	NaOH	Miel	Daño	Espuma	Dureza	Deseabilidad
1	8.98485	4.79276	2.02524	64.3535	24.9940	0.938846

Tabla 19

Predicción de respuesta múltiple para la formulación con mejores condiciones

Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC 95 %	IP 95 %
Daño	2.025	0.125	(1.749 – 2.301)	(1.337 – 2.714)
Espuma	64.35	2.76	(58.29 – 70.42)	(49.22 – 79.49)
Dureza	24.994	0.432	(24.044 – 25.944)	(22.624 – 27.364)

Apéndice M. *Evidencia microscópica del daño capilar en las formulaciones evaluadas*

Figura 39

Evidencia microscópica en cabello sano



39.1

39.2

39.3

Figura 40

Evidencia microscópica en cabello con daño moderado



40.1

40.2

40.3

Figura 41

Evidencia microscópica en cabello con daño severo



41.1

41.2

41.3

Apéndice N. *Registro fotográfico de la formulación final*

Figura 42

Registro fotográfico de la formulación final



42.1



42.2



42.3