

ACONDICIONAMIENTO MINERAL DE LA FLUIDEZ A BAJA DOSIS EN PREMEZCLAS VITAMÍNICO-MINERALES PARA NUTRICIÓN DE RUMIANTES

Fundamento científico, jerarquía de la evidencia, consideraciones regulatorias y marco de validación para ACARISIN™

José M. López, BSc, MD, PhD, LLD (C)

Dirección Técnica y de I+D, INTABIOTECH S.L., España

Revisión técnica y marco de validación basado en hipótesis

Septiembre de 2026

Puntos destacados

- El acondicionamiento mineral superficial a baja dosis presenta un fundamento antiaglomerante científicamente plausible en premezclas.
- La mejora de la fluidez mediada por sílice depende de la matriz, la humedad y el proceso.
- La estabilidad física de la premezcla debe distinguirse de la estabilización química de las vitaminas.
- La humedad, la reactividad de los minerales traza y la colina son factores principales de estrés para la estabilidad vitamínica.
- Un estudio controlado de dosis-respuesta puede convertir la plausibilidad mecanística en alegaciones sustentadas.

Concepto de resumen gráfico

FACTORES DE ESTRÉS DE LA PREMEZCLA Humedad Partículas finas Minerales reactivos Colina	FALLO FÍSICO Cohesión Formación de puentes Apelmazamiento Segregación	ACARISIN™ Baja dosis Acondicionamiento mineral superficial	RESULTADO PRIMARIO Menor cohesión Mejor fluidez Mejor manipulación	HIPÓTESIS SECUNDARIA Microentorno físico más estable La retención vitamínica debe medirse por separado
---	--	---	--	---

Concepto de resumen gráfico. La vía principal de alegación es el acondicionamiento físico de la fluidez; la retención vitamínica sigue siendo un criterio analítico independiente.

Resumen

Las premezclas vitamínico-minerales son sistemas particulados tecnológicamente exigentes cuyo rendimiento depende de mucho más que de la composición nominal de nutrientes. La fluidez, la resistencia al apelmazamiento, el comportamiento frente a la segregación, la distribución de humedad, la reproducibilidad de la dosificación y la estabilidad química de los micronutrientes lábiles determinan conjuntamente si una premezcla puede aportar el valor para el que fue formulada durante su fabricación y almacenamiento. Estos retos son especialmente relevantes cuando las vitaminas coexisten con ingredientes higroscópicos y sales reactivas de minerales traza. ACARISIN™ es una preparación mineral seca propietaria que incorpora un componente de acondicionamiento superficial basado en sílice dentro de una matriz mineral procesada bajo una arquitectura mineral específica conocida como SGFT* (Single Grain Fusion Technology). La formulación cuantitativa, los parámetros de fabricación y los procesos son propietarios y no se revelan en esta revisión. La aplicación aquí evaluada consiste en una incorporación a baja dosis, de hasta 3 g/kg de premezcla vitamínico-mineral, antes de su posterior dilución en pienso compuesto para rumiantes o de su aplicación directa a seco. Este artículo examina críticamente el fundamento científico de dicho uso tecnológico. La literatura de ciencia de polvos muestra que los materiales silíceos adecuadamente dispersados pueden alterar las fuerzas cohesivas interparticulares, modificar la geometría de contacto, mejorar la fluidez y reducir la tendencia al apelmazamiento, con una eficacia condicionada por las propiedades de las partículas de la matriz, la humedad, las condiciones de mezclado y la concentración. En paralelo, la investigación sobre premezclas para alimentación animal demuestra que la estabilidad vitamínica está fuertemente influida por el tiempo de almacenamiento, la temperatura, la humedad, el cloruro de colina y la fuente, el tamaño de partícula y la reactividad de los minerales traza. Por tanto, la evidencia respalda un papel científicamente plausible de ACARISIN™ como sistema físico de acondicionamiento de la fluidez y antiaglomerante en premezclas vitamínico-minerales secas, pero no justifica describir el producto como estabilizador directo de vitaminas en ausencia de datos analíticos específicos del producto. Una mejora del comportamiento físico puede crear un microentorno más favorable para la retención de vitaminas; este beneficio secundario sigue siendo una hipótesis comprobable. Se propone un programa escalonado de validación que combine reología de polvos, resistencia al apelmazamiento, mediciones de humedad y actividad de agua, homogeneidad de la mezcla, ensayos de segregación y determinaciones longitudinales de

vitaminas. Esta jerarquía de evidencia proporciona una base sólida para el posicionamiento técnico, preservando al mismo tiempo la confidencialidad de la formulación propietaria, cuya protección resulta obligatoria conforme a las condiciones jurídicas y la legislación aplicable.

Palabras clave: ACARISIN™; antiaglomerante; premezcla para alimentación animal; flujo de polvos; sílice; estabilidad vitamínica; premezcla mineral; nutrición de rumiantes; reología de polvos; acondicionamiento tecnológico.

1. Introducción

Las premezclas son sistemas esenciales en la nutrición animal moderna porque permiten distribuir vitaminas, elementos traza y otros microingredientes en masas mucho mayores de pienso compuesto con un grado aceptable de homogeneidad. Por ello, su función industrial no es meramente composicional: también deben comportarse como sistemas particulados reproducibles durante el pesaje, mezclado, transferencia, ensacado, transporte, almacenamiento y dosificación final.

Las premezclas vitamínico-minerales son especialmente exigentes porque combinan partículas que difieren considerablemente en densidad, tamaño, morfología, higroscopicidad, comportamiento electrostático y química superficial. Una formulación puede ser nutricionalmente correcta sobre el papel y, sin embargo, comportarse mal si las partículas finas cohesivas forman puentes en una tolva, si la vibración provoca segregación por densidad, si la humedad favorece el apelmazamiento o si las superficies minerales reactivas aceleran la degradación de vitaminas sensibles. La calidad práctica de una premezcla es, por tanto, el resultado conjunto del diseño nutricional y de la ingeniería de polvos.

La mala fluidez de los polvos es un fenómeno multifactorial. Las fuerzas interparticulares de van der Waals, la atracción electrostática, las fuerzas capilares, la fricción y el enclavamiento mecánico pueden oponerse al movimiento de las partículas. A medida que disminuye el tamaño de partícula, las fuerzas superficiales adquieren progresivamente mayor importancia en relación con el peso de la partícula. La humedad puede intensificar la cohesión mediante capas de agua adsorbida, puentes capilares o procesos de disolución-recristalización. Por ello, las revisiones sobre flujo y apelmazamiento de polvos subrayan que ninguna métrica aislada predice adecuadamente el comportamiento industrial y que los ensayos deben reproducir los esfuerzos relevantes para la operación unitaria prevista (Shah et al., 2023; Chen et al., 2019).

La presente revisión evalúa una hipótesis tecnológica específica: si ACARISIN™, utilizado a baja concentración dentro de una premezcla vitamínico-mineral seca para nutrición de rumiantes, puede desempeñar un papel científicamente plausible como sistema de acondicionamiento de la fluidez y antiaglomerante. Una segunda cuestión relacionada es si la mejora del comportamiento físico podría favorecer la retención de vitaminas durante el almacenamiento. La distinción entre ambas cuestiones es esencial. La estabilización física de una matriz particulada y la estabilización química de las vitaminas pueden estar mecanísticamente relacionadas en determinadas circunstancias, pero no constituyen alegaciones equivalentes.

2. ACARISIN™: definición de la aplicación y límite de confidencialidad

ACARISIN™ es una preparación mineral seca propietaria desarrollada para aplicaciones alimentarias y de alimentación animal. Para el uso tecnológico aquí analizado, los atributos relevantes de la formulación son cualitativos: se trata de un sistema mineral seco procesado que incorpora un componente de acondicionamiento superficial basado en sílice y está diseñado para su dispersión homogénea en matrices secas. La composición cuantitativa exacta, los parámetros de ingeniería de partículas y las condiciones propietarias de procesado quedan deliberadamente fuera del alcance de este artículo.

La aplicación evaluada consiste en una incorporación de hasta 3 g/kg de premezcla vitamínico-mineral. Se trata de un uso tecnológico a nivel de premezcla; posteriormente, la preparación se diluye cuando la premezcla se incorpora al pienso compuesto. En consecuencia, los principales criterios de rendimiento son propiedades de la

propia premezcla: fluidez, cohesión, tendencia al apelmazamiento, comportamiento de descarga, resistencia a la segregación y mantenimiento de una distribución homogénea.

Este uso debe mantenerse conceptualmente separado de cualquier otra función prevista en el pienso terminado. Si un producto se utiliza con una finalidad distinta a nivel del pienso completo, dicha finalidad requiere su propia concentración efectiva, criterios de eficacia, evaluación de riesgos y análisis regulatorio. Una aplicación de acondicionamiento de premezclas a baja dosis no debe utilizarse como evidencia indirecta de una alegación diferente en el pienso final.

3. Fundamento de ciencia de polvos para el acondicionamiento mineral de la fluidez

3.1 Fuerzas interparticulares y fallo cohesivo

El flujo de los polvos refleja el equilibrio entre las fuerzas de cuerpo que favorecen el movimiento y las fuerzas interparticulares que se oponen a él. En partículas gruesas y densas puede dominar la gravedad; en polvos finos, las fuerzas superficiales adquieren comparativamente mayor importancia. La atracción de van der Waals, la carga electrostática, la rugosidad superficial y el enclavamiento de partículas pueden generar redes cohesivas. En condiciones húmedas, la humedad adsorbida añade mecanismos capilares y, en algunos sistemas cristalinos, mecanismos de puentes sólidos que pueden transformar un polvo de libre flujo en una masa apelmazada (Aguilera et al., 1995; Chen et al., 2019).

Por esta razón, el comportamiento industrial de una premezcla no puede inferirse con fiabilidad únicamente a partir de su aspecto visual. Un material puede fluir libremente inmediatamente después de su fabricación y, sin embargo, consolidarse durante el almacenamiento y desarrollar posteriormente formación de arcos, canalización (ratholing) o una descarga deficiente. A la inversa, un polvo que parezca algo cohesivo en un ensayo de ángulo de reposo puede comportarse aceptablemente en un dosificador bien diseñado. Shah et al. (2023) respaldan, por tanto, una caracterización mediante múltiples métodos, combinando normalmente índices sencillos con mediciones basadas en cizallamiento o métodos dinámicos.

3.2 Mecanismo de mejora de la fluidez mediado por sílice

Los acondicionadores de flujo basados en sílice han sido ampliamente estudiados como agentes de fluidez y antiaglomerantes. El trabajo mecanístico de Tran et al. (2019) mostró que la sílice coloidal puede mejorar el flujo de los polvos al adherirse a las superficies de las partículas de la matriz y alterar los contactos directos responsables de las fuerzas cohesivas interparticulares. La magnitud y la cinética de este efecto dependieron del tamaño de las partículas de la matriz, la textura superficial, la carga de sílice y el tiempo de mezclado. Por tanto, el mecanismo central es interfacial más que meramente volumétrico.

La consecuencia práctica es importante: pequeñas cantidades de un acondicionador particulado superficialmente activo y correctamente dispersado pueden modificar el comportamiento a granel de manera desproporcionada respecto de su contribución en masa. El efecto no es universalmente lineal con la dosis. Una cantidad insuficiente puede producir una modificación superficial incompleta, mientras que un exceso de material fino o una dispersión deficiente puede no aportar beneficios adicionales y, en algunas matrices, incluso empeorar la cohesión. Por ello, los ensayos de dosis-respuesta son científicamente más adecuados que asumir que el nivel máximo de incorporación es necesariamente el óptimo (Blanco et al., 2021; Ruzaidi et al., 2017).

Trabajos multiescala recientes en sistemas de sales cristalinas aportan evidencia mecanística adicional de que los enfoques antiaglomerantes basados en sílice pueden modificar la distribución del agua y suprimir los procesos de formación de puentes líquidos y sólidos asociados al apelmazamiento. Aunque una matriz de sal comestible no puede extrapolarse cuantitativamente a premezclas para alimentación animal, el estudio de Du et al. (2026) refuerza dos conceptos relevantes: la eficacia antiaglomerante es específica de la matriz y el control de la movilidad de la humedad puede ser tan importante como el simple contenido total de agua.

3.3 La humedad como modulador de la eficacia

La humedad modifica tanto la mecánica de las partículas como la química superficial. A niveles bajos, el agua puede adsorberse sobre las superficies de las partículas y modificar la fricción. A una actividad de agua local más elevada, las fuerzas capilares pueden aumentar la cohesión; en materiales cristalinos solubles, la disolución seguida de recristalización puede generar puentes sólidos mucho más resistentes. Los ciclos de humedad pueden ser, por tanto, más perjudiciales que un entorno moderado constante, ya que la sorción y desorción repetidas favorecen cambios estructurales (Chen et al., 2019).

Blanco et al. (2021) demostraron específicamente que la humedad modificaba la respuesta de los polvos a la sílice coloidal. Esta interacción resulta especialmente relevante para las premezclas vitamínico-minerales porque varios de sus componentes habituales son higroscópicos y porque la humedad también acelera el deterioro químico de los micronutrientes lábiles. Por ello, un acondicionador de premezclas eficaz debe evaluarse no solo en condiciones iniciales, sino también tras una exposición controlada a condiciones de humedad realistas y aceleradas.

4. Por qué las premezclas vitamínico-minerales constituyen una aplicación especialmente exigente

Las premezclas vitamínico-minerales para rumiantes pueden contener soportes de macrominerales, sales de minerales traza, microgránulos vitamínicos (beadlets) o adsorbatos, preparados de colina y otros microingredientes funcionales. Estos materiales pueden diferir en un orden de magnitud o más tanto en densidad como en tamaño de partícula. Tales diferencias generan un riesgo persistente de segregación durante el transporte interno, la vibración, la descarga y el transporte comercial.

Los componentes higroscópicos pueden desestabilizar aún más el sistema pulverulento. El cloruro de colina es especialmente relevante porque su capacidad de atraer agua puede aumentar la humedad local y se ha asociado repetidamente con una menor retención de vitaminas en las premezclas. Las sales reactivas de minerales traza añaden una segunda dimensión: el mismo mineral que es nutricionalmente necesario puede actuar como catalizador o reactivo directo en vías de degradación cuando se encuentra altamente concentrado dentro de una premezcla.

El acondicionamiento tecnológico tiene, por tanto, un valor que va más allá de una mejora meramente visual. Una mayor fluidez y una menor cohesión pueden favorecer una microdosificación más constante, reducir la formación de puentes y el reprocesado y ayudar potencialmente a conservar la homogeneidad espacial. Sin embargo, no puede suponerse que un acondicionador de flujo neutralice incompatibilidades químicas. Las dimensiones física y química de la estabilidad de la premezcla deben medirse por separado.

5. Estabilidad de las vitaminas en premezclas vitamínico-minerales

5.1 Tiempo de almacenamiento, temperatura y humedad relativa

Saensukjaroenphon et al. (2020) demostraron que la estabilidad de las vitaminas liposolubles está fuertemente influida por el tipo de premezcla y el entorno de almacenamiento. Las premezclas vitamínicas y vitamínico-minerales con minerales traza sometidas a condiciones de alta temperatura y alta humedad mostraron pérdidas progresivas superiores a las observadas en condiciones ambientales. El estudio resulta especialmente útil porque examina sistemas de premezcla y no vitaminas aisladas.

El mismo programa de investigación evaluó posteriormente vitaminas hidrosolubles y volvió a encontrar que la estabilidad dependía de la vitamina concreta, de la composición de la premezcla y de las condiciones de almacenamiento (Saensukjaroenphon et al., 2022). La riboflavina, el ácido pantoténico y la cobalamina no se comportaron de forma idéntica, lo que ilustra por qué una expresión genérica como «estabilidad vitamínica» puede ocultar diferencias importantes entre analitos.

Estos hallazgos justifican dos principios prácticos para la validación de ACARISIN™. En primer lugar, el almacenamiento en tiempo real debe seguir siendo la base principal de las conclusiones sobre vida útil. En segundo

lugar, la exposición acelerada a temperatura/humedad es valiosa como ensayo discriminatorio de estrés, pero no debe utilizarse para extrapolar mecánicamente la vida útil comercial salvo que exista una relación cinética validada.

5.2 Cloruro de colina y minerales traza reactivos

Yang et al. (2021) evaluaron premezclas vitamínicas y vitamínico-minerales con minerales traza durante periodos prolongados de almacenamiento y observaron que el cloruro de colina y las altas concentraciones de cobre y zinc incrementaban las pérdidas de varias vitaminas. El propio tiempo de almacenamiento constituyó un importante factor negativo. El estudio respalda la idea de que el diseño de las premezclas debe minimizar los contactos químicos evitables en lugar de depender exclusivamente de márgenes de sobreformulación vitamínica.

Trabajos más recientes han añadido detalle a escala de partícula. De Araujo et al. (2024) mostraron que la humedad y la fuente de cobre influían intensamente en la degradación de la vitamina A y que una fracción más fina y reactiva de sulfato de cobre producía un deterioro considerablemente mayor que una fuente de hidroxicoBRE menos reactiva. Este hallazgo es directamente relevante para la hipótesis aquí planteada porque demuestra que la pérdida vitamínica puede estar impulsada por contactos superficiales locales y por las características de las partículas, y no únicamente por la composición global.

En conjunto, estos estudios muestran que la estabilidad vitamínica está controlada por una red de factores: humedad, temperatura, tiempo, forma de los minerales traza, tamaño de partícula, colina, exposición al oxígeno y tecnología de protección de las vitaminas. Un acondicionador mineral de la fluidez puede influir en algunos de los factores físicos de esta red, pero no elimina la reactividad química subyacente de los ingredientes incompatibles.

6. ¿Puede el acondicionamiento físico mejorar la retención de vitaminas?

Existe una vía racional, aunque todavía no demostrada específicamente para el producto, por la que una mejora del acondicionamiento del polvo podría favorecer la retención de vitaminas. El apelmazamiento, la compactación y una dispersión deficiente pueden aumentar el contacto local entre las partículas vitamínicas y las superficies minerales reactivas. Una distribución heterogénea de la humedad puede crear microentornos con una actividad de agua sustancialmente distinta de la media global. La segregación también puede generar zonas locales enriquecidas en catalizadores o componentes higroscópicos.

Si un acondicionador reduce la cohesión, mejora la dispersión y limita el desarrollo de puentes intensos mediados por la humedad, puede reducir algunas de estas tensiones físicas locales. Este sería un mecanismo protector indirecto. Debe describirse como una hipótesis relativa al microentorno físico, no como actividad antioxidante ni como estabilización química directa.

La distinción es importante desde el punto de vista experimental. Una premezcla podría mostrar una fluidez y una resistencia al apelmazamiento claramente mejores mientras que la retención de vitaminas permaneciera estadísticamente inalterada. Ese resultado seguiría respaldando una función tecnológica valiosa. A la inversa, si la retención vitamínica mejorase significativamente, el beneficio adicional requeriría replicación e interpretación mecanística antes de presentarse como una alegación general de estabilización.

Una jerarquía de alegaciones científicamente madura sitúa, por tanto, en primer lugar el efecto antiaglomerante y el acondicionamiento de la fluidez; en segundo lugar, la estabilidad física de la premezcla; y únicamente después de una demostración analítica directa, la estabilización química de las vitaminas.

7. Jerarquía de la evidencia para la aplicación propuesta

La Tabla 1 separa la evidencia científica externa de la evidencia específica del producto que todavía es necesario generar. Esta jerarquía es deliberadamente conservadora y está diseñada para impedir que la plausibilidad mecanística se presente como eficacia demostrada de ACARISIN™.

Proposición	Evidencia externa	Estado específico de ACARISIN™	Afirmación defendible actualmente
El acondicionamiento superficial basado en sílice puede reducir la cohesión de los polvos	Sólido respaldo mecánico y experimental en distintos sistemas particulados	Mecanicamente aplicable; magnitud específica de la matriz no ensayada	Base científicamente plausible para evaluar el acondicionamiento de la fluidez
El acondicionamiento a baja dosis puede mejorar la fluidez	Respaldo; la respuesta depende de la dosis, dispersión y propiedades de las partículas de la matriz	La dosis-respuesta aún no se ha cuantificado en una premezcla representativa para rumiantes	Evaluar 1-3 g/kg frente a un control no tratado
Antiaglomeración / estabilidad física durante el almacenamiento	Respaldo por la ciencia del apelmazamiento y la literatura antiaglomerante sobre sílice	Se requieren datos de almacenamiento específicos del producto	Función antiaglomerante potencial, sujeta a validación en la matriz
Ausencia de efecto adverso sobre la retención vitamínica	No está garantizada por una mejora de la fluidez; debe medirse	Aún no establecido en la premezcla objetivo	Exigir no inferioridad vitamínica como criterio de seguridad/rendimiento
Estabilización directa de vitaminas	La literatura general identifica factores físicos contribuyentes, pero no existe equivalencia automática	No establecido	No alegar hasta demostrar analíticamente una retención superior
Higiene del pienso terminado u otra función en el pienso final	Cuestión independiente de eficacia y regulación	Fuera de esta vía de evidencia para el acondicionamiento de premezclas	Evaluar de forma independiente a la concentración efectiva en el pienso final

Tabla 1. Jerarquía de la evidencia y disciplina de alegaciones para el uso de ACARISIN™ a baja dosis en premezclas vitamínico-minerales.

8. Consideraciones regulatorias en la Unión Europea

El Reglamento (CE) n.º 1831/2003 establece el marco de la Unión para los aditivos destinados a la alimentación animal e incluye los antiaglomerantes y estabilizantes entre las funciones de los aditivos tecnológicos. Los antiaglomerantes se definen por su capacidad para reducir la tendencia de las partículas individuales del alimento para animales a adherirse unas a otras. Esta definición funcional se alinea estrechamente con la hipótesis tecnológica principal analizada en este artículo.

El mismo Reglamento establece un sistema de autorización específico para cada producto. En consecuencia, el hecho de que un mecanismo esté científicamente asociado a una función tecnológica reconocida no establece por sí mismo que una preparación propietaria pueda comercializarse bajo dicha función de aditivo. Antes del posicionamiento comercial deben verificarse la identidad regulatoria exacta de cada componente, las especificaciones y condiciones de uso autorizadas, la naturaleza de la preparación y el Registro de Aditivos para Piensos de la UE vigente.

El bicarbonato sódico figura en el Catálogo de materias primas para piensos de la UE bajo la entrada 11.4.2 [Reglamento (UE) n.º 68/2013 de la Comisión, en su versión modificada]. En la producción animal ecológica, las normas de ejecución consolidadas actualmente vigentes también reconocen determinados materiales silíceos entre los aglomerantes y antiaglomerantes. Estas disposiciones demuestran la relevancia regulatoria consolidada de los materiales minerales y basados en sílice en la tecnología de alimentación animal, pero no deben utilizarse para eludir el análisis de clasificación específico exigible a una preparación propietaria.

Cuando se formulen alegaciones en el etiquetado o presentación de materias primas para piensos o piensos compuestos, el artículo 13 del Reglamento (CE) n.º 767/2009 exige que dichas alegaciones sean objetivas, verificables y estén científicamente fundamentadas. Para los aditivos y las premezclas, siguen siendo centrales el acto de autorización y las disposiciones de etiquetado del Reglamento (CE) n.º 1831/2003. La implicación práctica es sencilla: el lenguaje técnico debe ajustarse a la solidez de la evidencia realmente disponible.

Para ACARISIN™, la posición científica inicial es, por tanto, la de un uso tecnológico basado en hipótesis y centrado en el flujo del polvo, la cohesión y el apelmazamiento, al margen de cualesquiera otras funciones tecnológicas conocidas y reconocidas. Una alegación directa de estabilización vitamínica debe reservarse para una

fase posterior, si los estudios analíticos comparativos demuestran una retención superior. Esta revisión constituye un marco científico y no sustituye un dictamen formal de clasificación jurídica sobre la especificación comercial final.

9. Marco propuesto de validación específica del producto

El siguiente paso apropiado es un programa comparativo controlado utilizando una premezcla vitamínico-mineral comercial representativa para rumiantes. El principio central del diseño consiste en mantener constantes la composición de la premezcla, los lotes de materias primas, el proceso de mezclado, el envasado y las condiciones de almacenamiento, variando únicamente el nivel de incorporación de ACARISIN™.

Un diseño de dosis-respuesta con cuatro niveles (0, 1, 2 y 3 g/kg de premezcla) proporciona un primer cribado práctico. Es preferible disponer de al menos tres lotes fabricados independientemente por tratamiento para que las conclusiones no dependan de un único evento de mezclado. La formulación sin tratamiento es esencial; las comparaciones basadas únicamente en la experiencia histórica son insuficientes porque el comportamiento de los polvos es muy sensible a las variaciones de materias primas y del entorno.

Área	Medición recomendada	Objetivo principal	Interpretación
Estado físico inicial	Distribución del tamaño de partícula; densidad aparente y compactada; humedad; actividad de agua	Caracterizar la matriz inicial	Necesario para interpretar la variabilidad entre lotes
Cribado simple de fluidez	Ángulo de reposo; índice de Carr; relación de Hausner; tiempo de flujo a través de orificio/descarga	Cribado comparativo rápido	Utilizar como evidencia de apoyo, no de forma aislada
Comportamiento mecánico del flujo	Función de flujo en celda de cizallamiento; cohesión; fricción interna; energía dinámica de flujo cuando esté disponible	Cuantificar el flujo dependiente del esfuerzo	Más útil para relevancia en tolvas/manipulación
Apelmazamiento	Almacenamiento consolidado; compresión controlada; resistencia al apelmazamiento o fuerza de rotura; ciclos de humedad	Medir el fallo físico dependiente del tiempo	Distingue la fluidez inicial de la estabilidad durante el almacenamiento
Homogeneidad	Trazador representativo o CV de un micronutriente antes y después de un ensayo de manipulación	Confirmar una distribución uniforme	Evaluar si la mejora de fluidez conserva la uniformidad de la mezcla
Segregación	Ensayo de vibración/transferencia con muestreo superior-medio-inferior	Cuantificar la segregación por densidad/tamaño	Importante para el transporte y la precisión del dosificador
Química vitamínica	Ensayos validados para A, D3, E y vitaminas B seleccionadas adecuadas a la formulación	Evaluar no inferioridad o superioridad	El criterio químico debe mantenerse separado de las métricas de fluidez
Interacción con el envase	Envase comercial estándar frente a referencia de alta barrera cuando proceda	Separar el efecto de la formulación del efecto del envase	Evita la confusión debida a la entrada de humedad

Tabla 2. Áreas analíticas recomendadas para la validación de ACARISIN™ en una premezcla vitamínico-mineral representativa.

9.1 Diseño del almacenamiento

Un brazo en tiempo real debe reproducir lo más fielmente posible el entorno comercial previsto y prolongarse durante toda la vida útil declarada de la premezcla. El muestreo en el momento de fabricación y a intervalos predefinidos debe cuantificar tanto los cambios físicos como los químicos. La temperatura y la humedad relativa deben registrarse de forma continua, ya que unas condiciones ambientales nominales pueden ocultar una variabilidad estacional considerable.

Puede utilizarse un brazo acelerado para una discriminación temprana. Los estudios de premezclas para alimentación animal han empleado con éxito condiciones en torno a 40 °C y 75 % de humedad relativa como estrés

de alta temperatura/alta humedad (Saensukjaroenphon et al., 2022). Estas condiciones son útiles para clasificar tratamientos y poner de manifiesto formulaciones débiles, pero el resultado acelerado no debe convertirse directamente en una alegación de vida útil comercial sin una cinética validada.

Si la formulación del cliente objetivo contiene preparados de colina muy higroscópicos o sales reactivas de cobre/hierro, es aconsejable una matriz de estrés de segunda fase. Esto permite ensayar el acondicionador allí donde los retos físicos y químicos son mayores y no únicamente en una premezcla relativamente poco exigente.

9.2 Jerarquía estadística y reglas de decisión

Los criterios principales deben corresponder a la función primaria propuesta: flujo y apelmazamiento. El tratamiento, el tiempo y su interacción deben analizarse mediante un modelo mixto apropiado, utilizando, cuando sea posible, el lote independiente como efecto aleatorio. Los patrones de dosis-respuesta son más informativos que una significación aislada entre pares porque permiten identificar un óptimo y no simplemente una diferencia.

En el caso de las vitaminas, la primera cuestión de desarrollo del producto debe ser la no inferioridad: ¿preserva ACARISIN™ la actividad vitamínica al menos tan bien como el control no tratado dentro de un margen analítico y comercial preespecificado? Solo después de establecer la no inferioridad debe evaluarse la superioridad. El margen debe justificarse previamente a partir de la precisión analítica, la especificación del producto y la variabilidad normal de la premezcla, y no seleccionarse retrospectivamente.

Esta jerarquía protege frente a un error probatorio frecuente: utilizar un resultado físico positivo para implicar un beneficio químico que nunca se midió. También genera resultados comercialmente útiles incluso si no existe superioridad en la retención vitamínica. Un acondicionador que mejore significativamente la manipulación sin perjudicar la retención de vitaminas sigue teniendo valor técnico.

10. Interpretación de los posibles resultados experimentales

Resultado observado	Conclusión científica	Posicionamiento técnico admisible
Mejora la fluidez; disminuye el apelmazamiento; vitaminas sin cambios	Acondicionador físico validado; no se detecta efecto químico	Beneficio de acondicionamiento de fluidez / antiaglomerante con compatibilidad vitamínica
Mejora la fluidez; la retención de vitaminas también mejora significativamente	Beneficio físico más señal secundaria de retención química	Investigar y replicar antes de formular una alegación de estabilidad vitamínica
Mejora la fluidez; una o más vitaminas disminuyen más rápidamente	Beneficio físico acompañado de interacción con la formulación	Reformular o restringir el uso; no alegar compatibilidad vitamínica
Sin mejora física significativa	La matriz/dosis/proceso no responde	No generalizar la eficacia; reevaluar dosis, dispersión o matriz objetivo
El efecto difiere según la dosis	Respuesta no lineal al acondicionamiento superficial	Definir el nivel óptimo de incorporación en lugar de asumir la dosis máxima

Tabla 3. Marco de decisión para interpretar el primer estudio de validación específico del producto.

11. Implicaciones industriales para la fabricación de premezclas

Si se valida, un acondicionador mineral a baja dosis podría aportar beneficios que van más allá de una apariencia visual de libre flujo. La reducción de la cohesión puede mejorar la descarga de tolvas, la reproducibilidad de los dosificadores, la velocidad de envasado y la manipulación por los operarios. Un menor apelmazamiento puede reducir la rotura manual de terrones, el reprocesado y las pérdidas de material. Una mayor estabilidad de la distribución también puede favorecer una dosificación más constante de microingredientes después del transporte.

Estos resultados tienen relevancia nutricional directa porque las especificaciones de nutrientes solo son significativas cuando el sistema de fabricación puede aportar de forma constante los microingredientes formulados.

La nutrición de precisión aumenta, en lugar de disminuir, la importancia de la ingeniería de partículas, ya que unos márgenes de seguridad menores exigen un control más estricto de la dosificación y la homogeneidad.

Por tanto, la propuesta de valor comercial debe formularse principalmente en torno a la robustez del proceso y la calidad física de la premezcla. Cualquier beneficio posterior sobre la retención de vitaminas debe presentarse como una propiedad adicional validada, y no como una premisa inicial.

12. Agenda de investigación más allá de la validación inicial

Una vez que un primer estudio en premezclas para rumiantes establezca un efecto físico reproducible, los trabajos posteriores deberán determinar los límites de la tecnología. Entre las variables prioritarias se incluyen la arquitectura mineral de la premezcla, la fuente de colina, la tecnología de protección vitamínica, la distribución del tamaño de partícula, la energía de mezclado, la humedad de almacenamiento y la barrera del envase.

Un programa factorial podría comparar minerales sulfato altamente solubles con fuentes minerales menos reactivas, preparados vitamínicos recubiertos frente a no recubiertos y matrices de baja frente a alta higroscopicidad. Este trabajo permitiría aclarar si ACARISIN™ actúa principalmente como acondicionador general de la fluidez o si su efecto resulta especialmente valioso en determinadas arquitecturas de premezcla de alto riesgo.

Una caracterización avanzada también podría estudiar la cobertura superficial mediante microscopía electrónica, la sorción dinámica de vapor, la RMN de bajo campo para estudiar la movilidad del agua y la reometría de polvos bajo consolidación. Estas técnicas no son necesarias para el control de calidad rutinario, pero pueden ayudar a relacionar el comportamiento macroscópico con el mecanismo y a construir una plataforma científica más sólida para futuras publicaciones.

13. Limitaciones

La principal limitación de esta revisión es deliberada: no presenta datos comparativos de eficacia específicos de ACARISIN™ porque dichos datos deben generarse prospectivamente. Por tanto, el artículo establece plausibilidad, límites de la evidencia y una vía de validación, en lugar de afirmar que la demostración ya está completada.

Gran parte de la literatura mecanística sobre sílice coloidal y flujo de polvos procede de sistemas farmacéuticos o de sistemas particulados generales y no específicamente de premezclas para alimentación animal. La transferencia de la física subyacente es razonable porque las fuerzas interparticulares, los puentes capilares y la modificación superficial son fenómenos generales, pero los tamaños de efecto cuantitativos no pueden trasladarse directamente entre matrices.

La literatura sobre estabilidad vitamínica es más directamente relevante para las premezclas destinadas a alimentación animal, aunque también demuestra una fuerte dependencia de la matriz. El comportamiento de una premezcla concreta para rumiantes dependerá de las formas vitamínicas reales, las fuentes minerales, los tamaños de partícula, los soportes, el contenido de colina, la humedad y el entorno de almacenamiento. Los ensayos específicos del producto siguen siendo indispensables.

Por último, este artículo no constituye un expediente de autorización regulatoria. El fundamento científico debe integrarse con una evaluación jurídica independiente de la especificación comercial exacta, las autorizaciones vigentes de aditivos para piensos, el etiquetado y las alegaciones previstas en cada mercado objetivo.

14. Conclusiones

Las premezclas vitamínico-minerales son sistemas de polvos complejos en los que la manipulación física y la estabilidad química de los micronutrientes interactúan, aunque siguen siendo analíticamente distintas. La ciencia de polvos consolidada muestra que el acondicionamiento superficial basado en sílice puede reducir las fuerzas cohesivas interparticulares y mejorar el flujo de los polvos, mientras que la ciencia del apelmazamiento identifica la

distribución de humedad y la formación de puentes interparticulares como determinantes clave del fallo durante el almacenamiento.

La investigación sobre premezclas para alimentación animal demuestra de forma independiente que la estabilidad vitamínica está fuertemente afectada por el tiempo, la temperatura, la humedad, el cloruro de colina y la forma química y las características de partícula de los minerales traza reactivos. Estos hallazgos proporcionan una base científica coherente para investigar ACARISIN™ como acondicionador físico a baja dosis en premezclas vitamínico-minerales para nutrición de rumiantes.

La evidencia actual respalda una hipótesis plausible de efecto antiaglomerante y acondicionamiento de la fluidez. Todavía no justifica una alegación directa de que ACARISIN™ estabilice químicamente las vitaminas. Por tanto, la secuencia científica adecuada consiste en demostrar primero una mejora del comportamiento físico, confirmar una retención vitamínica no inferior y, solo entonces, evaluar si existe un beneficio secundario reproducible sobre la retención de vitaminas.

Un estudio controlado de dosis-respuesta utilizando premezclas comerciales representativas puede convertir este fundamento en evidencia específica del producto sin revelar la formulación cuantitativa propietaria. Un enfoque guiado por la evidencia de este tipo proporciona la base más sólida para un posicionamiento técnicamente robusto, comercialmente útil y defendible desde el punto de vista regulatorio.

Declaraciones

Contribuciones del autor

José M. López: conceptualización; planteamiento técnico; metodología; síntesis bibliográfica; interpretación regulatoria; redacción - borrador original; redacción - revisión y edición; supervisión.

Conflicto de intereses

El autor es Director Técnico y Director de I+D de INTABIOTECH S.L., empresa que comercializa ACARISIN™. Este interés comercial constituye un potencial conflicto de intereses y se declara de forma transparente. El manuscrito distingue deliberadamente la evidencia científica externa de las hipótesis específicas del producto y no atribuye datos de eficacia que no hayan sido generados.

Financiación

No se recibió financiación externa para esta revisión. La preparación del manuscrito fue financiada internamente por INTABIOTECH S.L.

Disponibilidad de datos

No se generó ningún conjunto nuevo de datos experimentales para esta revisión. El análisis científico se basa en la literatura pública citada y en características técnicas no cuantitativas de la preparación propietaria. Los datos de rendimiento específicos del producto requerirán validación prospectiva.

Declaración sobre la formulación propietaria

La composición cuantitativa y los parámetros propietarios de fabricación de ACARISIN™ constituyen información industrial confidencial y no se revelan intencionadamente. Las conclusiones científicas de esta revisión no dependen de la publicación de dichos detalles confidenciales.

Declaración ética

No procede. Esta revisión no implicó participantes humanos, animales ni nueva experimentación biológica.

Referencias

- Aguilera, J. M., del Valle, J. M., & Karel, M. (1995). Caking phenomena in amorphous food powders. *Trends in Food Science & Technology*, 6(5), 149-155. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(00\)89023-8](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(00)89023-8)
- Blanco, D., Antikainen, O., Räikkönen, H., Yliruusi, J., & Juppo, A. M. (2021). Effect of colloidal silicon dioxide and moisture on powder flow properties: Predicting in-process performance using image-based analysis. *International Journal of Pharmaceutics*, 597, 120344. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2021.120344>
- Chen, M., Zhang, D., Dong, W., Luo, Z., Kang, C., Li, H., Wang, G., & Gong, J. (2019). Amorphous and humidity caking: A review. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 27(6), 1429-1438. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.02.004>
- Commission Implementing Regulation (EU) 2021/1165 authorising certain products and substances for use in organic production and establishing their lists. Consolidated text. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2021/1165
- Commission Regulation (EU) No 68/2013 on the Catalogue of feed materials, as amended, including Commission Regulation (EU) 2022/1104. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2013/68>
- De Araujo, D. B., Boerboom, G. M., Busink, R., & Grandia, J. (2024). Effects of particle size and trace mineral source on vitamin stability in premix. *Journal of Animal Science*, 102(Supplement 3), 81. <https://doi.org/10.1093/jas/skae234.090>
- Du, W., Chen, P., Lai, X., Tang, N., Zhu, K., & Li, W. (2026). Mechanism of anticaking agents on the caking behavior of edible salt. *Journal of Food Engineering*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2026.113245>
- European Parliament and Council. (2003). Regulation (EC) No 1831/2003 on additives for use in animal nutrition. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2003/1831/oj>
- European Parliament and Council. (2009). Regulation (EC) No 767/2009 on the placing on the market and use of feed. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2009/767/oj>
- Ruzaidi, A. F. B., Mandal, U. K., & Chatterjee, B. (2017). Glidant effect of hydrophobic and hydrophilic nanosilica on a cohesive powder: Comparison of different flow characterization techniques. *Particuology*, 31, 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2016.04.006>
- Saensukjaroenphon, M., Evans, C. E., Paulk, C. B., Gebhardt, J. T., Woodworth, J. C., Stark, C. R., Bergstrom, J. R., & Jones, C. K. (2020). Impact of storage conditions and premix type on fat-soluble vitamin stability. *Translational Animal Science*, 4(3), txaa143. <https://doi.org/10.1093/tas/txaa143>
- Saensukjaroenphon, M., Jones, C. K., Evans, C. E., Gebhardt, J. T., Woodworth, J. C., Stark, C. R., Bergstrom, J. R., & Paulk, C. B. (2022). Impact of storage conditions and premix type on water-soluble vitamin stability. *Translational Animal Science*, 6(4), txac135. <https://doi.org/10.1093/tas/txac135>
- Shah, D. S., Moravkar, K. K., Jha, D. K., Lonkar, V., Amin, P. D., & Chalikwar, S. S. (2023). A concise summary of powder processing methodologies for flow enhancement. *Heliyon*, 9(6), e16498. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16498>
- Tran, D. T., Majerová, D., Veselý, M., Kulaviak, L., Ruzicka, M. C., & Zámotný, P. (2019). On the mechanism of colloidal silica action to improve flow properties of pharmaceutical excipients. *International Journal of Pharmaceutics*, 556, 383-394. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2018.11.066>
- Yang, P., Wang, H. K., Zhu, M., Li, L. X., & Ma, Y. X. (2021). Degradation kinetics of vitamins in premixes for pig: Effects of choline, high concentrations of copper and zinc, and storage time. *Animal Bioscience*, 34(4), 701-713. <https://doi.org/10.5713/ajas.20.0026>

© 2026 · José M. López · Todos los derechos reservados

Servicio de Publicaciones INTABIOTECH

Botiguers, 3, 46980, Paterna, Valencia, España