

CONDICIONAMENTO MINERAL DA FLUIDEZ A BAIXA DOSE EM PRÉ-MISTURAS VITAMÍNICO- MINERAIS PARA NUTRIÇÃO DE RUMINANTES

Fundamentação científica, hierarquia da evidência, considerações regulamentares e enquadramento de validação para ACARISIN™

José M. López, BSc, MD, PhD, LLD (C)

Direção Técnica e de I&D, INTABIOTECH S.L., Espanha

Revisão técnica e enquadramento de validação orientado por hipóteses

Setembro de 2026

Destaques

- O condicionamento mineral superficial a baixa dose apresenta uma fundamentação antiaglomerante cientificamente plausível em pré-misturas.
- A melhoria da fluidez mediada por sílica depende da matriz, da humidade e do processo.
- A estabilidade física da pré-mistura deve ser distinguida da estabilização química das vitaminas.
- A humidade, a reatividade dos minerais vestigiais e a colina são importantes fatores de stress para a estabilidade vitamínica.
- Um estudo controlado de dose-resposta pode converter a plausibilidade mecanística em alegações devidamente fundamentadas.

Conceito de resumo gráfico

FATORES DE STRESS DA PRÉ-MISTURA Humidade Partículas finas Minerais reativos Colina	FALHA FÍSICA Coesão Formação de pontes Aglomerção Segregação	ACARISIN™ Baixa dose Condicionamento mineral superficial	RESULTADO PRIMÁRIO Menor coesão Melhor fluidez Melhor manuseamento	HIPÓTESE SECUNDÁRIA Microambiente físico mais estável A retenção vitamínica deve ser medida separadamente
--	---	---	--	--

Conceito de resumo gráfico. A principal via de alegação é o condicionamento físico da fluidez; a retenção vitamínica permanece um parâmetro analítico independente.

Resumo

As pré-misturas vitamínico-minerais são sistemas particulados tecnologicamente exigentes, cujo desempenho depende de muito mais do que da composição nominal de nutrientes. A escoabilidade, a resistência à aglomeração, o comportamento de segregação, a distribuição da humidade, a reprodutibilidade da dosagem e a estabilidade química dos micronutrientes lábeis determinam, em conjunto, se uma pré-mistura consegue fornecer o valor para o qual foi formulada durante o fabrico e o armazenamento. Estes desafios são particularmente relevantes quando as vitaminas coexistem com ingredientes higroscópicos e sais reativos de minerais vestigiais. ACARISIN™ é uma preparação mineral seca proprietária que incorpora um componente de condicionamento superficial à base de sílica numa matriz mineral processada sob uma arquitetura mineral específica conhecida como SGFT* (Single Grain Fusion Technology). A formulação quantitativa, os parâmetros de fabrico e os processos são proprietários e não são divulgados nesta revisão. A aplicação aqui avaliada consiste numa incorporação a baixa dose, até 3 g/kg de pré-mistura vitamínico-mineral, antes da posterior diluição em alimento composto para ruminantes ou da aplicação direta a seco. Este artigo examina criticamente a fundamentação científica deste uso tecnológico. A literatura de ciência dos pós demonstra que materiais siliciosos adequadamente dispersos podem perturbar as forças coesivas interparticulares, alterar a geometria de contacto, melhorar a fluidez e reduzir a tendência para a aglomeração, sendo a eficácia condicionada pelas propriedades das partículas da matriz, pela humidade, pelas condições de mistura e pela concentração. Em paralelo, a investigação sobre pré-misturas para alimentação animal demonstra que a estabilidade vitamínica é fortemente influenciada pelo tempo de armazenamento, temperatura, humidade, cloreto de colina e pela fonte, tamanho de partícula e reatividade dos minerais vestigiais. A evidência sustenta, portanto, um papel cientificamente plausível para ACARISIN™ como sistema físico de condicionamento da fluidez e antiaglomerante em pré-misturas vitamínico-minerais secas, mas não justifica a descrição do produto como estabilizador direto de vitaminas sem dados analíticos específicos do produto. Um melhor comportamento físico pode criar um microambiente mais favorável à retenção vitamínica; esse benefício secundário continua a ser uma hipótese testável. Propõe-se um programa escalonado de validação que combine reologia de pós, resistência à aglomeração, medições de humidade e atividade da água, homogeneidade da mistura, ensaios de segregação e

determinações longitudinais de vitaminas. Esta hierarquia de evidência fornece uma base robusta para o posicionamento técnico, preservando simultaneamente a confidencialidade da formulação proprietária, cuja proteção é obrigatória nos termos das condições jurídicas e da legislação aplicável.

Palavras-chave: ACARISIN™; antiaglomerante; pré-mistura para alimentação animal; escoamento de pós; sílica; estabilidade vitamínica; pré-mistura mineral; nutrição de ruminantes; reologia de pós; condicionamento tecnológico.

1. Introdução

As pré-misturas são sistemas essenciais na nutrição animal moderna, pois permitem distribuir vitaminas, elementos vestigiais e outros microingredientes por massas muito superiores de alimento composto, com um grau aceitável de homogeneidade. A sua função industrial não é, portanto, meramente composicional: devem também comportar-se como sistemas particulados reprodutíveis durante a pesagem, mistura, transferência, ensacamento, transporte, armazenamento e dosagem final.

As pré-misturas vitamínico-minerais são particularmente exigentes porque combinam partículas que diferem substancialmente em densidade, tamanho, morfologia, higroscopicidade, comportamento eletrostático e química superficial. Uma formulação pode estar nutricionalmente correta no papel e, ainda assim, apresentar um desempenho deficiente se partículas finas coesivas formarem pontes numa tremonha, se a vibração provocar segregação por densidade, se a humidade favorecer a aglomeração ou se superfícies minerais reativas acelerarem a degradação de vitaminas sensíveis. A qualidade prática de uma pré-mistura é, consequentemente, o resultado conjunto do desenho nutricional e da engenharia de pós.

A fraca escoabilidade dos pós é um fenómeno multifatorial. As forças interparticulares de van der Waals, a atração eletrostática, as forças capilares, a fricção e o interbloqueio mecânico podem opor-se ao movimento das partículas. À medida que o tamanho das partículas diminui, as forças superficiais tornam-se progressivamente mais importantes relativamente ao peso das partículas. A humidade pode intensificar a coesão através de camadas de água adsorvida, pontes capilares ou processos de dissolução-recristalização. As revisões sobre escoamento e aglomeração de pós salientam, por isso, que nenhuma métrica isolada prevê adequadamente o comportamento industrial e que os ensaios devem reproduzir os esforços relevantes para a operação unitária pretendida (Shah et al., 2023; Chen et al., 2019).

A presente revisão avalia uma hipótese tecnológica específica: se ACARISIN™, utilizado a baixa concentração numa pré-mistura vitamínico-mineral seca para nutrição de ruminantes, pode desempenhar um papel cientificamente plausível como sistema de condicionamento da fluidez e antiaglomerante. Uma segunda questão relacionada é saber se a melhoria do comportamento físico poderá favorecer a retenção vitamínica durante o armazenamento. A distinção entre estas questões é central. A estabilização física de uma matriz particulada e a estabilização química das vitaminas podem estar mecanisticamente relacionadas em determinadas circunstâncias, mas não constituem alegações equivalentes.

2. ACARISIN™: definição da aplicação e limite de confidencialidade

ACARISIN™ é uma preparação mineral seca proprietária desenvolvida para aplicações alimentares e de alimentação animal. Para o uso tecnológico aqui analisado, os atributos relevantes da formulação são qualitativos: trata-se de um sistema mineral seco processado que incorpora um componente de condicionamento superficial à base de sílica e foi concebido para dispersão homogénea em matrizes secas. A composição quantitativa exata, os parâmetros de engenharia de partículas e as condições proprietárias de processamento ficam deliberadamente fora do âmbito deste artigo.

A aplicação em avaliação consiste na incorporação até 3 g/kg de pré-mistura vitamínico-mineral. Trata-se de um uso tecnológico ao nível da pré-mistura; a preparação é posteriormente diluída quando a pré-mistura é adicionada ao alimento composto. Consequentemente, os principais parâmetros de desempenho são propriedades da própria pré-mistura: escoabilidade, coesão, tendência para a aglomeração, comportamento de descarga, resistência à segregação e manutenção de uma distribuição homogénea.

Este uso deve manter-se conceptualmente separado de qualquer outra função pretendida no alimento final. Se um produto for utilizado com uma finalidade distinta ao nível do alimento completo, essa finalidade requer a sua própria concentração efetiva, parâmetros de eficácia, avaliação de risco e análise regulamentar. Uma aplicação de condicionamento de pré-mistura a baixa dose não deve ser utilizada como evidência indireta para uma alegação diferente no alimento final.

3. Base de ciência dos pós para o condicionamento mineral da fluidez

3.1 Forças interparticulares e falha coesiva

O escoamento dos pós reflete o equilíbrio entre as forças de corpo que promovem o movimento e as forças interparticulares que lhe resistem. Em partículas grossas e densas, a gravidade pode dominar; em pós finos, as forças superficiais tornam-se comparativamente mais importantes. A atração de van der Waals, a carga eletrostática, a rugosidade superficial e o interbloqueio das partículas podem criar redes coesivas. Em condições húmidas, a humidade adsorvida acrescenta mecanismos capilares e, em alguns sistemas cristalinos, mecanismos de pontes sólidas capazes de transformar um pó de livre escoamento numa massa aglomerada (Aguilera et al., 1995; Chen et al., 2019).

Por esta razão, o comportamento industrial de uma pré-mistura não pode ser inferido de forma fiável apenas pela aparência visual. Um material pode escoar livremente imediatamente após o fabrico e, contudo, consolidar-se durante o armazenamento, desenvolvendo posteriormente formação de arcos, canalização (ratholing) ou descarga deficiente. Inversamente, um pó que pareça algo coesivo num ensaio de ângulo de repouso pode apresentar um desempenho aceitável num doseador bem concebido. Shah et al. (2023) sustentam, por isso, uma caracterização multimétodo, normalmente combinando índices simples com medições baseadas em cisalhamento ou métodos dinâmicos.

3.2 Mecanismo de melhoria da fluidez mediado por sílica

Os condicionadores de fluxo à base de sílica têm sido amplamente estudados como agentes de fluidez e antiaglomerantes. O trabalho mecanístico de Tran et al. (2019) demonstrou que a sílica coloidal pode melhorar o escoamento dos pós ao aderir às superfícies das partículas da matriz e perturbar os contactos diretos responsáveis pelas forças coesivas interparticulares. A magnitude e a cinética deste efeito dependeram do tamanho das partículas da matriz, da textura superficial, da carga de sílica e do tempo de mistura. O mecanismo central é, portanto, interfacial e não simplesmente volumétrico.

A consequência prática é importante: pequenas quantidades de um condicionador particulado superficialmente ativo, devidamente disperso, podem alterar o comportamento a granel de forma desproporcionada em relação à sua contribuição em massa. O efeito não é universalmente linear com a dose. Quantidade insuficiente pode proporcionar modificação superficial incompleta, enquanto excesso de material fino ou dispersão deficiente pode não produzir benefício adicional e, em algumas matrizes, até agravar a coesão. Os ensaios de dose-resposta são, por isso, cientificamente mais adequados do que assumir que o nível máximo de incorporação é necessariamente o ótimo (Blanco et al., 2021; Ruzaidi et al., 2017).

Trabalhos multiescala recentes em sistemas de sais cristalinos fornecem evidência mecanística adicional de que abordagens antiaglomerantes à base de sílica podem alterar a distribuição da água e suprimir os processos de formação de pontes líquidas e sólidas associados à aglomeração. Embora uma matriz de sal alimentar não possa ser transferida quantitativamente para pré-misturas de alimentação animal, o estudo de Du et al. (2026) reforça dois conceitos relevantes: a eficácia antiaglomerante é específica da matriz e o controlo da mobilidade da humidade pode ser tão importante como o simples teor total de água.

3.3 A humidade como moderador da eficácia

A humidade altera tanto a mecânica das partículas como a química superficial. Em níveis baixos, a água pode adsorver-se nas superfícies das partículas e alterar a fricção. A atividade de água local mais elevada pode aumentar a coesão através de forças capilares; em materiais cristalinos solúveis, a dissolução seguida de recristalização pode gerar pontes sólidas muito mais resistentes. Os ciclos de humidade podem, por isso, ser mais prejudiciais do que um ambiente moderado constante, porque a sorção e a desorção repetidas promovem alterações estruturais (Chen et al., 2019).

Blanco et al. (2021) demonstraram especificamente que a humidade alterava a resposta dos pós à sílica coloidal. Esta interação é altamente relevante para pré-misturas vitamínico-minerais, porque vários componentes comuns são higroscópicos e porque a humidade também acelera a deterioração química de micronutrientes lábeis. Um condicionador de pré-mistura eficaz deve, portanto, ser avaliado não apenas no estado inicial, mas também após exposição controlada a condições realistas e aceleradas de humidade.

4. Porque as pré-misturas vitamínico-minerais são uma aplicação particularmente exigente

As pré-misturas vitamínico-minerais para ruminantes podem conter suportes de macrominerais, sais de minerais vestigiais, microgrânulos vitamínicos (beadlets) ou adsorvatos, preparações de colina e outros microingredientes funcionais. Estes materiais podem diferir em uma ordem de grandeza ou mais tanto em densidade como em tamanho de partícula. Tais diferenças criam um risco persistente de segregação durante o transporte interno, vibração, descarga e transporte comercial.

Os componentes higroscópicos podem desestabilizar ainda mais o sistema pulverulento. O cloreto de colina é particularmente relevante porque o seu comportamento de atração de água pode aumentar a humidade local e tem sido repetidamente associado a menor retenção vitamínica em pré-misturas. Os sais reativos de minerais vestigiais acrescentam uma segunda dimensão: o mesmo mineral necessário do ponto de vista nutricional pode atuar como catalisador ou reagente direto em vias de degradação quando se encontra altamente concentrado numa pré-mistura.

O condicionamento tecnológico tem, portanto, valor para além de uma melhoria meramente visual. Uma melhor fluidez e menor coesão podem favorecer uma microdosagem mais consistente, reduzir a formação de pontes e o retrabalho e potencialmente ajudar a preservar a homogeneidade espacial. Contudo, não se pode assumir que um condicionador de fluxo neutralize incompatibilidades químicas. As dimensões física e química da estabilidade da pré-mistura devem ser medidas separadamente.

5. Estabilidade das vitaminas em pré-misturas vitamínico-minerais

5.1 Tempo de armazenamento, temperatura e humidade relativa

Saensukjaroenphon et al. (2020) demonstraram que a estabilidade das vitaminas lipossolúveis é fortemente influenciada pelo tipo de pré-mistura e pelo ambiente de armazenamento. Pré-misturas vitamínicas e vitamínico-minerais com minerais vestigiais submetidas a condições de temperatura e humidade elevadas apresentaram perdas progressivas superiores às observadas em condições ambiente. O estudo é particularmente útil porque examina sistemas de pré-mistura e não vitaminas isoladas.

O mesmo programa de investigação avaliou posteriormente vitaminas hidrossolúveis e voltou a verificar que a estabilidade dependia da vitamina específica, da composição da pré-mistura e das condições de armazenamento (Saensukjaroenphon et al., 2022). Riboflavina, ácido pantoténico e cobalamina não se comportaram de forma idêntica, ilustrando por que razão uma expressão genérica como «estabilidade vitamínica» pode ocultar diferenças importantes entre analitos.

Estes resultados justificam dois princípios práticos para a validação de ACARISIN™. Primeiro, o armazenamento em tempo real deve continuar a ser a base principal das conclusões sobre o prazo de validade.

Segundo, a exposição acelerada a temperatura/humidade é valiosa como ensaio discriminatório de stress, mas não deve ser utilizada para extrapolar mecanicamente o prazo de validade comercial, salvo se existir uma relação cinética validada.

5.2 Cloreto de colina e minerais vestigiais reativos

Yang et al. (2021) avaliaram pré-misturas vitamínicas e vitamínico-minerais com minerais vestigiais durante períodos prolongados de armazenamento e verificaram que o cloreto de colina e concentrações elevadas de cobre e zinco aumentavam as perdas de várias vitaminas. O próprio tempo de armazenamento foi um importante fator negativo. O estudo sustenta a perspectiva de que o desenho das pré-misturas deve minimizar tensões de contacto químico evitáveis, em vez de depender exclusivamente de margens de sobredosagem vitamínica.

Trabalhos mais recentes acrescentaram detalhe à escala da partícula. De Araujo et al. (2024) demonstraram que a humidade e a fonte de cobre influenciavam fortemente a degradação da vitamina A e que uma fração mais fina e reativa de sulfato de cobre produzia uma deterioração substancialmente superior à de uma fonte de hidroxicoBRE menos reativa. Este resultado é diretamente relevante para a hipótese presente, porque demonstra que a perda vitamínica pode ser impulsionada por contactos superficiais locais e pelas características das partículas, e não apenas pela composição global.

Em conjunto, estes estudos demonstram que a estabilidade vitamínica é controlada por uma rede de fatores: humidade, temperatura, tempo, forma dos minerais vestigiais, tamanho de partícula, colina, exposição ao oxigénio e tecnologia de proteção das vitaminas. Um condicionador mineral da fluidez pode influenciar alguns dos fatores físicos desta rede, mas não elimina a reatividade química subjacente dos ingredientes incompatíveis.

6. O condicionamento físico pode melhorar a retenção vitamínica?

Existe uma via racional, embora ainda não demonstrada especificamente para o produto, pela qual uma melhoria do condicionamento do pó poderá favorecer a retenção vitamínica. A aglomeração, compactação e má dispersão podem aumentar o contacto local entre partículas vitamínicas e superfícies minerais reativas. Uma distribuição heterogénea da humidade pode criar microambientes com atividade da água substancialmente diferente da média global. A segregação também pode gerar zonas locais enriquecidas em catalisadores ou componentes higroscópicos.

Se um condicionador reduzir a coesão, melhorar a dispersão e limitar o desenvolvimento de pontes fortes mediadas pela humidade, poderá reduzir algumas destas tensões físicas locais. Este seria um mecanismo protetor indireto. Deve ser descrito como uma hipótese relativa ao microambiente físico, e não como atividade antioxidante nem como estabilização química direta.

A distinção é importante do ponto de vista experimental. Uma pré-mistura pode apresentar fluidez e resistência à aglomeração marcadamente melhores enquanto a retenção vitamínica permanece estatisticamente inalterada. Esse resultado continuaria a sustentar uma função tecnológica valiosa. Inversamente, se a retenção vitamínica melhorar significativamente, o benefício adicional exigirá replicação e interpretação mecanística antes de ser apresentado como uma alegação geral de estabilização.

Uma hierarquia de alegações cientificamente madura coloca, portanto, em primeiro lugar o efeito antiaglomerante e o condicionamento da fluidez; em segundo lugar, a estabilidade física da pré-mistura; e a estabilização química das vitaminas apenas após demonstração analítica direta.

7. Hierarquia da evidência para a aplicação proposta

A Tabela 1 separa a evidência científica externa da evidência específica do produto que ainda é necessária. Esta hierarquia é deliberadamente conservadora e foi concebida para impedir que a plausibilidade mecanística seja apresentada como eficácia demonstrada de ACARISIN™.

Proposição	Evidência externa	Estado específico de ACARISIN™	Afirmação defensável atualmente
O condicionamento superficial à base de sílica pode reduzir a coesão dos pós	Forte suporte mecanístico e experimental em diversos sistemas particulados	Mecanicamente aplicável; magnitude específica da matriz não testada	Base cientificamente plausível para avaliação do condicionamento da fluidez
O condicionamento a baixa dose pode melhorar a fluidez	Sustentado; a resposta depende da dose, dispersão e propriedades das partículas da matriz	A dose-resposta ainda não foi quantificada numa pré-mistura representativa para ruminantes	Avaliar 1-3 g/kg face a controlo não tratado
Antiaglomeração / estabilidade física durante o armazenamento	Sustentado pela ciência da aglomeração e pela literatura antiaglomerante sobre sílica	São necessários dados de armazenamento específicos do produto	Função antiaglomerante potencial, sujeita a validação na matriz
Ausência de efeito adverso na retenção vitamínica	Não é garantida pela melhoria da fluidez; deve ser medida	Ainda não estabelecido na pré-mistura-alvo	Exigir não inferioridade vitamínica como parâmetro de segurança/desempenho
Estabilização direta de vitaminas	A literatura geral identifica contributos físicos, mas não existe equivalência automática	Não estabelecido	Não alegar até ser analiticamente demonstrada retenção superior
Higiene do alimento final ou outra função no alimento final	Questão separada de eficácia e regulamentação	Fora desta via de evidência para condicionamento da pré-mistura	Avaliar independentemente à concentração efetiva no alimento final

Tabela 1. Hierarquia da evidência e disciplina das alegações para a utilização de ACARISIN™ a baixa dose em pré-misturas vitamínico-minerais.

8. Considerações regulamentares na União Europeia

O Regulamento (CE) n.º 1831/2003 estabelece o quadro da União para os aditivos destinados à alimentação animal e inclui os antiaglomerantes e estabilizadores entre as funções dos aditivos tecnológicos. Os antiaglomerantes são definidos por referência à redução da tendência das partículas individuais dos alimentos para animais para aderirem umas às outras. Esta definição funcional está estreitamente alinhada com a principal hipótese tecnológica discutida neste artigo.

O mesmo Regulamento estabelece um sistema de autorização específico por produto. Consequentemente, o facto de um mecanismo estar cientificamente associado a uma função tecnológica reconhecida não estabelece, por si só, que uma preparação proprietária possa ser comercializada sob essa função de aditivo. Antes do posicionamento comercial, devem ser verificados a identidade regulamentar exata de cada componente, as especificações e condições de utilização autorizadas, a natureza da preparação e o atual Registo da UE de Aditivos para a Alimentação Animal.

O bicarbonato de sódio consta do Catálogo da UE de matérias-primas para alimentação animal na entrada 11.4.2 [Regulamento (UE) n.º 68/2013 da Comissão, com as alterações em vigor]. Na produção animal biológica, as atuais regras de execução consolidadas também reconhecem determinados materiais siliciosos entre os aglomerantes e antiaglomerantes. Estas disposições demonstram a relevância regulamentar estabelecida dos materiais minerais e à base de sílica na tecnologia de alimentação animal, mas não devem ser utilizadas para contornar a análise de classificação específica exigida para uma preparação proprietária.

Quando sejam formuladas alegações na rotulagem ou apresentação de matérias-primas para alimentação animal ou de alimentos compostos, o artigo 13.º do Regulamento (CE) n.º 767/2009 exige que essas alegações sejam objetivas, verificáveis e cientificamente fundamentadas. Para aditivos e pré-misturas, o ato de autorização e as disposições de rotulagem do Regulamento (CE) n.º 1831/2003 continuam centrais. A implicação prática é simples: a linguagem técnica deve acompanhar a robustez da evidência efetivamente disponível.

Para ACARISIN™, a posição científica inicial é, portanto, a de um uso tecnológico orientado por hipóteses e centrado no escoamento do pó, coesão e aglomeração, sem prejuízo de outras funções tecnológicas conhecidas e reconhecidas. Uma alegação direta de estabilização vitamínica deve ser reservada para uma fase posterior, caso

estudos analíticos comparativos demonstrem retenção superior. Esta revisão constitui um enquadramento científico e não substitui um parecer formal de classificação jurídica sobre a especificação comercial final.

9. Enquadramento proposto para validação específica do produto

O passo seguinte adequado é um programa comparativo controlado utilizando uma pré-mistura vitamínico-mineral comercial representativa para ruminantes. O princípio central do desenho consiste em manter constantes a composição da pré-mistura, os lotes de matérias-primas, o processo de mistura, a embalagem e as condições de armazenamento, variando apenas o nível de incorporação de ACARISIN™.

Um desenho de dose-resposta com quatro níveis (0, 1, 2 e 3 g/kg de pré-mistura) proporciona um primeiro rastreio prático. É preferível dispor de pelo menos três lotes fabricados independentemente por tratamento, para que as conclusões não dependam de um único evento de mistura. A formulação não tratada é essencial; comparações baseadas apenas na experiência histórica são insuficientes, porque o comportamento dos pós é muito sensível à variação das matérias-primas e do ambiente.

Domínio	Medição recomendada	Objetivo principal	Interpretação
Estado físico inicial	Distribuição do tamanho das partículas; densidade aparente e compactada; humidade; atividade da água	Caracterizar a matriz inicial	Necessário para interpretar a variabilidade entre lotes
Rastreio simples de fluidez	Ângulo de repouso; Índice de Carr; Relação de Hausner; tempo de escoamento através de orifício/descarga	Rastreio comparativo rápido	Utilizar como evidência de apoio, não isoladamente
Comportamento mecânico do fluxo	Função de fluxo em célula de cisalhamento; coesão; fricção interna; energia dinâmica de fluxo quando disponível	Quantificar o fluxo dependente do esforço	Mais útil para relevância em tremonhas/manuseamento
Aglomerção	Armazenamento consolidado; compressão controlada; resistência à aglomeração ou força de rutura; ciclos de humidade	Medir a falha física dependente do tempo	Distingue a fluidez inicial da estabilidade durante o armazenamento
Homogeneidade	Traçador representativo ou CV de um micronutriente antes e depois de um desafio de manuseamento	Confirmar distribuição uniforme	Avaliar se a melhoria da fluidez preserva a uniformidade da mistura
Segregação	Desafio de vibração/transferência com amostragem superior-intermédia-inferior	Quantificar segregação por densidade/tamanho	Importante para o transporte e precisão do doseador
Química vitamínica	Ensaio validado para A, D3, E e vitaminas B selecionadas adequadas à formulação	Testar não inferioridade ou superioridade	O parâmetro químico deve permanecer separado das métricas de fluidez
Interação com a embalagem	Embalagem comercial padrão versus referência de elevada barreira, quando relevante	Separar o efeito da formulação do efeito da embalagem	Evita confundimento devido à entrada de humidade

Tabela 2. Domínios analíticos recomendados para a validação de ACARISIN™ numa pré-mistura vitamínico-mineral representativa.

9.1 Desenho do armazenamento

Um braço em tempo real deve reproduzir, tanto quanto possível, o ambiente comercial previsto e prolongar-se durante todo o prazo de validade declarado da pré-mistura. A amostragem no fabrico e em intervalos predefinidos deve quantificar tanto as alterações físicas como as químicas. A temperatura e a humidade relativa devem ser registadas continuamente, porque condições ambiente nominais podem ocultar variabilidade sazonal substancial.

Pode utilizar-se um braço acelerado para discriminação precoce. Estudos de pré-misturas para alimentação animal utilizaram com êxito condições em torno de 40 °C e 75 % de humidade relativa como stress de alta temperatura/alta humidade (Saensukjaroenphon et al., 2022). Estas condições são úteis para classificar tratamentos e expor formulações frágeis, mas o resultado acelerado não deve ser convertido diretamente numa alegação de prazo de validade comercial sem cinética validada.

Se a formulação do cliente-alvo contiver preparações de colina altamente higroscópicas ou sais reativos de cobre/ferro, é aconselhável uma matriz de stress de segunda fase. Isto permite testar o condicionador onde os desafios físicos e químicos são maiores, e não apenas numa pré-mistura relativamente benigna.

9.2 Hierarquia estatística e regras de decisão

Os parâmetros primários devem relacionar-se com a função primária proposta: escoamento e aglomeração. O tratamento, o tempo e a respetiva interação devem ser analisados através de um modelo misto adequado, utilizando, sempre que possível, o lote independente como efeito aleatório. Os padrões de dose-resposta são mais informativos do que uma significância isolada entre pares, porque permitem identificar um ótimo e não apenas uma diferença.

Para as vitaminas, a primeira questão de desenvolvimento do produto deve ser a não inferioridade: ACARISIN™ preserva a atividade vitamínica pelo menos tão bem como o controlo não tratado, dentro de uma margem analítica e comercial pré-especificada? Só depois de estabelecida a não inferioridade deve ser avaliada a superioridade. A margem deve ser justificada previamente com base na precisão analítica, especificação do produto e variabilidade normal da pré-mistura, em vez de ser selecionada retrospectivamente.

Esta hierarquia protege contra um erro probatório comum: utilizar um resultado físico positivo para implicar um benefício químico que nunca foi medido. Também cria resultados comercialmente úteis mesmo na ausência de superioridade vitamínica. Um condicionador que melhore significativamente o manuseamento sem prejudicar a retenção vitamínica continua a ter valor técnico.

10. Interpretação dos possíveis resultados experimentais

Resultado observado	Conclusão científica	Posicionamento técnico admissível
Melhora da fluidez; diminuição da aglomeração; vitaminas inalteradas	Condicionador físico validado; nenhum efeito químico detetado	Benefício de condicionamento da fluidez / antiaglomerante com compatibilidade vitamínica
Melhora da fluidez; retenção vitamínica também significativamente superior	Benefício físico mais sinal secundário de retenção química	Investigar e replicar antes de uma alegação de estabilidade vitamínica
Melhora da fluidez; uma ou mais vitaminas diminuem mais rapidamente	Benefício físico acompanhado de interação com a formulação	Reformular ou restringir a utilização; sem alegação de compatibilidade vitamínica
Sem melhoria física relevante	Matriz/dose/processo não responsivo	Não generalizar a eficácia; reavaliar dose, dispersão ou matriz-alvo
O efeito difere consoante a dose	Resposta não linear ao condicionamento superficial	Definir a incorporação ótima em vez de adotar por defeito a dose máxima

Tabela 3. Enquadramento de decisão para interpretar o primeiro estudo de validação específico do produto.

11. Implicações industriais para o fabrico de pré-misturas

Se validado, um condicionador mineral a baixa dose poderá proporcionar benefícios que vão além de uma aparência visual de livre escoamento. A redução da coesão pode melhorar a descarga de tremonhas, a reprodutibilidade dos doseadores, a velocidade de embalagem e o manuseamento pelos operadores. Uma menor aglomeração pode reduzir a desagregação manual, o retrabalho e as perdas de material. Uma maior estabilidade da distribuição pode também favorecer uma dosagem mais consistente de microingredientes após o transporte.

Estes resultados têm relevância nutricional direta, porque as especificações de nutrientes só têm significado quando o sistema de fabrico consegue fornecer consistentemente os microingredientes formulados. A nutrição de precisão aumenta, em vez de diminuir, a importância da engenharia de partículas, porque margens de segurança menores exigem um controlo mais apertado da dosagem e da homogeneidade.

A proposta de valor comercial deve, portanto, ser enquadrada principalmente em torno da robustez do processo e da qualidade física da pré-mistura. Qualquer benefício subsequente na retenção vitamínica deve ser apresentado como uma propriedade adicional validada, e não como pressuposto inicial.

12. Agenda de investigação para além da validação inicial

Depois de um primeiro estudo em pré-misturas para ruminantes estabelecer um efeito físico reprodutível, trabalhos subsequentes deverão determinar os limites da tecnologia. As variáveis prioritárias incluem a arquitetura mineral da pré-mistura, a fonte de colina, a tecnologia de proteção vitamínica, a distribuição do tamanho das partículas, a energia de mistura, a humidade de armazenamento e a barreira da embalagem.

Um programa fatorial poderá comparar minerais sulfato altamente solúveis com fontes minerais menos reativas, preparações vitamínicas revestidas versus não revestidas e matrizes de baixa versus alta higroscopicidade. Este trabalho permitiria esclarecer se ACARISIN™ atua principalmente como condicionador geral da fluidez ou se o seu efeito é particularmente valioso em arquiteturas específicas de pré-mistura de alto risco.

Uma caracterização avançada poderá também examinar a cobertura superficial por microscopia eletrónica, sorção dinâmica de vapor, RMN de baixo campo para mobilidade da água e reometria de pós sob consolidação. Estas técnicas não são necessárias para o controlo de qualidade de rotina, mas podem ajudar a relacionar o desempenho macroscópico com o mecanismo e a criar uma plataforma científica mais sólida para publicação futura.

13. Limitações

A principal limitação desta revisão é deliberada: não apresenta dados comparativos de eficácia específicos de ACARISIN™, porque esses dados devem ser gerados prospetivamente. O artigo estabelece, portanto, plausibilidade, limites da evidência e uma via de validação, em vez de alegar uma demonstração já concluída.

Grande parte da literatura mecanística sobre sílica coloidal e escoamento de pós tem origem em sistemas farmacêuticos ou em sistemas particulados gerais, e não especificamente em pré-misturas para alimentação animal. A transferência da física subjacente é razoável, porque as forças interparticulares, as pontes capilares e a modificação superficial são fenómenos gerais, mas as magnitudes quantitativas dos efeitos não podem ser transferidas diretamente entre matrizes.

A literatura sobre estabilidade vitamínica é mais diretamente relevante para pré-misturas de alimentação animal, embora também demonstre forte dependência da matriz. O comportamento de uma pré-mistura específica para ruminantes dependerá das formas vitamínicas efetivamente utilizadas, fontes minerais, tamanhos de partículas, suportes, teor de colina, humidade e ambiente de armazenamento. Os ensaios específicos do produto continuam indispensáveis.

Por fim, este artigo não constitui um dossier de autorização regulamentar. A fundamentação científica deve ser integrada com uma avaliação jurídica separada da especificação comercial exata, das autorizações atuais de aditivos para alimentação animal, da rotulagem e das alegações pretendidas em cada mercado-alvo.

14. Conclusões

As pré-misturas vitamínico-minerais são sistemas complexos de pós nos quais o manuseamento físico e a estabilidade química dos micronutrientes interagem, embora permaneçam analiticamente distintos. A ciência dos pós estabelecida demonstra que o condicionamento superficial à base de sílica pode reduzir as forças coesivas

interparticulares e melhorar o escoamento dos pós, enquanto a ciência da aglomeração identifica a distribuição da humidade e a formação de pontes interparticulares como determinantes-chave da falha durante o armazenamento.

A investigação sobre pré-misturas para alimentação animal demonstra, de forma independente, que a estabilidade vitamínica é fortemente afetada pelo tempo, temperatura, humidade, cloreto de colina e pela forma química e características das partículas dos minerais vestigiais reativos. Estes resultados fornecem uma base científica coerente para investigar ACARISIN™ como condicionador físico a baixa dose em pré-misturas vitamínico-minerais para nutrição de ruminantes.

A evidência atual sustenta uma hipótese plausível de efeito antiaglomerante e condicionamento da fluidez. Ainda não justifica uma alegação direta de que ACARISIN™ estabiliza quimicamente as vitaminas. A sequência científica adequada é, portanto, demonstrar melhoria do comportamento físico, confirmar retenção vitamínica não inferior e só então avaliar se existe um benefício secundário reprodutível na retenção vitamínica.

Um estudo controlado de dose-resposta utilizando pré-misturas comerciais representativas pode converter esta fundamentação em evidência específica do produto sem divulgar a formulação quantitativa proprietária. Uma abordagem orientada pela evidência desta natureza fornece a base mais sólida para um posicionamento tecnicamente robusto, comercialmente útil e defensável do ponto de vista regulamentar.

Declarações

Contribuições do autor

José M. López: conceptualização; enquadramento técnico; metodologia; síntese da literatura; interpretação regulamentar; redação - versão original; redação - revisão e edição; supervisão.

Conflito de interesses

O autor é Diretor Técnico e Diretor de I&D da INTABIOTECH S.L., empresa que comercializa ACARISIN™. Este interesse comercial constitui um potencial conflito de interesses e é declarado de forma transparente. O manuscrito distingue deliberadamente a evidência científica externa das hipóteses específicas do produto e não atribui dados de eficácia que não tenham sido gerados.

Financiamento

Não foi recebido financiamento externo para esta revisão. A preparação do manuscrito foi financiada internamente pela INTABIOTECH S.L.

Disponibilidade dos dados

Não foi gerado qualquer novo conjunto de dados experimentais para esta revisão. A análise científica baseia-se na literatura pública citada e em características técnicas não quantitativas da preparação proprietária. Os dados de desempenho específicos do produto exigirão validação prospetiva.

Declaração sobre a formulação proprietária

A composição quantitativa e os parâmetros proprietários de fabrico de ACARISIN™ constituem informação industrial confidencial e não são intencionalmente divulgados. As conclusões científicas desta revisão não dependem da publicação desses detalhes confidenciais.

Declaração de ética

Não aplicável. Esta revisão não envolveu participantes humanos, animais ou nova experimentação biológica.

Referências

- 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>