

Aplicação da inteligência artificial na interpretação do microbioma associado a estratégias nutricionais e ao desempenho animal

Mariana Quintino do Nascimento¹

¹ **Sapiens *Inteligência Artificial em Microbioma*, Brasil**

E-mail para correspondência: mariananascimento@sapiensmicrobiome.com

Introdução

A incorporação de ferramentas ômicas à produção animal ampliou a capacidade de caracterizar processos biológicos que não são plenamente explicados pelos indicadores zootécnicos convencionais. Entre essas ferramentas, a análise do microbioma intestinal tem recebido especial atenção por permitir a avaliação da estrutura das comunidades microbianas, de sua estabilidade ecológica e de assinaturas associadas à nutrição, à saúde intestinal, ao desafio sanitário e ao desempenho dos animais.

Apesar do avanço das técnicas de sequenciamento e da crescente disponibilidade de dados microbiológicos, a interpretação desses resultados ainda representa uma importante limitação para sua aplicação no campo. Em muitos casos, os relatórios apresentam extensas listas de microrganismos, diferenças de abundância e índices de diversidade, sem esclarecer quais alterações possuem relevância biológica, como elas se relacionam com a condição dos animais e quais decisões poderiam ser sustentadas por essas informações. Consequentemente, o aumento da capacidade de gerar dados não tem sido acompanhado, na mesma proporção, pelo aumento da capacidade de transformá-los em conhecimento aplicável.

Essa dificuldade está relacionada à natureza multifatorial do ecossistema intestinal. A microbiota não responde exclusivamente à composição da dieta ou à inclusão de determinado aditivo. Sua organização resulta da interação entre idade, genética, ambiente, manejo, uso de antimicrobianos, condição sanitária, disponibilidade de substratos, fisiologia digestiva e resposta imunometabólica do hospedeiro. Além disso, os microrganismos não atuam de forma independente, mas integram redes ecológicas nas quais alterações aparentemente discretas podem modificar a estabilidade, a redundância funcional e a capacidade de recuperação do ecossistema.

Dessa forma, a simples identificação dos táxons que aumentaram ou diminuíram entre tratamentos não é suficiente para determinar se uma intervenção produziu uma resposta biologicamente favorável. Um microrganismo diferencialmente abundante pode representar uma alteração funcionalmente relevante, uma adaptação transitória ou apenas uma consequência indireta de outras mudanças no ambiente intestinal. O valor técnico da análise do microbioma depende, portanto, da integração entre composição microbiana, contexto experimental, evidência científica e consequência biológica provável.

Nesse cenário, a inteligência artificial e a modelagem computacional representam instrumentos relevantes para organizar a complexidade dos dados e ampliar sua utilidade na produção animal. Sua função não é substituir o conhecimento biológico ou o julgamento do profissional, mas aumentar a capacidade de reconhecer padrões multidimensionais, hierarquizar sinais e produzir interpretações mais consistentes, comparáveis e direcionadas à tomada de decisão.

Objetivo

Discutir a aplicação da inteligência artificial e de modelos computacionais na interpretação do microbioma intestinal relacionado a diferentes estratégias nutricionais e ao desempenho animal, com ênfase nos modelos desenvolvidos pela Sapiens como ferramentas diagnósticas de suporte à avaliação da condição ecológica intestinal, à estratificação de risco e à tomada de decisões nutricionais e sanitárias mais eficientes.

Desenvolvimento

A interpretação convencional do microbioma é frequentemente conduzida a partir de análises de diversidade alfa e beta, abundância relativa e identificação de táxons diferencialmente abundantes. Essas abordagens são fundamentais, mas respondem principalmente a perguntas descritivas: quantos táxons foram observados, como eles se distribuem entre as amostras, quais grupos diferem entre tratamentos e quais microrganismos contribuíram para essa separação. Embora relevantes, essas informações não necessariamente indicam se a comunidade é mais estável, funcionalmente equilibrada ou capaz de resistir a uma perturbação.

A aplicação da inteligência artificial modifica a natureza da pergunta. Em vez de considerar cada resultado isoladamente, os modelos podem integrar diferentes variáveis para avaliar o significado conjunto do perfil microbiológico. Assim, a análise deixa de se restringir à questão “quais microrganismos aumentaram ou diminuíram?” e passa a investigar “qual condição ecológica é sugerida por esse conjunto de sinais?”, “essa comunidade apresenta maior capacidade de manutenção da homeostase?” e “qual decisão nutricional ou sanitária pode ser apoiada por esse resultado?”.

Na abordagem desenvolvida pela Sapiens, a interpretação é organizada em camadas complementares. A primeira corresponde à estrutura da comunidade, avaliada por indicadores como riqueza, diversidade e uniformidade. A segunda considera o balanço entre biomarcadores associados à homeostase, fermentação, produção de metabólitos, suporte à mucosa ou modulação imunológica e biomarcadores relacionados à pressão oportunista, inflamação, instabilidade ou risco sanitário. A terceira camada busca estimar a consequência ecológica desse balanço, por meio de indicadores de robustez, pressão disbiótica e capacidade de tamponamento frente a perturbações. Finalmente, esses resultados são contextualizados com informações de desempenho, idade, tratamento, condição clínica, ambiente e desenho experimental. Essa organização permite que resultados estatísticos sejam convertidos em uma narrativa biologicamente interpretável.

Um aspecto central desse conjunto é a diferenciação entre cenários de homeostase e de desafio. Em condições basais, o modelo procura caracterizar o equilíbrio relativo entre sinais favoráveis e desfavoráveis, considerando também a complexidade da comunidade. Em estudos com desafio sanitário ou perturbação definida, a interpretação passa a ser realizada em relação a uma referência biologicamente adequada. Nesse caso, são consideradas a expansão de biomarcadores negativos acima dos limites observados na referência, a redução de biomarcadores positivos, a riqueza, a uniformidade da comunidade e a distância composicional em relação ao perfil de menor perturbação. Os

biomarcadores recebem pesos de acordo com sua participação na estrutura de correlações da comunidade, reduzindo a influência de uma interpretação baseada exclusivamente na abundância absoluta de táxons isolados.

A partir dessa integração, os modelos geram indicadores, como o Índice de Robustez e o Índice de Disbiose. O Índice de Robustez representa a capacidade relativa da comunidade de sustentar uma condição ecologicamente equilibrada e de amortecer perturbações. O Índice de Disbiose representa a intensidade do deslocamento para uma condição menos favorável, caracterizada por maior pressão de biomarcadores de risco, redução do suporte ecológico positivo ou perda de complexidade. Nos relatórios da Sapiens, esses indicadores são apresentados em escala padronizada, na qual valores mais elevados de robustez indicam maior capacidade de tamponamento, enquanto valores mais elevados de disbiose indicam maior pressão ecológica desfavorável.

A principal contribuição dessa abordagem não está na produção de um novo número isolado, mas na capacidade de transformar diferentes dimensões da microbiota em uma leitura diagnóstica integrada. Nesse contexto, o termo diagnóstico não se refere ao diagnóstico clínico de uma enfermidade específica, mas à caracterização do estado biológico e ecológico do ecossistema intestinal. O modelo pode indicar, por exemplo, que determinado grupo apresenta menor riqueza, maior concentração da comunidade, redução de biomarcadores protetores e maior pressão de táxons associados ao risco. Considerados isoladamente, esses resultados poderiam parecer pouco conclusivos. Quando integrados, entretanto, podem caracterizar um perfil de menor robustez e maior vulnerabilidade a desafios sanitários ou nutricionais.

Essa interpretação é particularmente relevante na avaliação de estratégias nutricionais. Duas intervenções podem produzir desempenhos zootécnicos semelhantes, mas sustentar condições microbiológicas distintas. Uma delas pode estar associada a maior diversidade funcional, maior contribuição de microrganismos fermentadores e menor pressão oportunista. Outra pode manter o desempenho no curto prazo, porém apresentar menor complexidade e menor capacidade de tamponamento ecológico. Também pode ocorrer o inverso: uma resposta microbiológica favorável pode preceder alterações mensuráveis no ganho de peso, na conversão alimentar ou na mortalidade.

A microbiota constitui, nesse sentido, uma camada biológica intermediária entre a intervenção nutricional e o desfecho produtivo. Ela pode revelar mecanismos, adaptações e fragilidades que ainda não se expressaram de forma evidente nos indicadores de desempenho. A integração entre essas duas dimensões evita interpretações simplificadas. Dados internos da própria abordagem demonstram que indicadores produtivos e microbiológicos podem seguir direções diferentes: uma intervenção pode favorecer a eficiência dos animais remanescentes, mas não melhorar a robustez da microbiota ou a viabilidade do lote como um todo. Nesses casos, o modelo contribui para distinguir eficiência produtiva terminal de resiliência biológica em nível populacional.

Como ferramenta de suporte à decisão, os modelos da Sapiens podem ser aplicados em diferentes níveis. Em experimentos controlados, permitem comparar tratamentos e aprofundar a interpretação do modo de ação de aditivos, ingredientes e programas nutricionais. Em condições de campo, podem auxiliar na identificação de lotes mais frágeis, no reconhecimento de respostas heterogêneas entre granjas e no direcionamento de investigações complementares. Em programas de desenvolvimento de produtos,

podem ajudar a definir quais estratégias apresentam uma resposta biológica consistente e quais necessitam de reformulação, combinação com outras intervenções ou validação adicional.

Sua utilização também pode aumentar a eficiência da tomada de decisão ao reduzir a distância entre o resultado analítico e a ação prática. Em vez de entregar apenas uma lista de microrganismos, o modelo organiza os dados em perguntas operacionais: a estratégia aumentou o suporte ecológico positivo? Reduziu a pressão de risco? A comunidade se tornou mais ou menos robusta? A resposta microbiológica acompanha o desempenho? Existe uma divergência que justifique monitoramento adicional? Quais grupos apresentam maior prioridade de intervenção?

Essas respostas podem subsidiar decisões como o ajuste de dose ou duração de um aditivo, a combinação entre moduladores, a revisão do momento de aplicação, a intensificação do monitoramento sanitário e a seleção de lotes para análises adicionais. O modelo, portanto, não determina automaticamente a conduta, mas fornece um critério biológico mais estruturado para que nutricionistas, veterinários, pesquisadores e equipes de desenvolvimento tomem decisões com menor grau de incerteza.

Outro diferencial relevante é a explicabilidade. Para que um modelo tenha utilidade no setor produtivo, não basta classificar uma amostra como favorável ou desfavorável. É necessário demonstrar quais sinais contribuíram para essa classificação, qual a direção do efeito e quais hipóteses biológicas podem explicar o resultado. Por essa razão, os indicadores devem ser acompanhados pela apresentação dos biomarcadores, da estrutura comunitária, das funções associadas e das limitações do desenho experimental. Essa transparência evita que a inteligência artificial seja tratada como uma “caixa-preta” e permite que a interpretação seja confrontada com conhecimento técnico, dados de campo e evidências científicas.

Entretanto, a aplicação desses modelos exige cautela. A confiabilidade dos resultados depende da qualidade da amostragem, da padronização laboratorial, da profundidade de sequenciamento, da resolução taxonômica, da representatividade da base de referência e da disponibilidade de metadados. Modelos construídos a partir de bases pequenas, homogêneas ou pouco representativas podem apresentar bom desempenho aparente no conjunto de desenvolvimento, mas baixa capacidade de generalização.

Também devem ser considerados fatores como idade dos animais, segmento intestinal ou tipo de amostra, ambiente, genética, dieta basal, uso de antibióticos e intensidade do desafio. Diferenças nesses componentes podem modificar a microbiota independentemente da estratégia nutricional avaliada. Consequentemente, os resultados devem ser interpretados como evidências associativas, exceto quando o desenho experimental e as validações realizadas permitirem inferências mais robustas.

A inteligência artificial não elimina essas limitações. Ao contrário, sua aplicação responsável exige que elas sejam incorporadas ao processo interpretativo. A acurácia computacional, isoladamente, não garante relevância biológica. Um modelo útil deve ser reproduzível, explicável, validado em populações independentes e capaz de produzir resultados coerentes com o conhecimento sobre fisiologia intestinal, ecologia microbiana e produção animal.

Conclusão

O microbioma intestinal contém informações relevantes sobre a resposta dos animais às estratégias nutricionais, aos desafios sanitários e às condições de produção. Entretanto, seu valor não está apenas na identificação dos microrganismos presentes, mas na capacidade de interpretar como esses microrganismos se organizam, quais funções provavelmente sustentam e o que seu comportamento indica sobre a estabilidade do ambiente intestinal.

A inteligência artificial e a modelagem computacional oferecem uma via promissora para integrar essa complexidade e transformar dados microbiológicos em critérios mais objetivos de avaliação. Os modelos da Sapiens avançam nesse sentido ao combinar estrutura comunitária, biomarcadores, contexto experimental, pressão disbiótica e robustez ecológica em uma arquitetura interpretativa direcionada à tomada de decisão.

Essa abordagem permite utilizar o microbioma como ferramenta diagnóstica de suporte, capaz de caracterizar a condição ecológica intestinal, comparar a resposta biológica entre estratégias, identificar sinais precoces de fragilidade e complementar a interpretação do desempenho zootécnico. Seu principal benefício não é substituir o profissional responsável pela decisão, mas oferecer uma camada adicional de evidência para que essa decisão seja mais rápida, fundamentada e biologicamente coerente.

O avanço da área dependerá da integração entre bases de dados mais representativas, modelos explicáveis, validação externa e compreensão dos mecanismos biológicos. O futuro da aplicação do microbioma na produção animal, portanto, não está apenas na geração de maior volume de informação, mas no desenvolvimento de melhores critérios para interpretar, priorizar e decidir.

Palavras-chave: inteligência artificial; microbiota intestinal; nutrição de precisão; robustez microbiana; disbiose; biomarcadores; tomada de decisão.