

Model Risk Management

Aspectos quantitativos e qualitativos da gestão do risco de modelo



Design e diagramação

Departamento de Marketing e Comunicação
Management Solutions - Espanha

Fotografias

Arquivo fotográfico da Management Solutions
Fotolia

© Management Solutions 2014

Todos os direitos reservados. Proibida a reprodução, distribuição, comunicação ao público, no todo ou em parte, gratuita ou paga, por qualquer meio ou processo, sem o prévio consentimento por escrito da Management Solutions.

O material contido nesta publicação é apenas para fins informativos. A Management Solutions não é responsável por qualquer uso que terceiros possam fazer desta informação. Este material não pode ser utilizado, exceto se autorizado pela Management Solutions.

Índice



Introdução

4



Resumo executivo

8



Definição e regulamentação sobre risco de modelo

12



Elementos de um framework objetivo de MRM

18



Quantificação do risco de modelo

26



Bibliografia

36



Glossário

37

Introdução



Nos últimos anos, observou-se uma tendência nas instituições financeiras de um maior uso de modelos para a tomada de decisões, que foi impulsionada em parte pela regulamentação, mas que se manifesta em todos os âmbitos da gestão.

Neste sentido, constata-se que uma elevada proporção das decisões das instituições é tomada de forma automatizada, com modelos de decisão (sejam algoritmos estatísticos ou conjuntos de regras)¹.

Por um lado, nos últimos anos ampliou-se o uso de plataformas eletrônicas que executam de forma automática ordens de *trading* programadas segundo tempo, preço ou volume, e que podem ser iniciadas sem intervenção manual, o que é conhecido como *algorithmic trading*. Como exemplo, ao executar uma ordem automática de trading, em 6 de maio de 2010, ocorreu um *flash crash* de 4,1 bilhões de dólares na Bolsa de Nova York, que caiu mais de 1.000 pontos e se recuperou ao mesmo valor em apenas 15 minutos².

Por outro lado, e em parte estimuladas pela regulamentação de Basileia³, as instituições empregam cada vez mais modelos de decisão (formados por algoritmos estatísticos e regras de decisão) em seus processos de concessão, acompanhamento e recuperação do crédito. Assim, é determinado de forma automática se um crédito é viável ou não, através da estimativa da probabilidade de *default* (PD) do cliente. Do mesmo modo, as instituições observam a evolução de seus clientes e antecipam a deterioração do crédito com modelos automáticos de alertas, pré-classificam os clientes e estabelecem limites de crédito para eles; e, no âmbito das recuperações, determinam perfis estatísticos de clientes inadimplentes para aplicar-lhes diferentes estratégias de cobrança.

No âmbito comercial, permite-se ao cliente selecionar as características de um produto (valor, prazo e finalidade de um empréstimo, coberturas de um seguro, etc.) e o sistema determina em tempo real a viabilidade da oferta e o preço. Em muitos casos, o modelo faz uma série de perguntas ao cliente e lhe oferece proativamente a melhor configuração para suas características (o que manualmente seria lento e complexo).

Os modelos de avaliação de produtos ou instrumentos financeiros, tanto no âmbito de mercado como no de ALM, estão muito disseminados nas instituições. Exemplos clássicos desses modelos são Black-Scholes, CAPM⁴ e os modelos de Monte Carlo para avaliação.

Outro âmbito onde o uso de modelos é cada vez mais frequente é a detecção de fraude e lavagem de dinheiro. Tanto as instituições como os reguladores empregam modelos de identificação de transações fraudulentas ou orientadas à lavagem de dinheiro, para o que é usada uma combinação de modelos estatísticos de identificação de perfis de cliente (*know your customer*, KYC), regras de monitoramento de transações e listas negras.

Por outro lado, está se ampliando o uso dos modelos de *onboarding*, vinculação e campanhas comerciais. Com isso, são determinadas de forma automática as ações de fidelização e vinculação de clientes, tanto na primeira etapa de seu relacionamento com a instituição como em qualquer momento de seu ciclo de vida, o que inclui a venda cruzada de produtos e serviços personalizados para as necessidades do cliente, dentro do âmbito do CRM⁵.

¹MIT (2005).

²SEC (2010).

³BCBS (2004-06).

⁴Capital asset pricing model.

⁵Customer relationship management.



Outros exemplos incluem a estimativa do consumo de capital em todas as suas acepções (crédito, mercado, operacional, ALM, etc.) através de seus componentes; a quantificação da posição de liquidez atual e projetada em diferentes cenários; a projeção do balanço, a demonstração de resultados e a utilização de modelos de teste de estresse⁶; ou a modelagem de diversos componentes essenciais para o planejamento e o desenvolvimento de negócios: cesta ótima, renda de clientes e não clientes ou abandono, entre outros (Fig. 1).

A utilização de modelos tem benefícios inquestionáveis, entre os quais:

- ▶ A automatização da tomada de decisões, que por sua vez facilita a melhoria da eficiência através da redução dos custos associados à análise e à decisão manual.
- ▶ A objetividade na tomada de decisões, garantindo que o resultado das estimativas seja o mesmo em circunstâncias iguais, e o reaproveitamento das informações internas e externas, valorizando a experiência histórica.
- ▶ A capacidade para sintetizar questões complexas, como o perfil de risco agregado de uma instituição.

Não obstante, a utilização de modelos também envolve custos e riscos, entre os quais cabe mencionar:

- ▶ O custo direto em recursos (financeiros e humanos) e tempo para seu desenvolvimento e implementação.
- ▶ O risco de confiar nos resultados de um modelo incorreto ou mal aplicado. Deste caso foram dados exemplos verídicos e recentes que geraram perdas consideráveis⁷.

Neste sentido, pode-se definir o risco de modelo como «o conjunto de possíveis consequências adversas derivadas de decisões baseadas em resultados e relatórios incorretos de modelos, ou de seu uso inadequado»⁸.

Os erros em um modelo podem incluir simplificações, aproximações, hipóteses erradas ou um processo de desenho incorreto; o uso inadequado dos modelos inclui sua aplicação fora do uso para o qual foram concebidos⁹.

O risco de modelo assim definido, muito relevante potencialmente, captou a atenção de reguladores e instituições, que oscilam entre a mitigação através da validação dos modelos e o estabelecimento de um *framework* integrado para sua gestão ativa.

Nos casos mais avançados, esta gestão ativa materializou-se em um *framework* de gestão de risco de modelo (*model risk management*, MRM) que estabelece as diretrizes sobre todo o processo de planejamento, desenvolvimento, implementação, validação, inventário e uso dos modelos.

Isso é referendado pelo fato de que os reguladores, especialmente nos EUA, começam a exigir este tipo de *frameworks*, como se observa nas diretrizes¹⁰ do Federal Reserve System (Fed) e do Office of the Comptroller of the Currency (OCC), que estão servindo como ponto de partida para o setor.

A regulamentação não se aprofunda em aspectos relativos à quantificação do risco de modelo, exceto para casos muito específicos da avaliação de certos produtos, onde chega a exigir uma estimativa do risco de modelo através de ajustes na avaliação (*model risk AVAs*¹¹) que derivam em uma maior necessidade de capital, ou também na possível utilização, como mitigante, de um *buffer* de capital por risco de modelo em um sentido mais amplo, mas sem chegar a especificar seu cálculo.

Neste contexto, o presente estudo pretende proporcionar uma visão ampla sobre a gestão do risco de modelo, sua definição, natureza e fontes, a regulamentação associada, e suas implicações práticas. Para isso, o documento é estruturado em três seções, que respondem a três objetivos:

- ▶ Apresentar o risco de modelo através de sua definição, a análise de suas fontes e um breve resumo da regulamentação relacionada mais relevante.
- ▶ Descrever um *framework* objetivo de gestão de risco de modelo de forma prática e baseada em exemplos observados em instituições financeiras.
- ▶ Avançar na quantificação do risco de modelo (e suas possíveis aplicações práticas) através de um exercício quantitativo que ilustre o impacto deste risco.

⁶Ver Management Solutions (2013).

⁷Por exemplo, o caso do "London Whale", que causou mais de 6,2 bilhões de dólares de perdas para a JPMorgan em 2012, que se enquadra no mercado OTC de derivativos, que em junho de 2013 tinha uma exposição de quase 700 bilhões de dólares; ver BIS (2013); ou a avaliação incorreta do risco de determinados instrumentos derivativos, incluída entre as causas da crise subprime dos EUA de 2008.

⁸OCC-Fed (2011-12).

⁹Ibid.

¹⁰Ibid.

¹¹*Model risk additional valuation adjustments (AVAs)*, detalhados no EBA (2013).

Sumário executivo



Esta seção pretende sintetizar as principais conclusões alcançadas sobre a gestão do risco de modelo em instituições financeiras (que são desenvolvidas nas seções correspondentes do presente documento).

Definição e regulamentação sobre risco de modelo

1. A utilização de modelos matemáticos dissemina-se com rapidez nas instituições financeiras em diversas áreas, o que aporta benefícios inquestionáveis (objetividade, automatização, eficiência, etc.), mas também envolve custos.
2. Entre esses custos, encontra-se o risco de modelo, entendido como as perdas (econômicas, reputacionais, etc.) provocadas por decisões baseadas em modelos incorretos ou utilizados de forma inadequada.
3. Assim entendido, o risco de modelo pode provir de três fontes fundamentais: carências nos dados (tanto disponibilidade como qualidade); incerteza na estimativa ou erros metodológicos no desenho do modelo (volatilidade dos estimadores, simplificações, aproximações, hipóteses incorretas, desenho incorreto, etc.); e uso inadequado do modelo (aplicação do modelo fora de seu uso previsto, falta de atualização e recalibração, etc.).
4. Em relação à regulamentação, existe pouca regulamentação referente ao risco de modelo e, com uma exceção, refere-se quase exclusivamente à necessidade de efetuar ajustes de avaliação em produtos derivativos, pela necessidade de contemplar todos os riscos no processo de autoavaliação do capital (ICAAP¹²) ou pela utilização da taxa de alavancagem de Basileia III como um mitigante do risco de modelo na estimativa dos ativos ponderados por risco para o cálculo de capital por modelos internos¹³.
5. A exceção refere-se à *Supervisory Guidance on Model Risk Management*¹⁴ publicada pela OCC e pelo Fed dos EUA em 2011-12, que pela primeira vez define com precisão o risco de modelo e estabelece, através de diretrizes, a necessidade de que as instituições disponham de um *framework* para identificá-lo e administrá-lo (embora não necessariamente quantificá-lo), aprovado por seus conselhos de administração.
6. Estas diretrizes abrangem todas as fases do ciclo de vida de um modelo: desenvolvimento e implementação, uso, validação, governança, políticas, controle e documentação por parte de todos os envolvidos; com ênfase especial neste último aspecto, dada sua importância nos processos de validação efetiva dos modelos.
7. Entre os principais aspectos requeridos, encontra-se a necessidade de tratar o risco de modelo com o mesmo rigor que qualquer outro risco, com a particularidade de que não pode ser eliminado, somente mitigado através de um questionamento efetivo («*effective challenge*»).
8. Os reguladores enfatizam expressamente que uma modelagem experiente, uma validação robusta dos modelos e um nível de conservadorismo devidamente justificado (mas não desproporcional) são elementos necessários mas não suficientes para a mitigação do risco de modelo, e que nenhum deles é argumento para que não se busque a melhoria contínua dos modelos.
9. Em relação à organização e à governança do risco de modelo, os reguladores não prescrevem um esquema específico, mas sim a necessidade de estabelecer uma distinção clara entre as funções de «*ownership*»¹⁵, «*control*»¹⁶ e «*compliance*»¹⁷ dos modelos.
10. O Conselho de Administração é o responsável em última instância por aprovar o *framework* de gestão do risco de modelo (MRM) e deve ser informado periodicamente sobre o risco de modelo significativo ao qual a instituição possa estar exposta.
11. Por último, os reguladores destacam que o princípio fundamental na gestão do risco de modelo é o *effective challenge*, entendido como a análise crítica por parte de profissionais objetivos, qualificados e com experiência na linha de negócios em que o modelo é usado, que possam identificar as limitações e premissas, e propor as melhorias apropriadas.
12. Esta aproximação integrada ao risco de modelo é inovadora no setor, e a tendência esperada nos próximos anos é que o setor vá se adaptando e aderindo a essas práticas, como já estão fazendo as instituições mais avançadas.

¹²Internal Capital Adequacy Assessment Process.

¹³BCBS (2010-11).

¹⁴OCC-Fed (2011-12).

¹⁵Ownership: refere-se ao "proprietário" ou usuário do modelo.

¹⁶Control: função que valida o modelo e estabelece limites para seu uso.

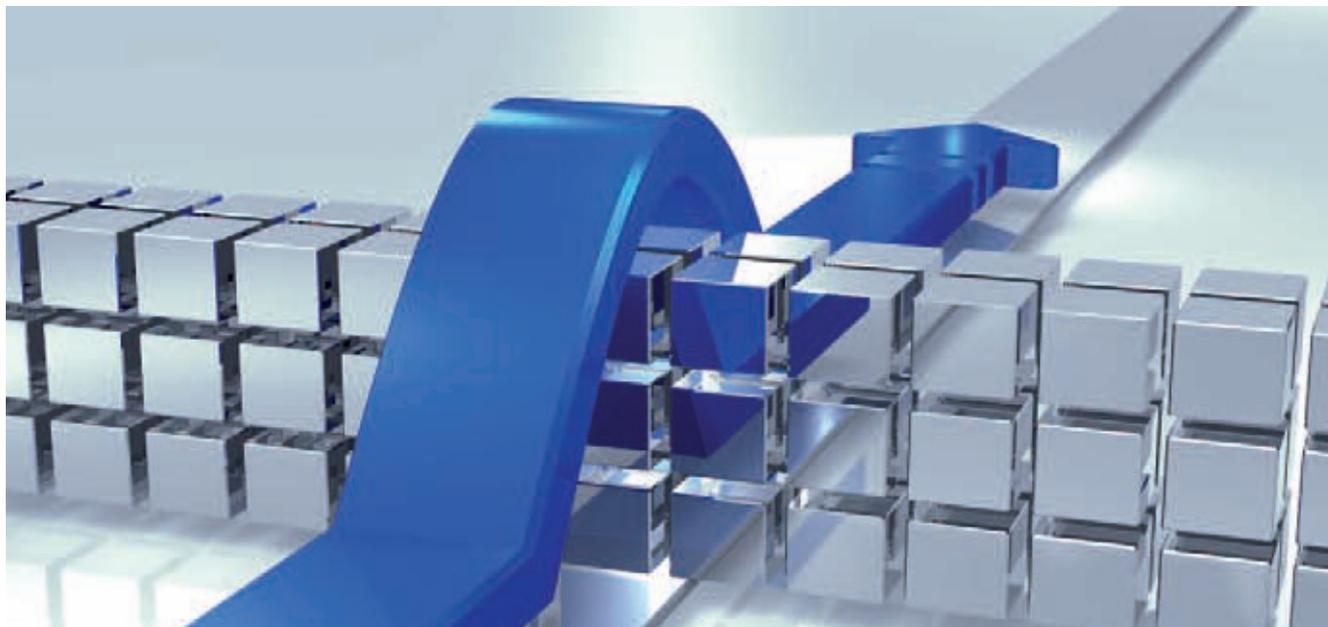
¹⁷Compliance: abrange a execução dos processos que garantem que as outras duas funções sejam desempenhadas de acordo com as políticas estabelecidas.

Elementos de um framework objetivo de MRM

13. As instituições mais avançadas neste assunto dispõem de um *framework* de gestão do risco de modelo (MRM) que se substancia em um documento aprovado pelo Conselho de Administração e que detalha aspectos relativos à organização e governança, gestão de modelos, etc.
14. Em relação à organização e governança, o *framework* de MRM caracteriza-se por sua transversalidade (envolve várias áreas, como as linhas de Negócios, Riscos, Auditoria Interna, Tecnologia, Finanças, etc.), a definição explícita das três funções que o regulador demanda (*ownership, control e compliance*) e sua designação a funções específicas da organização e, sobretudo, o estabelecimento de uma função de Gestão de Risco de Modelo (MRM), cuja responsabilidade seja criar e manter o *framework* de MRM
15. Em algumas organizações, a função de MRM inclui a função de Validação Interna (embora em outras seja uma função distinta) e, em todo caso, ocupa-se de tudo o que está relacionado com a governança dos modelos: manter um inventário global de modelos atualizado, elaborar e difundir as políticas de MRM, avaliar anualmente todos os modelos da instituição, etc.
16. A função de MRM, liderada habitualmente por um *Model Risk Officer* (MRO), costuma ter a última palavra sobre a aprovação de qualquer modelo da instituição.
17. Em relação à gestão de modelos, o *framework* de MRM inclui aspectos como: (a) o inventário de modelos, que faz um levantamento de todos os modelos da instituição em todos os âmbitos (riscos, comercial, finanças, etc.), em geral com uma ferramenta tecnológica apropriada que registre todas as mudanças e versões; (b) um sistema de classificação ou *tiering* dos modelos em função do risco que apresentem para a instituição, de que depende o nível de exaustividade no acompanhamento, na validação e na documentação dos modelos; (c) uma documentação completa e detalhada de cada modelo, que permita a réplica por parte de um terceiro e a transferência para um novo desenvolvedor de modelos sem perda de conhecimento; e (d) um esquema de acompanhamento dos modelos que permita detectar o quanto antes os desvios de desempenho do modelo em relação ao previsto, assim como usos inadequados, para adotar ações em consequência.
18. A validação dos modelos é um elemento central para a gestão do risco de modelo, e deve considerar como princípio fundamental o questionamento (*challenge*) crítico, efetivo e independente de todas as decisões tomadas em desenvolvimento, acompanhamento e uso do modelo. A periodicidade e a intensidade da validação de cada modelo devem ser proporcionais a seu risco, medido através de seu *tier*, e o processo e o resultado da validação devem ser documentados exaustivamente.
19. Embora a quantificação do risco de modelo não seja um elemento requerido pela regulamentação (com exceção do que já foi comentado na introdução), algumas instituições estão começando a incorporá-lo em sua gestão com o objetivo de identificar e medir de forma objetiva potenciais impactos derivados das manifestações do mencionado risco.

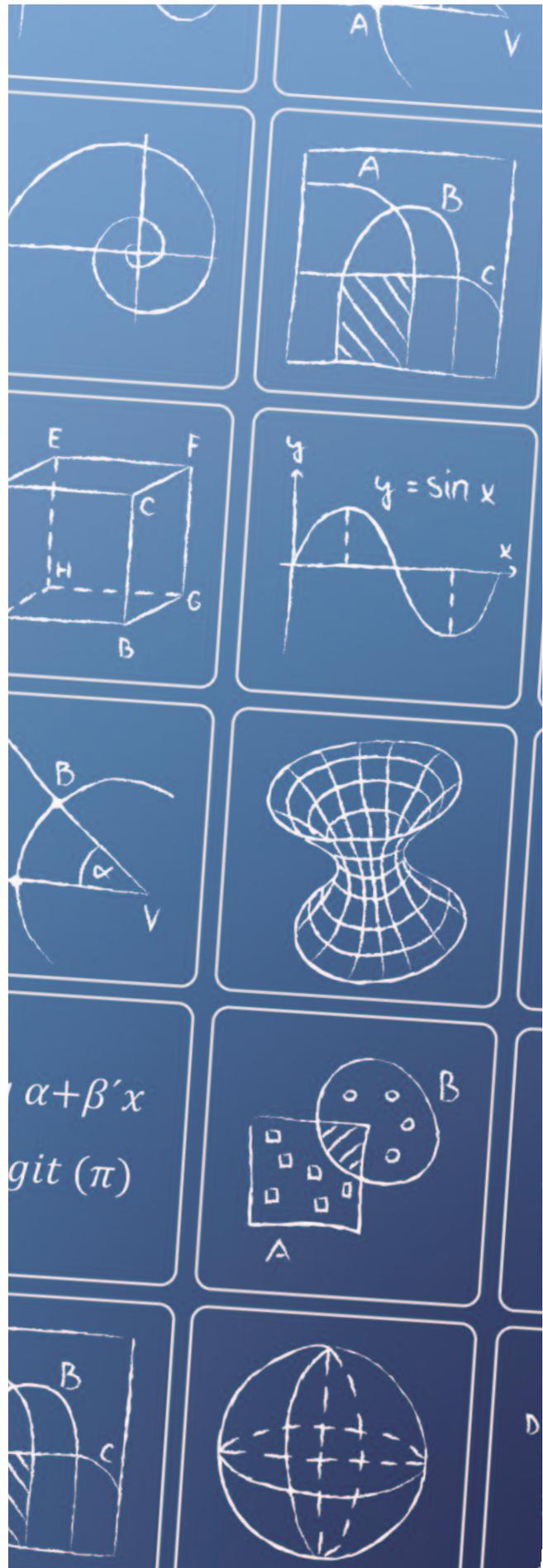
Quantificação do risco de modelo

20. Além da regulamentação, e com objetivos de gestão, algumas instituições começaram a trabalhar no ciclo de quantificação do risco de modelo, que consta fundamentalmente de três fases: identificação e classificação das fontes de risco de modelo: (1) carências nos dados, (2) incerteza na estimativa ou erros no modelo e



(3) uso inadequado do modelo; estimativa do risco de modelo de cada fonte (sensibilidade dos *outputs* às flutuações dos *inputs*); e mitigação do risco de modelo através da aplicação das medidas oportunas.

21. Para ilustrar este processo, foi realizado um estudo cujo objetivo é estimar o risco de modelos e parâmetros de crédito.
22. Para exemplificar a estimativa de carências nos dados, o primeiro exercício analisa o impacto da ausência de informações nas variáveis mais preditivas de um modelo de *scoring* de financiamentos imobiliários de pessoas físicas. Observa-se que a presença de erros nas variáveis mais preditivas do modelo pode elevar significativamente a taxa de *default*, ou alternativamente elevar o custo de oportunidade (reduzir o volume de negócios captado) se fosse estabelecida a mesma inadimplência.
23. O segundo exercício está orientado a analisar o risco de modelo proveniente da incerteza na estimativa, utilizando para isso os intervalos de confiança dos estimadores. Com este objetivo, a partir dos intervalos de confiança de um modelo de *scoring*, do cálculo da PD e do cálculo da LGD (de forma separada e de forma combinada), observa-se como o consumo de capital em uma carteira hipotecária pode chegar a estar subestimado pelo efeito combinado da incerteza nos estimadores do *scoring*, na calibração da PD e na estimativa da LGD.
24. Por último, o terceiro exercício analisa o uso inadequado dos modelos tomando como exemplo a falta de atualização dos mesmos (neste caso, um modelo de *scoring*) durante 12 meses após sua construção. Para isso, compara-se o poder preditivo do modelo no momento de sua construção com o que apresenta um ano depois, e é avaliado o impacto na inadimplência e no custo de oportunidade (menor captação de negócios) da decisão de não atualizá-lo. Observa-se que a falta de atualização do modelo estudado durante 12 meses leva a reduções de seu poder preditivo em vários pontos percentuais. A consequência desta redução é um aumento da taxa de *default*, ou alternativamente uma redução do volume de negócios captado (ou seja, um aumento do custo de oportunidade) mantendo a mesma inadimplência.
25. Em síntese, o risco de modelo pode ter impactos quantitativos muito relevantes, que podem levar a tomar decisões de gestão incorretas, ou inclusive a subestimar o consumo de capital ou as provisões de uma instituição. Por isso, é conveniente dispor de um *framework* de MRM e, se for o caso, avançar na utilização de técnicas robustas de estimativa do risco de modelo, orientadas à aplicação das técnicas de mitigação apropriadas.



Definição e regulamentação sobre risco de modelo



O que é um modelo?

Ao analisar o risco de modelo, a primeira pergunta que se pode fazer é definir o que é, e o que não é, um modelo.

De acordo com o Fed e a OCC¹⁸, o termo «modelo» refere-se a «um método quantitativo, sistema ou estratégia que aplica teorias, técnicas e hipótese estatísticas, econômicas, financeiras ou matemáticas para processar dados e obter estimativas quantitativas». Consta de três componentes (Fig. 2):

- ▶ A informações de entrada (*input*), que necessariamente introduzem hipótese e premissas do modelo.
- ▶ O método que transforma as informações de entrada em estimativas, que em geral empregará a estatística para produzir estimativas quantitativas.
- ▶ E o componente de relatório, que transforma as estimativas em informações úteis para os negócios.

Ainda de acordo com o Fed e a OCC, «a definição de modelo também abrange os enfoques quantitativos, cujos dados de entrada são parcial ou totalmente qualitativos ou se baseiam em critério especializado, sempre que a estimativa seja de natureza quantitativa».

¹⁸OCC- Fed (2011-12).

Como se pode avaliar, o conceito de modelo é mais amplo do que uma interpretação parcial – mais ligada ao algoritmo matemático em sentido estrito – sugeriria, e engloba, entre outros, os modelos especialistas.

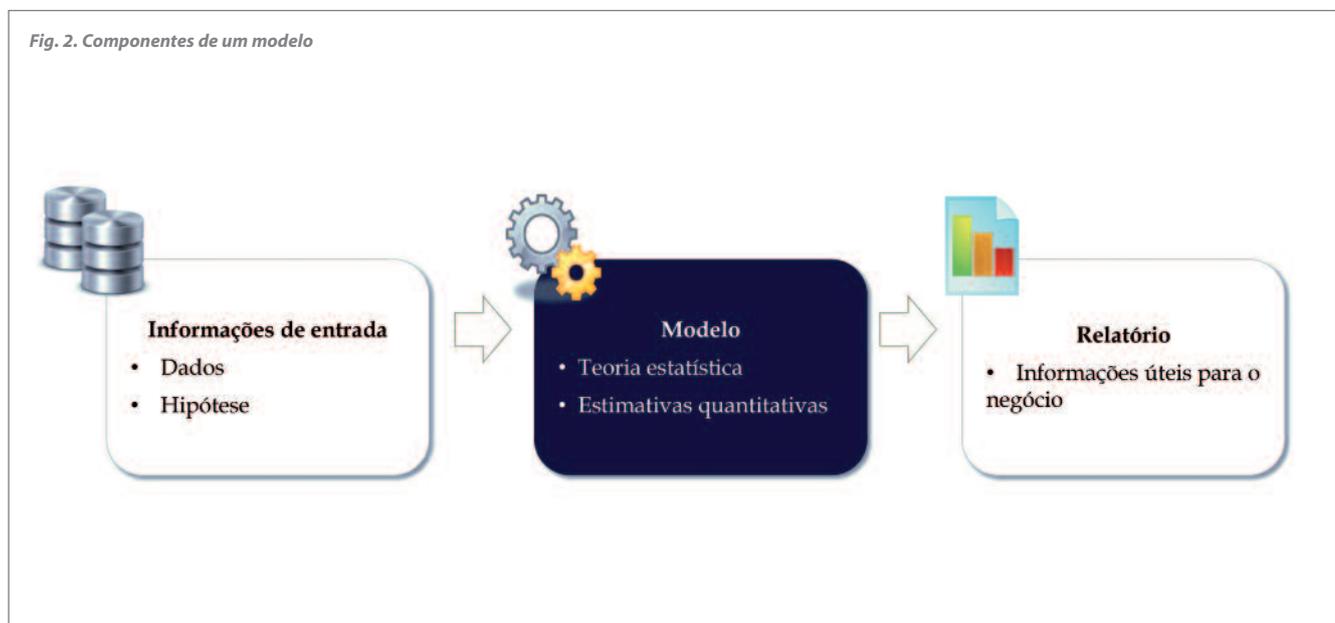
Não obstante, esta definição conserva certa margem para interpretação. Por exemplo, com uma definição como a citada, sem dúvida seriam considerados como modelos:

- ▶ Um algoritmo para o cálculo do *value-at-risk* (VaR) em risco de mercado mediante simulações tanto de Monte Carlo como históricas.
- ▶ Um *scoring* para o cálculo da probabilidade de *default* (*probability of default*, PD) dos empréstimos de uma carteira mediante uma regressão logística.
- ▶ Os mecanismos de avaliação de exposições, ativos, instrumentos, carteiras, derivativos, etc.

Por outro lado, com esta definição seria questionável considerar como modelos:

- ▶ Qualquer agregação simples de dados: somas, médias, desvios padrão, índices financeiros, etc.
- ▶ Uma projeção de crescimento anual constante tomando uma única variação anual histórica de referência, sem realizar nenhuma outra análise.

Fig. 2. Componentes de um modelo



- ▶ O mecanismo de tomada de decisões unicamente em função do valor de uma variável; por exemplo, uma regra simples de aceitação ou negação sobre a LTV.

Em todo caso, é uma decisão de cada instituição delimitar o escopo do que será considerado modelo e ficará portanto afetado pelo risco de modelo e as políticas relacionadas que serão definidas. Em algumas ocasiões, esse escopo será difuso e requerirá certo grau de critério subjetivo.

Uma vez delimitado o escopo do termo, também deverá se pronunciar sobre os tipos de modelos que serão objeto de análise (de riscos, comerciais, de projeções financeiras, etc.).

Risco de modelo: natureza e fontes

Os modelos são representações simplificadas da realidade. Esta simplificação é inevitável, considerando a complexidade das relações entre as variáveis, e em todo caso é um foco de risco que necessita ser identificado, analisado e administrado como qualquer outro risco de uma instituição.

O risco de modelo, de acordo com o Fed e a OCC, é definido como «o conjunto de possíveis consequências adversas derivadas de decisões baseadas em resultados e relatórios incorretos de modelos, ou de seu uso inadequado»¹⁹.

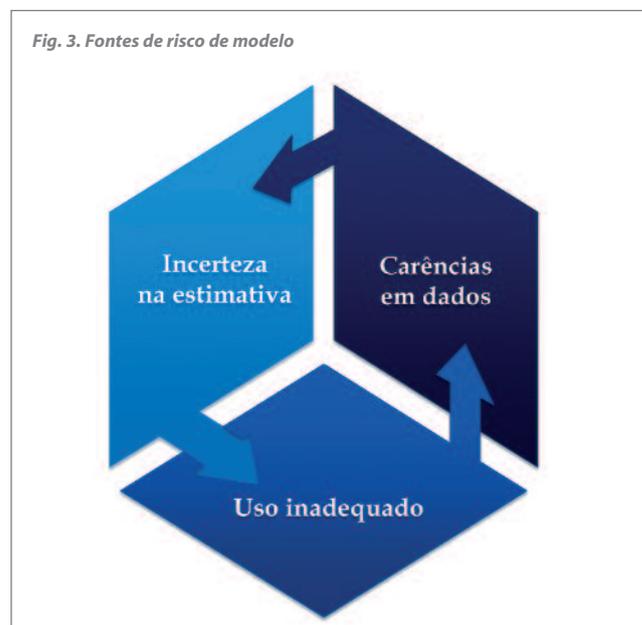
Se a isso forem agregadas de forma explícita as deficiências nos dados (que acarretam a incorreção de um modelo), as fontes do risco de modelo podem ser classificadas em três blocos (Fig. 3):



1. Carências nos dados, tanto de disponibilidade como de qualidade, que incluem erros nos dados, ausência de variáveis críticas, falta de profundidade histórica, falhas na alimentação das variáveis ou tamanhos amostrais insuficientes. Por exemplo, a utilização em um modelo de um valor de tributação na data de formalização de um contrato ao invés de à data mais recente, porque não foi armazenado nos bancos de dados.
2. Incerteza na estimativa ou erros no modelo, na forma de simplificações, aproximações, hipóteses incorretas ou um desenho incorreto do modelo. Podem ocorrer em qualquer ponto de seu desenvolvimento, desde o desenho até a implementação, o que pode provocar resultados incorretos e não alinhados com o objetivo e o uso previsto do modelo. Incluem a própria incerteza nos estimadores (que se reflita nos intervalos de confiança, que com frequência são calculados mas tendem a não ser usados), mas também o uso de parâmetros não observáveis, a ausência de consenso de mercado sobre a forma funcional do modelo, e as dificuldades computacionais, entre outros.
3. Uso inadequado do modelo, que inclui tanto sua aplicação fora do uso para o qual foi concebido (como construir um modelo de *rating* com uma carteira e aplicá-lo a uma carteira diferente, por exemplo de outro país), como o fato de não reestimar nem recalibrar os modelos em um longo período de tempo.

¹⁹*Ibid.*

Fig. 3. Fontes de risco de modelo



Contexto regulatório

Visão geral

Até a data, existem poucas normas que regulem de forma específica o risco de modelo, e as normas tendem a ser inespecíficas tanto em sua delimitação como no tratamento esperado. Especificamente além do documento normativo do Fed e da OCC que será analisado em detalhes, algumas referências regulatórias ao risco de modelo podem ser caracterizadas em três tipos (Fig. 4):

- ▶ **Ajustes de avaliação:** trata-se de norma que regula a necessidade de ajustar de forma prudencial a avaliação de determinados produtos (especialmente derivativos) para contemplar o possível risco de modelo.

Embora Basileia II já apontasse²⁰ para a necessidade de se proceder a esses ajustes, o principal *framework* regulatório nesta direção ocorreu em 2013, com a publicação por parte da EBA do RTS on *Prudent Valuation*, em que pela primeira vez são definidas pautas metodológicas específicas sobre como realizá-los. Representa, portanto, o único caso de quantificação explícita do risco de modelo incluído na regulamentação, como será detalhado mais à frente.

- ▶ **Buffer de capital vinculado ao ICAAP²¹:** tanto Basileia II em seu segundo pilar como certos reguladores locais²² ao transpô-lo incluem a necessidade de alocar capital por todos os riscos que a instituição considere relevantes, dentro de seu processo de autoavaliação do capital ou ICAAP.

Isso ocorre também em outros processos vinculados ao ICAAP, como o exercício de teste de estresse dos EUA conhecido como CCAR²³, em que o regulador também sugere a possibilidade de alocar um *buffer* de capital em

conceito de risco de modelo, embora não exija, e de fato algumas instituições fazem isso na prática.

Contudo, na maioria destas normas a menção explícita do risco de modelo é tangencial ou pode ser entendida englobada no conjunto de «outros riscos».

- ▶ **Outras menções:** agrupa outras referências menores ao risco de modelo, que o pressupõem implícito em outros elementos regulatórios. O caso mais notável é a consideração por parte do Comitê de Basileia da mitigação do risco de modelo através da aplicação do índice de alavancagem, embora não aprofunde muito mais neste aspecto²⁴.

Fed e OCC: Supervisory Guidance

O principal *framework* regulatório, no entanto, ocorreu em 2011-12, com a publicação por parte dos reguladores dos EUA da *Supervisory Guidance on Model Risk Management*²⁵. Pela primeira vez, foi definido com precisão o conceito de risco de modelo e estabelecida a necessidade de que as instituições disponham de um *framework* para identificá-lo e administrá-lo.

²⁰BCBS (2004-06): «699. As autoridades supervisoras esperam que, no mínimo, sejam considerados formalmente os seguintes ajustes/reservas de avaliação: [...] quando for procedente, o risco associado à utilização de um modelo».

²¹Internal Capital Adequacy Assessment Process.

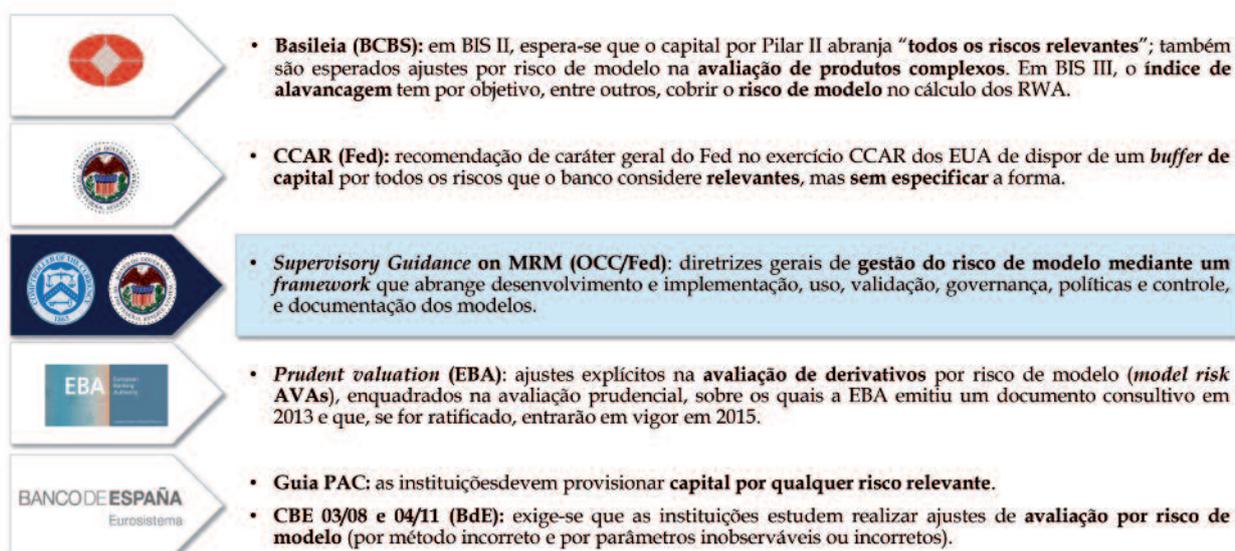
²²Ver, por exemplo, Banco de España (2008-14).

²³Comprehensive Capital Analysis and Review.

²⁴BCBS (2010-11): «16. [...] o Comitê introduz um coeficiente de alavancagem com os seguintes objetivos: [...] introduzir medidas de salvaguarda adicionais frente ao risco de modelos e erros de mensuração, complementando as medidas baseadas em risco com outras mais simples, transparentes e independentes».

²⁵OCC-Fed (2011-12).

Fig. 4. Principais referências regulatórias sobre risco de modelo



Para isso, a norma apresenta uma série de diretrizes ou princípios de atuação sobre o risco de modelo, estruturados por áreas (Fig. 5), que podem ser sintetizados nos seguintes (Fig. 6):

1. O risco de modelo deve ser administrado como qualquer outro risco; as instituições devem identificar suas fontes e avaliar sua magnitude para poder administrá-lo.
2. O risco de modelo não pode ser eliminado, só pode ser mitigado com boa gestão. Uma combinação de modelagem experiente e validação robusta, embora necessária, não basta para eliminar o risco de modelo.
3. Em consequência, deve existir um *framework* de gestão do risco de modelo (MRM), aprovado pelo Conselho de Administração.
4. O conservadorismo bem apoiado nos *inputs*, nos *outputs* e no desenho do modelo é uma ferramenta eficaz, mas não pode ser argumento para evitar uma abordagem de melhoria contínua dos modelos.
5. O uso prudente de modelos pode incluir enfoques conservadores devidamente justificados, o teste de estresse do modelo, ou um possível *buffer* de capital por risco de modelo. Não obstante, o próprio regulador também adverte que um abuso de elementos conservadores pode desencadear um mal uso dos modelos.
6. As fontes de risco de modelo são múltiplas e as instituições devem prestar especial atenção ao risco de modelo agregado que resulta da combinação de todas elas.
7. Embora seja critério das instituições a escolha do modelo organizacional que considerarem conveniente, é necessário que exista uma distinção clara entre as funções de *ownership*, *control* e *compliance* dos modelos; onde *ownership* implica conhecer o risco de modelo ao qual se está sujeito; *control* contempla o estabelecimento de limites e o acompanhamento, assim como a validação independente do modelo; e *compliance* abrange o conjunto de processos que garantam que as funções de *ownership* e *control* serão desempenhadas de acordo com as políticas estabelecidas.
8. O Conselho de Administração é o responsável em última instância do *framework* de gestão do risco de modelo, que deve aprovar, e deve ser informado periodicamente sobre o risco de modelo significativo ao qual a instituição esteja exposta.
9. O princípio chave na mitigação do risco de modelo é o *effective challenge*: a análise crítica por parte de profissionais objetivos, qualificados e com experiência na linha de negócios em que o modelo é usado, que possam identificar as limitações e premissas, e propor as melhorias apropriadas.

Em síntese, os reguladores estão impulsionando a elaboração de *frameworks* de gestão do risco de modelo que formalizem os critérios que devem ser seguidos no desenvolvimento e na implementação de modelos, garantam seu uso prudente, determinem os procedimentos de validação de seu desempenho e delimitem a governança das políticas e os critérios de documentação aplicáveis.

Esta aproximação integrada ao risco de modelo é inovadora no setor, e a tendência esperável nos próximos anos é que as instituições se adaptem progressivamente, como já estão fazendo as mais avançadas.

Fig. 5. Estrutura e âmbitos da norma do Fed e da OCC sobre gestão do risco de modelo

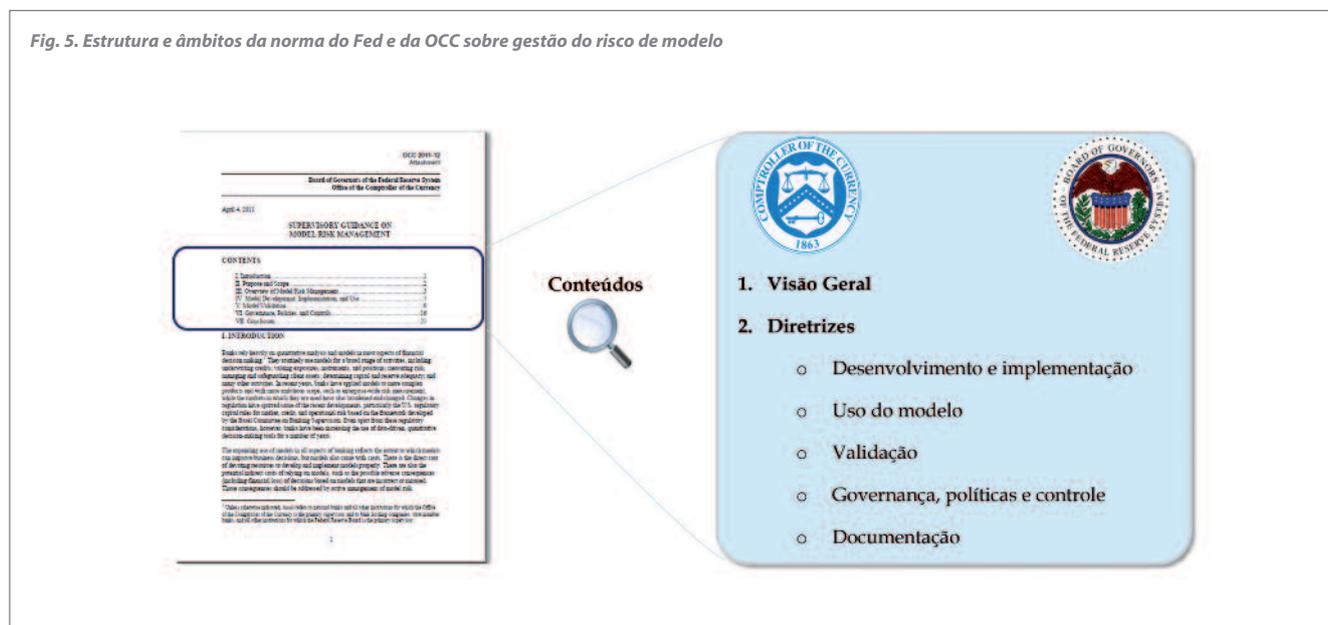
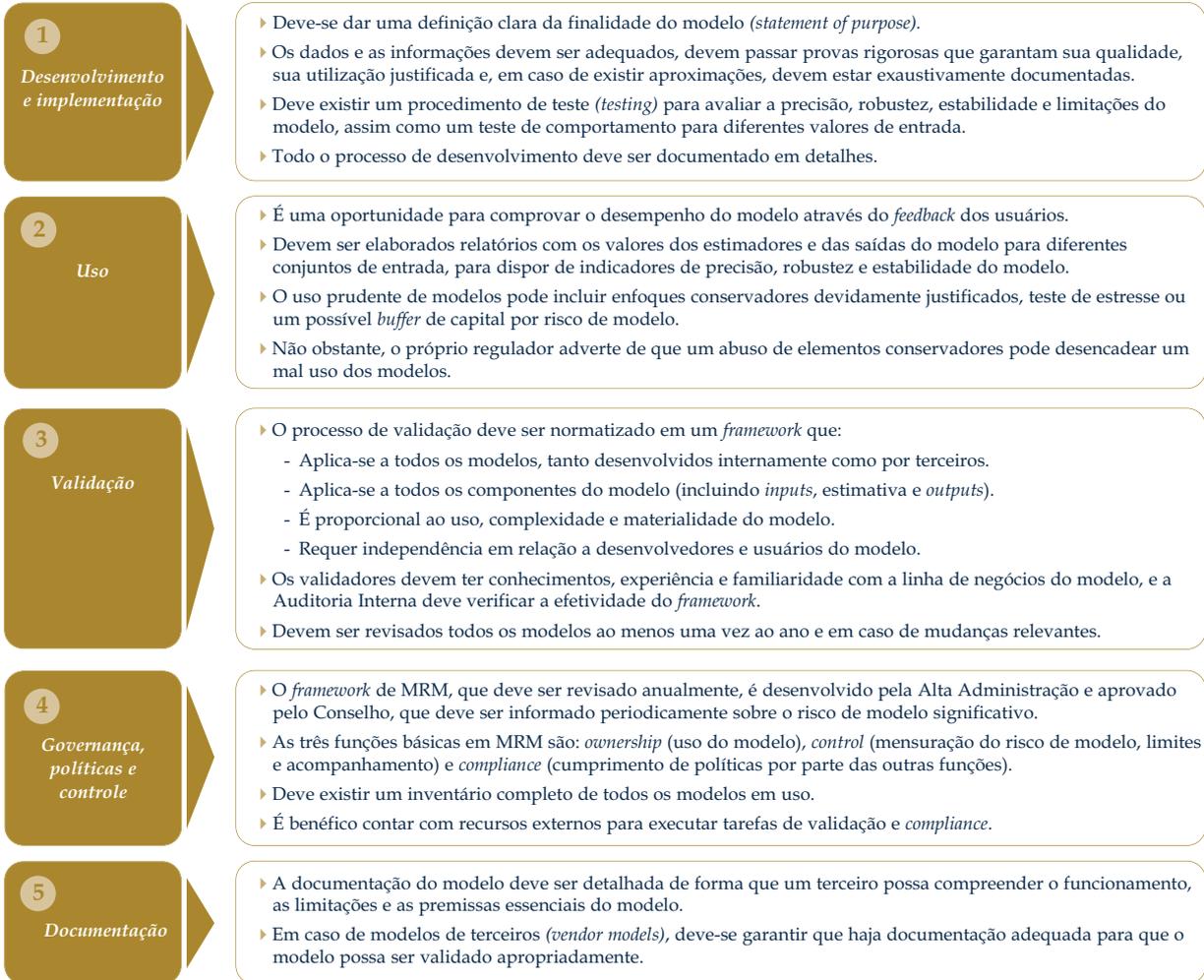


Fig. 6. Síntese das diretrizes do Fed e da OCC sobre gestão do risco de modelo



Fontes comuns de risco de modelo

O risco de modelo está presente em todas as fases do ciclo de vida de um modelo: desenvolvimento e aplicação, acompanhamento, validação e auditoria; e provém de três fontes fundamentais: os dados, a incerteza e os erros na estimativa, e o uso do modelo.

A seguir, são sintetizados alguns exemplos de problemas comuns que geram risco de modelo em função do tipo de fonte.

Dados	Estimativa	Uso
<ul style="list-style-type: none"> - Erros na definição dos dados - Erros no mapeamento dos dados com as fontes de informações - Periodicidade de alimentação insuficiente - Problemas provenientes do abastecimento dos dados - Migrações de dados - Precisão dos <i>proxies</i> (margem de erro) - Amostra insuficiente - Insuficiência de profundidade histórica - Ausência de variáveis críticas 	<ul style="list-style-type: none"> - Incerteza nos estimadores - Falta de reflexo ou adequação da realidade - Hipóteses matemáticas inadequadas - Elevada sensibilidade dos ajustes especializados - Uso de parâmetros não observáveis - Ausência de consenso de mercado - Dificuldades computacionais - Não utilização de intervalos de confiança - Modelo desatualizado por descalibração de parâmetros, ajustes especializados não atualizados, variáveis sem capacidade discriminante, etc. - Instabilidade do modelo - Falta de documentação exaustiva - Capacidades analíticas insuficientes - Utilização de metodologias inovadoras sem apoio acadêmico - Falta de independência da unidade de Validação em relação aos desenvolvedores 	<ul style="list-style-type: none"> - Uso do modelo com objetivos para os quais não foi desenhado - Divergências entre usos regulatórios e de gestão - Extensão do escopo de uso do modelo (novos produtos, mercados, segmentos, etc.) - Falta de uso efetivo do modelo na prática - Modelos não reestimados nem recalibrados em longos períodos - Introdução de mudanças não aprovadas no modelo - Diferenças na definição e nos usos entre as áreas comerciais e riscos - Reduzida credibilidade do modelo por parte do usuário

Elementos de um framework objetivo de MRM



Política de MRM

Diferentes instituições financeiras internacionais foram desenvolvendo uma série de conceitos-chave em relação à gestão do risco de modelo (MRM), que são sintetizadas nesta seção como possíveis melhores práticas.

Todas elas contemplam como necessária a criação de um *framework* de gestão do risco de modelo (MRM *framework*) aprovado ao máximo nível, que estabeleça como elementos centrais as funções de *ownership*, *control* e *compliance* dos modelos.

Este *framework* se desdobra em uma política escrita e explícita, aprovada pelo Conselho de Administração e que contempla quatro elementos principais (Fig. 7):

- ▶ Organização e governança: descrição de funções e responsabilidades; e, especificamente, estabelecimento da função de Gestão de Risco de Modelo (MRM) como referência para todas as questões sobre este tema.
- ▶ Gestão de modelos: pautas sobre classificação, desenvolvimento, acompanhamento, documentação, inventário e relatório de modelos.
- ▶ Validação e gestão de mudanças em modelos: diretrizes sobre a revisão dos modelos, a aprovação de mudanças e

as dispensas (*waivers*) necessárias para sua utilização antes da aprovação.

- ▶ Quantificação do risco de modelo: metodologia de estimativa do risco de modelo, segundo sua natureza e classificação.

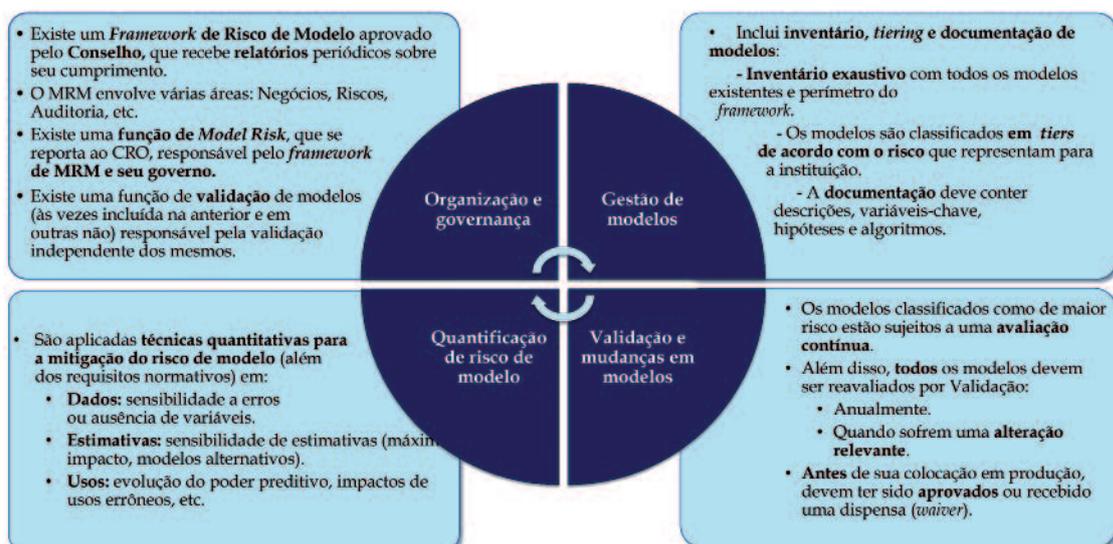
Organização e governança de modelos

O Conselho de Administração é o responsável em última instância pela aprovação do *framework* de MRM. Além disso, e em linha com o que foi estabelecido pelas diretrizes da OCC e do Fed, o Conselho deve receber relatórios periódicos sobre o cumprimento da política de MRM e deve ser informado sobre qualquer risco de modelo que seja relevante para a instituição. Deste modo, as melhores práticas equiparam o risco de modelo a qualquer outro risco de importância para a instituição.

Do ponto de vista organizacional, a gestão do risco de modelo caracteriza-se por três elementos:

- ▶ Transversalidade: a gestão do risco de modelo afeta várias áreas de uma instituição; entre elas, as linhas de Negócios, Riscos, Finanças, Auditoria Interna e Tecnologia.

Fig. 7 . Elementos de uma política de gestão do risco de modelo (MRM)



- ▶ Funções: a política de MRM deve definir a função de cada área na gestão do risco de modelo. Em linha com o que foi estabelecido nas diretrizes da OCC e do Fed, devem ser distinguidas três funções:
 - *Ownership*: áreas usuárias finais do modelo, e que, por tanto, têm responsabilidade sobre seu bom uso e a obrigação de reportar erros ou inconsistências; também inclui a área que desenvolve o modelo, próxima ao usuário final. Costuma corresponder às linhas de Negócios, a Finanças ou a Riscos.
 - *Control*: área que realiza a mensuração do risco de modelo, estabelece os limites e realiza o acompanhamento. Deve ser executada por Riscos ou por uma função específica e independente da função de controle, que por sua vez pode conter ou não a função de Validação Interna.
 - *Compliance*: área que supervisiona o cumprimento das políticas por parte das outras duas funções. Costuma corresponder à função de Compliance ou à de Auditoria.
- Trabalhar de forma contínua com os *owners* dos modelos para manter um inventário global permanentemente atualizado.
- Validar os modelos de forma independente segundo sua classificação (em algumas organizações, esta função é executada por outras unidades independentes).
- Aprovar o uso de modelos e indicar suas limitações.
- Realizar uma avaliação anual de todos os modelos do inventário.
- Elaborar e difundir as políticas de risco de modelo.

Além disso, a função de MRM costuma dispor de uma estrutura hierárquica onde aparecem funções diferenciadas, lideradas por um *Model Risk Officer* (MRO).

Gestão de modelos

Cabe destacar que o processo e os envolvidos na construção de modelos não são necessariamente os mesmos na Europa e nos EUA, onde há tendência a esquemas mais descentralizados e pulverizados nas linhas de Negócios.

O *framework* de MRM contém as diretrizes que os modeladores devem considerar durante o processo de desenvolvimento dos modelos, assim como os elementos-chave para que o risco de modelo seja controlado. Entre as principais diretrizes, podem ser citadas as seguintes:

- ▶ Função de MRM: as melhores práticas incluem a criação de uma função de Gestão do Risco de Modelo (MRM), que se reporta ao CRO²⁶, cuja responsabilidade é criar e manter o *framework* de MRM. Em algumas organizações contém a unidade de Validação Interna (em outras, são unidades distintas) e, portanto, aprova os modelos e seu uso, mas também administra tudo o que está relacionado com o governança dos modelos. Entre suas responsabilidades, estão incluídas:
 1. Objetivo e uso: todo modelo deve ter um objetivo claramente explicitado e deve ser utilizado para o uso para o qual foi desenhado e aprovado; qualquer uso fora dos previstos em sua construção deve ser aprovado de forma expressa.
 2. Inventário: é obrigação dos desenvolvedores de modelos declarar todo modelo que seja desenvolvido, para sua inclusão no inventário de modelos e posterior validação e acompanhamento.

²⁶Chief Risk Officer.



3. *Tiering*: todo modelo deve ser categorizado em função do risco que seu uso apresenta para a instituição.
4. Documentação: todo modelo deve ser documentado com um nível de exaustividade proporcionado a seu *tier*, e deve conter uma descrição de objetivos, usos previstos, dados de entrada, hipóteses e metodologia empregada.
5. Sem redundância: antes do desenvolvimento de um modelo, o desenvolvedor de modelos deve confirmar que não há um modelo existente que possa satisfazer as necessidades do usuário.

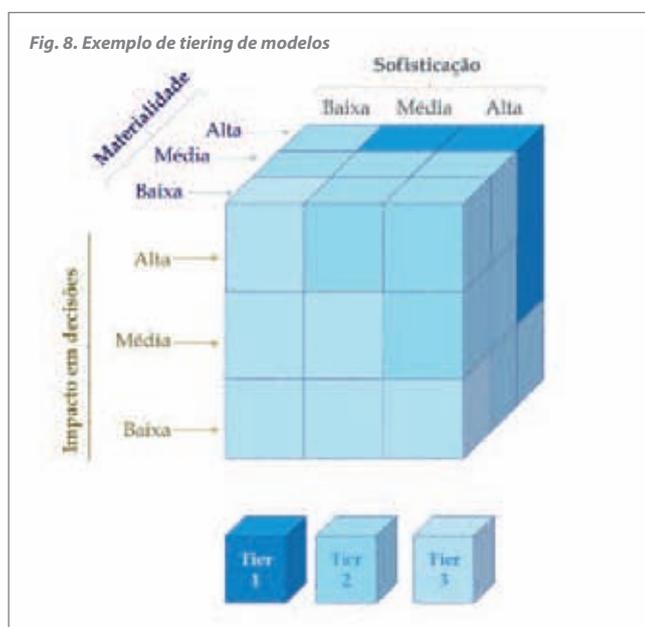
Em relação aos elementos-chave que um *framework* de MRM contém para o desenvolvimento e a gestão dos modelos, destacam-se quatro peças fundamentais: inventário, *tiering*, documentação e acompanhamento de modelos, detalhadas a seguir.

Inventário de modelos

Uma instituição deve contar com um inventário exaustivo de todos os modelos existentes, com o objetivo de facilitar a governança e a gestão do risco de modelo e de manter um censo dos usos, das mudanças e do *status* de aprovação de cada modelo.

O inventário de modelos deve:

- ▶ Conter todos os modelos da instituição, dentro do escopo do que o *framework* de MRM considera «modelo» e em todos os âmbitos: Riscos, Comercial, Finanças, etc.
- ▶ Incluir informações sobre o *tier* de cada modelo, sua documentação, seu estado de revisão, os usos previstos e reais, os possíveis *waivers* que estejam sendo aplicados e qualquer outra informação que a função de MRM considere relevante para sua boa governança.



- ▶ Estar apoiado em uma ferramenta tecnológica apropriada, que contenha um repositório único e centralizado para toda a instituição e idealmente uma interface que permita a interlocução entre o *owner* (incluindo o desenvolvedor), o validador e o auditor do modelo.
- ▶ Guardar registro de todas as versões, mudanças, *waivers*, documentos, considerações dos validadores e do supervisor (quando for aplicável) e datas previstas de acompanhamento e atualização do modelo.

Como se pode avaliar, a construção e a manutenção de um inventário de modelos representa um esforço relevante para uma instituição, mas resulta em uma peça essencial para a gestão do risco de modelo.

Tiering de modelos

É uma boa prática classificar os modelos em função do risco que sua utilização envolve para a instituição. Desta classificação ou *tiering* dependem a exaustividade requerida na documentação do modelo, a necessidade de aprovação das mudanças por parte dos validadores, e a frequência e o rigor do acompanhamento, entre outros aspectos.

Em um processo de *tiering* habitual, o *owner* de um modelo propõe um nível de risco para o modelo, mas é a função de MRM que sanciona e tem a última palavra a este respeito.

O *tier* de um modelo é um processo em parte subjetivo, e trata de refletir os critérios mediante os quais cada instituição aproxima o risco de cada modelo. Como exemplo, um *tiering* pode depender dos seguintes fatores (Fig. 8):

- ▶ Materialidade, que reflete as consequências econômicas de um possível erro ou mal uso do modelo, e que cada *owner* quantifica nos termos mais apropriados: exposição ou saldo



em balanço de ativos afetados, margem comprometida, métricas de impacto reputacional, etc.

- ▶ Sofisticação, que expressa o nível de complexidade do modelo: formulação matemática com elevada dificuldade, dependência de um elevado número de variáveis de entrada, estabilidade observada dos parâmetros, aproximações numéricas a expressões analíticas (ex.: equações diferenciais estocásticas), algoritmos inovadores ou sobre os quais não há evidência acadêmica de seu rendimento e estabilidade, etc.
- ▶ Impacto em decisões, que indica em que medida os resultados do modelo influem em processos de decisão sensíveis da instituição, ou nas demonstrações financeiras e no reporte regulatório. Os modelos de alta dependência são aqueles cujo resultado é o eixo central de uma decisão essencial da instituição, como o cálculo do capital das provisões, enquanto os de baixa dependência são aqueles utilizados como um fator adicional no apoio a uma decisão não crítica. Costumam ser classificados em três níveis.
 - Departamento, se um erro no modelo só afetaria um departamento ou área.
 - Instituição, se um erro afetaria vários departamentos da instituição.
 - Externo, se o erro pode afetar o relatório da instituição para terceiros, como o supervisor, as agências de *rating*, os acionistas, etc.

A classificação ou *tiering* de cada modelo deve ser devidamente justificada e documentada por parte do *owner* do modelo, e aprovada por parte da função de MRM.

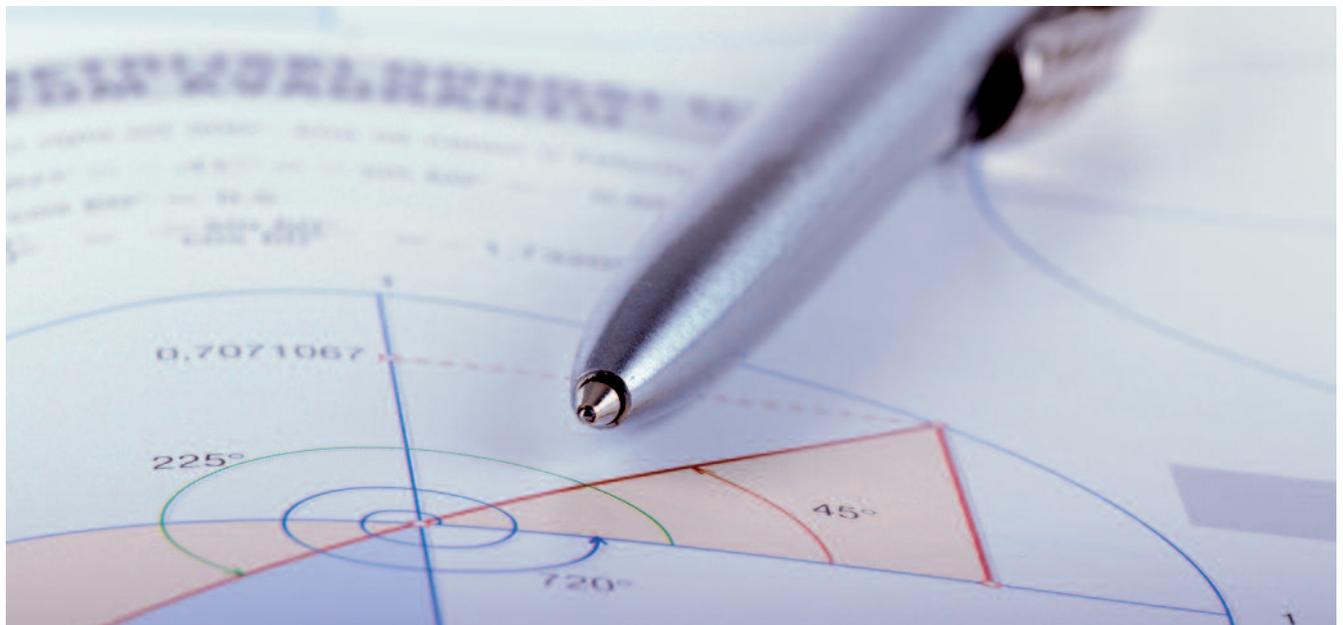
Documentação de modelos

O terceiro elemento essencial no desenvolvimento dos modelos é sua documentação, sobre a qual os reguladores estão exercendo uma pressão crescente, e que bem administrada é um pilar efetivo de controle do risco de modelo.

Antes do início da validação de cada modelo, é necessário completar sua documentação de forma exaustiva. A documentação deveria seguir roteiros unificados e aprovados pela função de MRM, e deveria permitir a réplica do modelo completo por parte de um terceiro independente, ou inclusive sua transferência para um novo desenvolvedor de modelos para atualização ou melhoria sem necessidade de um processo de alto custo.

A documentação de um modelo deveria conter ao menos os seguintes elementos.

- ▶ Fontes de dados: bancos de dados utilizados, critérios de extração aplicados, validações efetuadas, responsáveis pela fonte de dados e da extração, etc.
- ▶ Relatório metodológico do modelo: descrição do modelo, necessidade e objetivos, escopo, usos previstos, limitações e premissas, justificação e descrição detalhada da metodologia empregada, detalhamento dos dados empregados e justificação em termos de idoneidade, qualidade e robustez, etc.
- ▶ Relatório de calibração do modelo: no caso de modelos que contêm parâmetros calibrados com dados de mercado ou históricos, descrição detalhada da metodologia, *benchmarks* aplicados, quantificação da incerteza dos estimadores, e frequência, alertas e procedimento para recalibração.



- ▶ **Ajustes especialistas:** estuda-se o impacto dos ajustes especializados ao modelo; por exemplo, a decisão manual quando é modificada a norma automática atribuída pela estratégia de decisão (*overrides*).

Por exemplo, um bom acompanhamento de um modelo de decisão em risco de crédito permitiria avaliar vários aspectos, como o poder preditivo do modelo, a eficácia do ponto de corte em termos de mora, o caráter vinculante da estratégia de decisão automática (*scoring* + regras), o funcionamento correto e a ordem de aplicação das regras de decisão, a percentagem de decisão manual e, em consonância, a idoneidade das atribuições, os *overrides* e a tipificação de seus motivos, o custo de oportunidade (solicitações negadas ou desistidas), ou o uso de critérios adicionais aos estatísticos (por exemplo, rentabilidade e custos) nas decisões, entre outros.

Para este fim, é útil dispor de ferramentas que abranjam todo o ciclo de acompanhamento de modelos (Fig. 9) e que também permitam realizar análise *what-if* e colocar em produção de forma ágil as modificações nos modelos derivados das observações do acompanhamento²⁷.

Validação de modelos

A validação dos modelos é um elemento central para a mitigação do risco de modelo, que realiza um questionamento (*challenge*) efetivo e independente das decisões tomadas durante seu desenvolvimento, acompanhamento e uso.

A periodicidade e a intensidade da validação devem ser proporcionais ao risco de cada modelo, medido através de seu *tier*. Assim, os modelos de maior risco (*tier* 1) devem ser validados por analistas com suficiente experiência e qualificação com tanta frequência quanto necessário para seu uso, e sua documentação deve ser particularmente exaustiva,

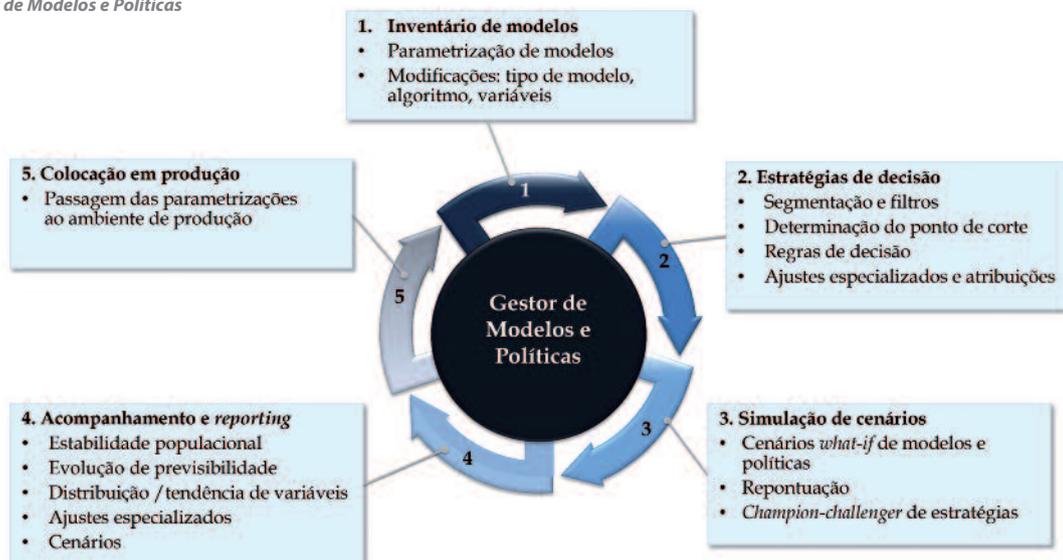
enquanto os modelos de menor risco podem ser revisados uma vez ao ano e as exigências de documentação são muito menores.

De acordo com a regulamentação e as melhores práticas, há uma série de princípios que a validação de modelos deve cumprir:

1. **Completude:** todos os modelos que possam comportar riscos para a instituição devem ser submetidos ao processo de validação.
2. **Escopo:** a validação não deve se limitar unicamente aos atributos quantitativos dos modelos, e deve cobrir no mínimo os seguintes aspectos:
 - Metodologia.
 - Documentação.
 - Qualidade dos dados utilizados.
 - Aspectos quantitativos.
 - Aspectos qualitativos (teste de uso, função da Alta Administração, controles internos, etc.).
 - Ambiente tecnológico.
3. **Dimensionamento e qualificação:** a função de Validação deve contar com um número suficiente de profissionais qualificados para os diferentes aspectos objeto de análise.
4. **Independência:** a instituição deve garantir que a função de Validação possa emitir sua opinião com total independência, evitando possíveis influências indevidas das unidades participantes do desenvolvimento de modelos ou outras.

²⁷A este respeito, a Management Solutions dispõe do Gestor de Modelos e Políticas do MIR, desenhado com esta arquitetura e funcionalidades.

Fig. 9. Gestor de Modelos e Políticas



5. Responsabilidade: o processo de validação é responsabilidade da instituição, e não pode ser delegado a terceiros ou ao supervisor.
6. Periodicidade: a validação é um processo iterativo que deve ser realizado com certa periodicidade (dependente do *tier* do modelo).
7. Critério interno: não há um único método de validação padronizado para todas as instituições e para todos os modelos; cada instituição deve estabelecer seus padrões com seu próprio critério, proporcional ao risco de modelo.
8. Organização: as funções, responsabilidades, esquema de trabalho e enquadramento dentro da organização da função de Validação devem estar documentados e ser aprovados ao nível correspondente.
9. Documentação: a função de Validação deve manter atualizada a documentação descritiva sobre diferentes aspectos:
 - Metodologias de avaliação, mensuração e acompanhamento, assim como dos modelos estatísticos.
 - Relatórios de validação, incluindo os realizados por Auditoria Interna e os relativos ao processo de validação, com a conclusão claramente indicada (aprovado, condicionalmente aprovado –*waiver*– ou desaprovado) e, se for o caso, com as ações específicas para melhoria e aprovação.
 - Histórico das alterações efetuadas nos sistemas internos, incluído o próprio sistema de validação.
10. Auditoria: a própria função de Validação deve ser objeto de revisão por parte de Auditoria Interna, que deve analisar

seu trabalho e controles implantados, assim como opinar sobre o grau de independência efetiva desta unidade.

11. *Vendor models*: os modelos desenvolvidos por terceiros (*vendor models*) apresentam dificuldades adicionais para validação, porque a documentação pode não estar completa e os dados de construção podem não estar disponíveis. Nesses casos, a instituição deve exigir todas as informações necessárias e aplicar os mesmos procedimentos para validar o modelo e com o mesmo rigor como se fosse interno, limitada apenas pelos requisitos legais.

Quantificação do risco de modelo

Embora a regulamentação não exija a quantificação do risco de modelo, como já foi comentado, a realidade é que algumas instituições já começam a incorporar em seu *framework* de MRM determinadas técnicas quantitativas para a mitigação do risco de modelo.

Estas técnicas são aplicadas em:

- ▶ Dados, mediante a sensibilidade a erros nas variáveis ou inclusive à falta de alimentação de dados chave para a execução dos modelos.
- ▶ Estimativas, empregando a sensibilidade dos resultados à volatilidade dos estimadores.
- ▶ Uso, através da vigilância da evolução do poder preditivo e de outras métricas de acompanhamento.

Na seção a seguir é detalhado de que modo é possível realizar esta quantificação, junto com um exercício que ilustra sua aplicação prática.



Quantificação do risco de modelo



Ciclo de gestão quantitativa do risco de modelo

Mais além de aspectos específicos de avaliação de derivativos (*model risk AVAs*²⁸) requeridos pela EBA, como já foi mencionado, é um fato que até esta data os reguladores não estão exigindo explicitamente a quantificação do risco de modelo, motivo pelo qual ainda não foram observados avanços significativos nesta área por parte das instituições²⁹.

Independentemente disto, e para fins de gestão, algumas instituições começaram a trabalhar no ciclo de gestão do risco de modelo a partir de uma ótica quantitativa, com o objetivo de servir de apoio à gestão qualitativa deste risco, recomendada pela norma do Fed e pela OCC. Assim entendido, um ciclo de gestão quantitativa do risco de modelo constaria de três fases (Fig. 10):

- ▶ Identificação das fontes do risco de modelo e classificação em função dos blocos antes mencionados:
 - Carências nos dados.
 - Incerteza na estimativa ou erros no modelo.
 - Uso inadequado do modelo.
- ▶ Quantificação do risco de modelo inerente a cada uma das fontes, empregando uma metodologia baseada na sensibilidade dos *outputs* do modelo às possíveis flutuações

(dos *inputs* ou dos estimadores) que caracterizam a incerteza associada à fonte.

- ▶ Mitigação do risco de modelo detectado e quantificado através da aplicação das medidas oportunas, que dependerão da natureza de cada fonte.

Embora não seja possível eliminar o risco de modelo, a aplicação de um enfoque que combine uma estrutura rigorosa de gestão como a descrita pelo Fed e pela OCC com uma quantificação detalhada e prudente como a descrita pode constituir uma estratégia efetiva para mitigá-lo.

Motivação e proposta do estudo

À luz da escassa prática observada na quantificação do risco de modelo no setor, que somente algumas instituições abordam, foi considerado de interesse realizar um exercício nesta direção. Para isso, foi elaborado um estudo cujo objetivo é quantificar este risco em modelos e parâmetros de risco de crédito.

²⁸ *Model risk additional valuation adjustments (AVAs)*, detalhados em EBA (2013).

²⁹ Constitui uma exceção o *buffer* de capital no exercício CCAR dos EUA, que algumas instituições estão aplicando.

Fig. 10. Ciclo de gestão quantitativa do risco de modelo

Fontes de MR	Identificação de fontes	Quantificação	Mitigação
Dados	<ul style="list-style-type: none"> • Erros nos dados. • Ausência de variáveis críticas. • Falta de profundidade histórica. • Variáveis mal alimentadas. • Amostra insuficiente. • Etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensibilidade do <i>output</i> a erros/ausência em cada variável (ex.: máximo impacto). 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Data Quality</i>.
Estimativas	<ul style="list-style-type: none"> • Incerteza nos estimadores. • Parâmetros não observáveis. • Ausência de consenso de mercado. • Dificuldades computacionais. • Incumprimento das hipóteses. • Etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensibilidade a estimadores (ex.: máximo impacto de variações). • Modelos alternativos. • <i>Benchmark</i> de mercado (ex.: comparação em transações). 	<ul style="list-style-type: none"> • Buffer de capital por MR. • Conservadorismo em <i>inputs</i>, estimativas e <i>outputs</i>. • <i>Back test</i> e <i>stress test</i> do modelo.
Usos	<ul style="list-style-type: none"> • Modelos não reestimados nem recalibrados em longos períodos. • Modelo utilizado com objetivos para os quais não foi desenhado. • Etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Observar e simular o decaimento do modelo (poder preditivo). • Observar e simular o impacto do uso errôneo do modelo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Governança rigorosa de uso de modelos. • Ferramenta de acompanhamento de modelos: <ul style="list-style-type: none"> • Definição de limites. • Acompanhamento frequente. • Alertas de deterioração.

O exercício consta de três partes, coincidentes com as três fontes de risco de modelo descritas:

- ▶ Carências nos dados: nesta primeira parte, será analisado o impacto da ausência de informações nas variáveis mais preditivas de um modelo; como exemplo, será considerado um modelo de *scoring* de financiamentos imobiliários para pessoas físicas. Para isso, o modelo de *scoring* será reconstruído sem estas variáveis, e serão determinadas a redução de poder preditivo associado e sua relação com os *outputs* de gestão do modelo: a inadimplência assumida (erro de tipo I) e os negócios que se deixa de captar ou custo de oportunidade (erro de tipo II).
- ▶ Incerteza na estimativa ou erros no modelo: na segunda parte, será estudado o risco de modelo proveniente da incerteza nos estimadores. Para isso, serão empregados os intervalos de confiança dos estimadores gerados pelo próprio modelo de *scoring*, pelo cálculo da PD não calibrado e pelo cálculo da LGD para descrever as distribuições normais caracterizadas por esses estimadores. Sobre estas distribuições, serão simulados por Monte Carlo diferentes conjuntos de parâmetros e será reestimado o capital regulatório da carteira. Assim, será obtida uma distribuição do consumo de capital da carteira, cuja volatilidade será proveniente exclusivamente da incerteza na seleção dos estimadores.
- ▶ Uso inadequado do modelo: por último, será analisado o risco derivado da falta de acompanhamento e atualização de um modelo de *scoring* perante a evolução da carteira no tempo. Para isso, será comparado o poder preditivo do modelo no momento de sua construção com o que apresentava um ano depois, e será avaliado o impacto da decisão de não atualizá-lo nos erros de tipo I e II.

Com isso, terão sido aportados três exemplos reais de quantificação do risco de modelo, com o objetivo de proporcionar uma medida de sua relevância.

Dados do estudo

O estudo foi elaborado empregando os seguintes dados, modelos e parâmetros³⁰:

- ▶ Uma amostra real de construção de um *scoring*, formada por empréstimos imobiliários. Consta de aproximadamente 200.000 empréstimos, com uma taxa de *default* de cerca de 4%.
- ▶ Uma amostra real de aplicação, um ano após à de construção, que levanta o estoque de empréstimos imobiliários nessa data e seu desempenho no ano seguinte.

- ▶ Um modelo de *scoring* hipotecário construído sobre a amostra anterior. Consta de 14 variáveis e tem um poder preditivo médio-alto (ROC³¹ de cerca de 78%).
- ▶ Os mecanismos de calibração dos parâmetros PD, LGD e CCF da carteira hipotecária de estudo.
- ▶ O mecanismo de cálculo de capital regulatório de Basileia por método IRB.

Principais Conclusões

As principais conclusões do estudo são as seguintes:

- ▶ Em relação ao risco de modelo proveniente dos dados, observa-se que a presença de erros nas três variáveis mais preditivas de um modelo de *scoring* pode chegar a duplicar a taxa de *default* que entra no balanço, ou alternativamente reduzir em 40% os negócios captados, no caso de se desejar manter a mesma inadimplência.
- ▶ A quantificação do impacto da incerteza na estimativa dos modelos resulta que o consumo de capital em uma carteira hipotecária pode chegar a estar subestimado em até 8%, com um nível de confiança de 90%, pelo efeito combinado da incerteza nos estimadores do *scoring* (4% de subestimativa quando se considera de forma isolada), na calibração da PD (7%) e na estimativa da LGD (2%).
- ▶ Por último, no que se refere ao uso inadequado, observa-se que a falta de atualização de um modelo durante 12 meses pode levar a reduções de cerca de 10% de seu poder preditivo. A consequência desta redução é um aumento de até 67% da taxa de *default*, ou alternativamente uma redução de 15% no volume de negócios captado (ou seja, um aumento de 15% do custo de oportunidade), caso seja determinado o ponto de corte de modo a manter a mesma inadimplência.

Em síntese, à parte os efeitos qualitativos já descritos, o risco de modelo pode ter impactos quantitativos muito relevantes, que podem levar a tomar decisões de gestão incorretas, ou a subestimar o consumo de capital de uma instituição. Por isso, algumas instituições incluem em seus *frameworks* de MRM técnicas robustas de quantificação do risco de modelo, orientadas para mitigá-lo de forma apropriada.

³⁰Todos os dados, modelos e parâmetros foram alterados parcialmente para garantir a confidencialidade, mas de forma que sejam mantidas a representatividade e a robustez do estudo.

³¹*Receiver operating characteristic*, medida do poder preditivo de um modelo de resposta binária.

Quantificação da incerteza: intervalos de confiança

O processo de estimativa de parâmetros populacionais costuma ser acompanhado da obtenção de intervalos de confiança, que outorgam uma estimativa mais realista do parâmetro, já que representam um intervalo ou conjunto de valores dentro dos quais encontra-se o verdadeiro valor do estimador com uma probabilidade determinada (estabelecida pelo nível de confiança). Assim, um intervalo com nível de confiança $1 - \alpha$ para um parâmetro θ é representado como:

$$[\theta_1, \theta_2] \text{ onde } P(\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2) = 1 - \alpha$$

Existem dois enfoques gerais para a estimativa de intervalos de confiança:

- Paramétricos, nos quais é pressuposta uma distribuição conhecida do estimador.
- Não paramétricos, em que não é pressuposto conhecimento algum sobre a distribuição.

A seguir, são apresentadas brevemente algumas técnicas habituais para a obtenção de intervalos de confiança dos parâmetros tanto paramétricos (tomando como exemplo uma regressão logística) como não paramétricos (como o cálculo de estimadores de tendência central, como médias ou medianas).

Intervalos de confiança dos estimadores da regressão logística (métodos paramétricos)

Em geral, a regressão logística é usada para relacionar respostas binárias discretas (por exemplo, o default ou pagamento de uma dívida) com um conjunto de variáveis explicativas, e por isso é o algoritmo mais utilizado nos modelos de *scoring* e *rating*. Esta relação pode ser expressa da seguinte forma:

$$\text{logit}(\pi) = \log\left(\frac{\pi}{1-\pi}\right) = \alpha + \beta'x$$

Onde x é o vetor de variáveis explicativas empregadas no modelo, π é a probabilidade de que ocorra a resposta Y que se pretende prever, condicionada a x (isto é, $\pi = P(Y=1|x)$), α é a interseção na origem da curva, e β é o vetor com as pendentes das variáveis x .

Ao desenvolver um modelo com uma regressão logística, são obtidos parâmetros α e β , chamados pesos ou estimadores. Portanto, a principal fonte de risco de modelo em uma regressão logística é o erro cometido na estimativa de seus pesos, e para quantificá-lo podem ser empregados seus intervalos de confiança.

Os intervalos de confiança de Wald, também chamados de intervalos de confiança normais, baseiam-se em que os estimadores se comportam de forma assintoticamente normal, e admitem uma expressão fechada. Assim, o intervalo de confiança $100 \cdot (1 - \alpha)\%$ de Wald para o estimador β_j é simplesmente:

$$I_\alpha = \hat{\beta}_j \pm z_{1-\alpha/2} \hat{\sigma}_j$$

onde z_p é o percentil $100 \cdot p\%$ da distribuição normal padrão, $\hat{\beta}_j$ é o estimador máximo-verossímil de β_j , e $\hat{\sigma}_j$ é a estimativa do erro padrão de $\hat{\beta}_j$.

A partir dos intervalos de confiança obtidos, é simples obter a distribuição empírica da pontuação de cada registro da amostra, que é a peça-chave com a qual é possível calcular o erro de modelo que está sendo pressuposto. Os passos para fazer isso seriam:

- Para cada estimador β_j , considera-se a função da distribuição

normal $F_j = N(\hat{\beta}_j, \hat{\sigma}_j)$, centrada no estimador do peso e com desvio padrão igual ao estimador de seu erro padrão.

- Simula-se uma quantidade elevada (n) de números aleatórios x_k , segundo uma distribuição uniforme entre 0 e 1, $X \sim U(0,1)$.
- Para cada $k \in \{1..n\}$, simula-se um conjunto completo de estimadores β_j da regressão logística mediante a inversa de suas respectivas funções de distribuição, $\beta_j^k = F_j^{-1}(x_k)$.
- Com cada conjunto de estimadores, pontua-se a carteira completa.

Assim, é obtida a distribuição da pontuação de cada registro da carteira, a partir da qual é possível estimar intervalos de confiança, volatilidades e outras medidas de quantificação do risco de modelo que gerado pela incerteza natural na estimativa de uma regressão logística.

Intervalos de confiança de estimadores de tendência central (métodos não paramétricos)

Para estabelecer a incerteza associada a um estimador calculado mediante um estimador de tendência central (como uma média ou mediana, que por exemplo são usadas no cálculo da LGD em risco de crédito) costumam ser empregadas técnicas não paramétricas que não requerem conhecer ou assumir uma distribuição do estimador. Uma das técnicas mais habituais é o *bootstrapping*, que tem bases na amostragem aleatória e consiste fundamentalmente em gerar amostras de tamanho n para obter a função de distribuição dos estimadores selecionados (média, mediana, etc.) de todas as amostras geradas.

Em particular, os passos para desenvolver os intervalos de confiança do estimador selecionado para o cálculo de um estimador β seriam os seguintes:

- Dada a amostra de construção do parâmetro constituída por n observações, $x = (x_1, \dots, x_n)$, é gerada uma amostra aleatória com substituição da amostra original para obter uma amostra *bootstrap* $x^* = (x_1^*, \dots, x_n^*)$.
- A seguir, é gerado o estatístico de interesse para a amostra *bootstrap*, $\beta^* = \beta(x^*)$.
- Os passos 1 e 2 são repetidos N vezes com N suficientemente grande. Geralmente, para o cálculo de intervalos de entre 90% e 95% de confiança, sugere-se que N alcance valores superiores a 1.000 iterações³².
- Após as N iterações, estará disponível uma sequência de estimadores *bootstrap* $\beta_1^*, \dots, \beta_N^*$ que pode ser usada para estudar a distribuição estatística.

A distribuição dos estimadores *bootstrap* permitirá, entre outras coisas, o cálculo de um intervalo de confiança tipo percentil para β do $(1 - \alpha) \cdot 100\%$. Este intervalo estará dado pelos quantis $(q_i(p_1), q_i(p_2))$ das N réplicas *bootstrap* com $p_1 = \alpha/2$ e $p_2 = (1 - \alpha)/2$.

³²Efron e Tibshirani (1993).

Parte I: carências nos dados

O primeiro exercício concentra-se em quantificar o impacto do risco de modelo através de carências nos dados (Fig. 11). Para isso, partindo de um modelo real de *scoring* hipotecário, são construídos dois modelos:

- ▶ Modelo A: o *scoring* resultante de eliminar a variável mais preditiva e reaplicar o modelo.
- ▶ Modelo B: o *scoring* resultante de eliminar as três variáveis mais preditivas e reaplicar o modelo.

No primeiro caso, observa-se uma redução do poder preditivo de cerca de 2 pontos percentuais e, no segundo caso, de quase 9 pontos percentuais.

Com os dois modelos obtidos, repontua-se a carteira completa e, para cada modelo, são realizadas duas análises *what-if*, movendo o ponto de corte, para responder às seguintes perguntas:

- ▶ Se no novo modelo fosse determinado um ponto de corte que mantivesse constante a inadimplência que o modelo aceita (erro tipo I), em quanto aumentaria o custo de oportunidade, medido como o volume de negócios que se deixa de captar?
- ▶ E se, pelo contrário, no novo modelo fosse determinado um ponto de corte que mantivesse inalterado o volume de negócios que o modelo capta (erro tipo II), em quanto aumentaria a inadimplência que o modelo aceita?

Os resultados obtidos são os seguintes (Fig. 12):

- ▶ Ao reconstruir o modelo sem a variável mais preditiva, manter a taxa de *default* igual à do modelo original reduz o volume de negócios captado em 5% (ou seja, multiplica o

custo de oportunidade por 1,05), e manter o volume de negócios captado pelo modelo original multiplica a taxa de *default* também por 1,05.

- ▶ Ao reconstruir o modelo sem as três variáveis mais preditivas, manter a taxa de *default* igual à do modelo original reduz o volume de negócios captado em 40% (ou seja, multiplica o custo de oportunidade por 1,40), e manter o volume de negócios captado pelo modelo original multiplica a taxa de *default* por 1,98 (ou seja, quase duplica).

Portanto, como se pode observar, a presença de erros nas variáveis mais preditivas, em caso de ser suficientes para invalidar sua utilização no modelo, tem efeitos muito relevantes sobre a inadimplência e sobre o volume de negócios que o modelo aprova.

Fig. 12. Resultados do primeiro exercício: variação de inadimplência vs. Custo de oportunidade

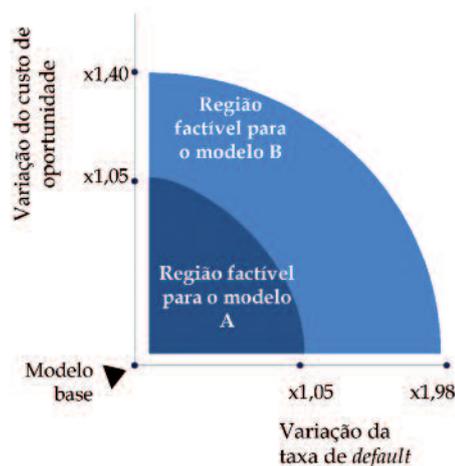
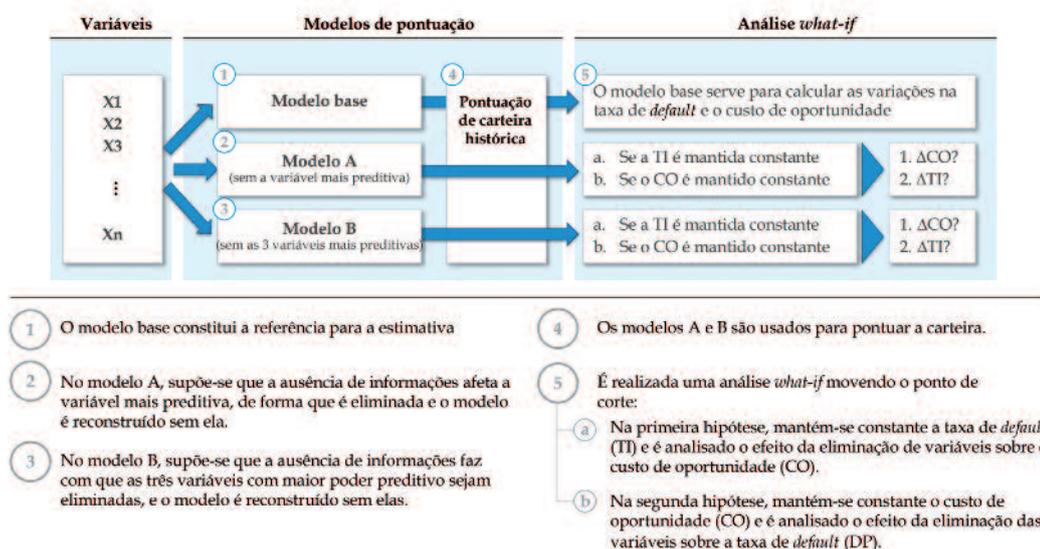
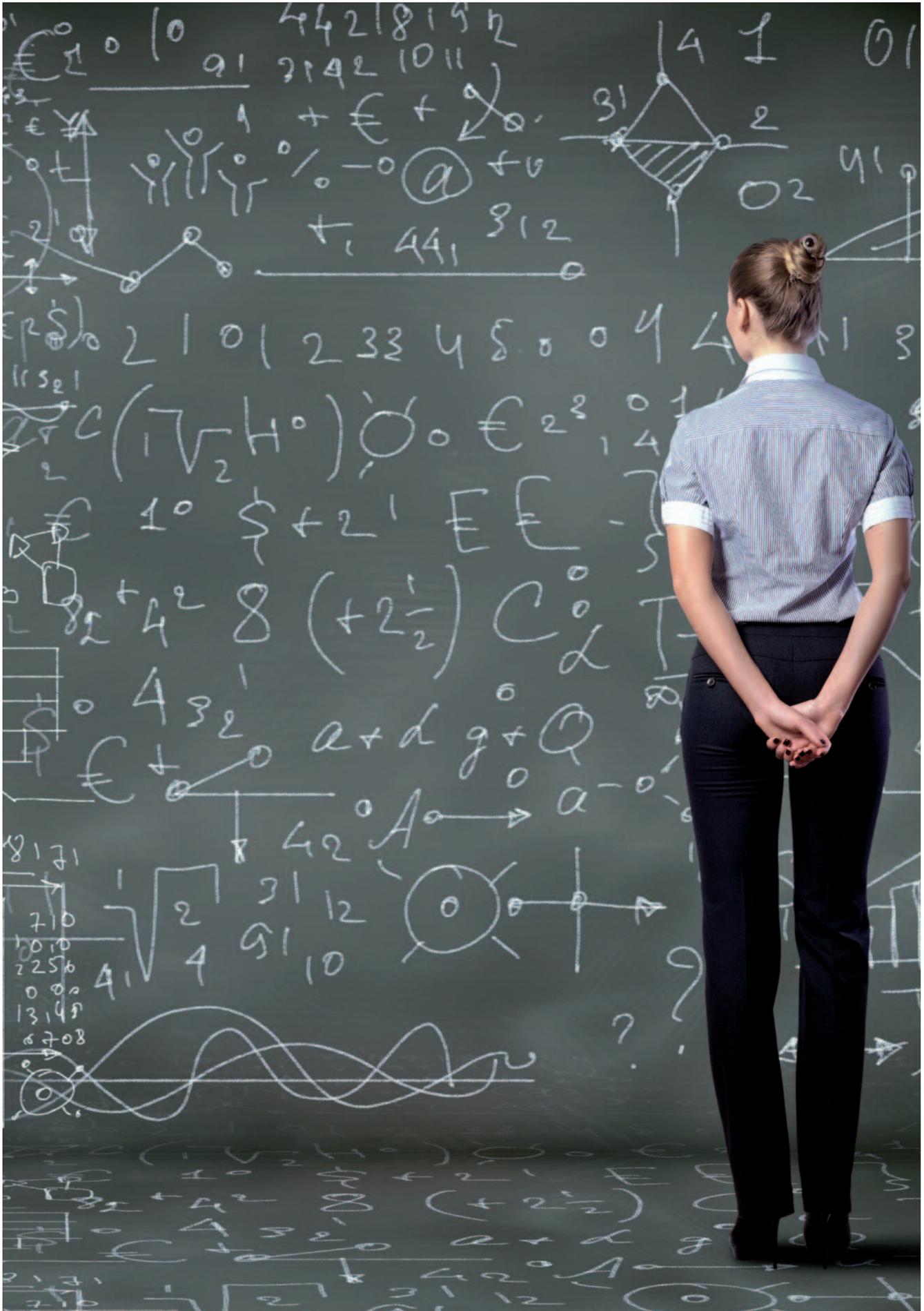


Fig. 11. Síntese da proposta do primeiro exercício





Parte II: incerteza nas estimativas

O segundo exercício trata de quantificar o impacto do risco de modelo através da incerteza implícita nos estimadores (Fig. 13). Para isso, partindo de um modelo real de *scoring*, da calibração da PD, da estimativa da LGD e da fórmula de capital de Basileia, são realizadas quatro simulações de Monte Carlo:

- ▶ Partindo do intervalo de confiança de cada estimador do modelo de *scoring*, é reconstruída sua distribuição normal. Empregando estas distribuições normais, são simulados 10.000 conjuntos de parâmetros, e portanto 10.000 modelos, e com eles é pontuada a carteira completa e calculado o capital, mantendo as PD e LGD originais. Assim, estima-se a sensibilidade do capital à incerteza nos estimadores do modelo de *scoring*.
- ▶ A partir do intervalo de confiança das PD na calibração, são simulados 10.000 conjuntos de PD, e com eles calcula-se o capital, mantendo o *scoring* e a LGD originais. Assim, estima-se a sensibilidade do capital à incerteza na calibração da PD.
- ▶ De forma análoga, realiza-se uma simulação sobre as LGD, mantendo o *scoring* e as PD originais, para determinar a sensibilidade do capital à incerteza na estimativa da LGD.
- ▶ Por último, realiza-se uma simulação agregada, em que flutuam de acordo com seus intervalos de confiança tanto os estimadores do *scoring* como as PD e as LGD, e calcula-se o capital. Com isso, estima-se a sensibilidade do capital à incerteza combinada do *scoring*, da calibração da PD e da estimativa da LGD.

Os resultados obtidos, com um nível de confiança de 90%, são os seguintes (Fig. 14):

- ▶ Como consequência da incerteza nos estimadores do *scoring*, a cifra de consumo de capital poderia chegar a se mover 4% para cima ou para baixo.
- ▶ A incerteza na calibração da PD poderia motivar oscilações de até 7% para cima ou para baixo na cifra de capital.
- ▶ A incerteza na estimativa da LGD pode chegar a mover o capital 2% para cima ou para baixo.
- ▶ Por último, o efeito combinado das três simulações anteriores mostra que o capital poderia chegar a se mover 8% para cima ou para baixo pelo risco de modelo que provém da incerteza em seus componentes.

Portanto, como se pode observar, a incerteza nas estimativas poderia chegar a uma situação em que o capital esteja subestimado em até 8%, exclusivamente por razão de risco de modelo, o que, com um critério conservador, deveria ser contemplado e mitigado.

Fig. 14. Resultados do segundo exercício: variação (multiplicador) do capital em cada simulação e na simulação combinada

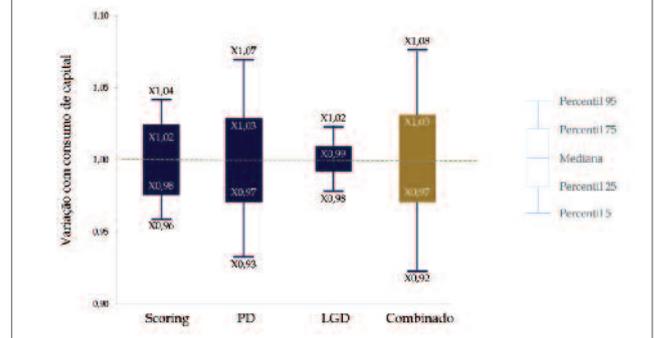
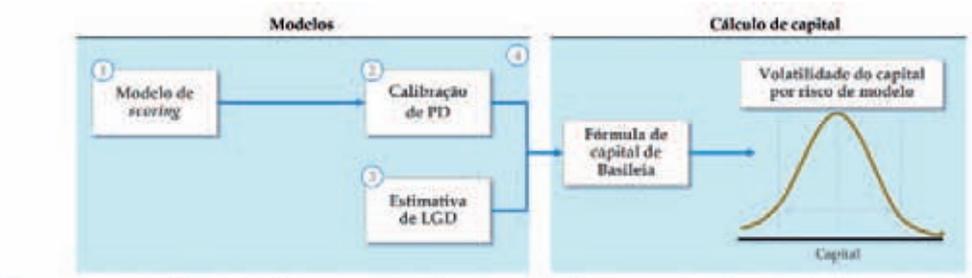


Fig. 13. Síntese da proposta do segundo exercício



A análise é realizada simulando por Monte Carlo diferentes jogos de estimadores a partir de sua volatilidade, medida a partir de seus intervalos de confiança.

- 1 No primeiro cenário, são simuladas variações unicamente nos estimadores do *scoring*, cada um segundo seu intervalo de confiança, e o capital é recalculado com 10.000 modelos com distintos conjuntos de estimadores.
- 2 No segundo cenário, são simuladas variações unicamente no cálculo da PD, de acordo com o intervalo de confiança resultante do processo de calibração, e o capital é recalculado com 10.000 conjuntos de PD distintos.
- 3 No terceiro cenário, são simuladas variações unicamente na estimativa da LGD, de acordo com o intervalo de confiança implícito em seu cálculo, e o capital é recalculado com 10.000 conjuntos de LGD distintos.
- 4 Por último, no quarto cenário é calculado o efeito no capital de variações simultâneas no modelo de *scoring*, da calibração da PD e da estimativa da LGD, para identificar o erro de modelo combinado dos três processos.

Parte III: uso inadequado do modelo

O último exercício pretende quantificar o impacto do risco de modelo por razão de seu uso inadequado (Fig. 15). O uso inadequado pode envolver a aplicação de um modelo a uma população distinta daquela com que foi construído (por exemplo, aplicar um *scoring* construído com uma carteira de hipotecas de um país à mesma carteira de outro país, ou à carteira resultado da fusão com outra instituição). Um caso particular e não tão evidente deste uso inadequado é a aplicação de um modelo sobre a mesma carteira após um período de tempo prolongado sem verificar se continua sendo aplicável, especialmente se tiver ocorrido uma mudança de ciclo econômico que possa transformar substancialmente a população.

Para refletir este caso, neste exercício partiu-se de um modelo de *scoring* e foi quantificado o impacto de não atualizá-lo durante 12 meses. Para isso:

- ▶ Aplica-se o modelo à carteira ao fechamento de cada um dos 12 meses posteriores à sua construção.
- ▶ Com os *defaults* reais durante o ano posterior, mede-se o poder preditivo do modelo, e observa-se como vai diminuindo com a passagem do tempo.
- ▶ São realizadas duas análises *what-if*, movendo o ponto de corte, para responder às mesmas perguntas que no primeiro exercício:

- Se, ao aplicar o modelo no final do mês 12, fosse determinado um ponto de corte que mantivesse constante a inadimplência que o modelo em sua construção aceitava (erro tipo I), em quanto aumentaria o custo de oportunidade, medido como o volume de negócios que se deixa de captar?

- E se, pelo contrário, ao aplicar o modelo ao final do mês 12, fosse determinado um ponto de corte que mantivesse inalterado o volume de negócios que o modelo captava em sua construção (erro tipo II), em quanto aumentaria a inadimplência que o modelo aceita?

Os resultados obtidos são os seguintes (Fig. 16):

- ▶ Observa-se uma redução do poder preditivo de mais de 10% (8 pontos de ROC) aos 12 meses.
- ▶ Aplicando o modelo 12 meses depois de sua construção, manter a taxa de *default* igual à do momento de construção reduz o volume de negócios captado em 15% (ou seja, multiplica o custo de oportunidade por 1,15), e manter o volume de negócios captado pelo modelo original multiplica a taxa de *default* por 1,67.

O terceiro exercício, portanto, mostra que o risco de modelo que emana de seu uso inadequado (neste caso, sua falta de atualização) pode ter um impacto considerável sobre a inadimplência e sobre o volume de negócios captado.

Fig. 16. Resultados do terceiro exercício: análise *what-if* de inadimplência vs. Custo de oportunidade

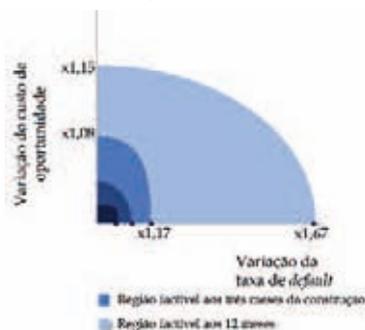
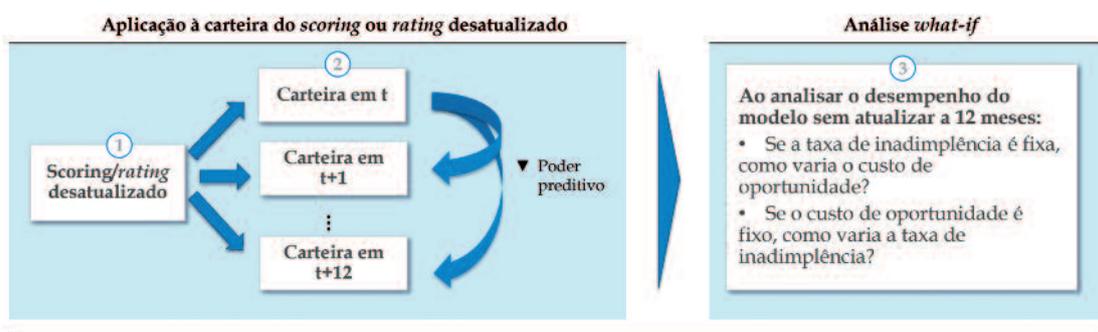


Fig. 15. Síntese da proposta do terceiro exercício



- 1 Parte-se de um modelo de *scoring* ou *rating* que não é atualizado durante 12 meses.
- 2 Aplica-se o modelo sobre a carteira em cada um dos 12 meses seguintes à data de construção, em que o poder preditivo irá caindo de forma natural.
- 3 Analisa-se o impacto de não atualizar o modelo sobre o custo de oportunidade e sobre a taxa de incumprimento.

Mitigação do risco de modelo

Como se pode apreciar no estudo, o risco de modelo é complexo de quantificar de forma direta, e nem sempre são aplicáveis nem têm sentido medidas quantitativas para cobri-lo, tais como um *buffer* de capital ou uma alocação a provisões.

Por esta razão, na prática as instituições orientam sua quantificação do risco de modelo para uma identificação da sensibilidade dos modelos a erros que poderiam derivar em perdas (sejam econômicas ou reputacionais).

O ciclo de quantificação, portanto, completa-se com as possíveis ações mitigantes do risco de modelo derivadas desta análise de sensibilidade. Entre elas, podem ser incluídas as seguintes (segundo cada fonte de risco de modelo):

Carências nos dados

- ▶ Reforço da governança do dado.
- ▶ Estabelecimento de uma função de *Data Quality*, que vele pela qualidade, integridade, rastreabilidade e consistência dos dados que alimentam os modelos.
- ▶ Introdução de um conjunto de regras de validação de *inputs* e de regras especializadas sobre os *outputs*, em especial no contexto de carências de dados.

Incerteza na estimativa ou erros no modelo

- ▶ Qualificação e experiência dos desenvolvedores de modelos e dos validadores do modelo.
- ▶ Validação dos modelos efetiva, crítica e independente.
- ▶ Conservadorismo em *inputs*, estimativas e *outputs*, medido e devidamente justificado.
- ▶ *Backtest* periódico do modelo, que contemple o *output* previsto com o observado, e conclua sobre o grau de precisão do modelo.
- ▶ Teste de estresse do modelo, que o submeta a diferentes cenários de tensão de seus *inputs* e conclua sobre o desempenho do modelo em tais situações.
- ▶ Apoio acadêmico ou *benchmark* de mercado, quando seja aplicável, para as decisões metodológicas adotadas.
- ▶ Utilização de modelos alternativos para a comparação de resultados.

- ▶ Elaboração de análises complementares que discutam a validade dos resultados do modelo com informações adicionais.
- ▶ Em ocasiões, alocação de um *buffer* de capital ou provisões por risco de modelo.

Uso inadequado do modelo

- ▶ Governança rigorosa dos modelos, que inclua o estabelecimento de limites para utilização e validação, e aprovação explícita para cada uso.
- ▶ Aumento da supervisão humana, em especial durante a primeira etapa após a colocação em produção do modelo.
- ▶ Acompanhamento periódico do modelo, incluindo o monitoramento automatizado e frequente de seu poder preditivo e um sistema de alertas antecipados de deterioração.
- ▶ Inventário exaustivo dos modelos da instituição, com a obrigação de incluir todos os modelos utilizados na tomada de decisões.
- ▶ Execução de pilotos antes da primeira colocação em produção e após cada mudança substancial em modelos de elevado risco.

Propagação da incerteza na concatenação de modelos

A propagação da incerteza é um efeito inevitável dos modelos estatísticos que surge quando um modelo se alimenta da estimativa proporcionada por outro modelo, o que pode amplificar o erro.

Por exemplo, o resultado dos modelos de *scoring* de crédito é uma variável de entrada para a calibração da probabilidade de *default* (PD), que por sua vez alimenta os modelos de consumo de capital. A combinação da incerteza estatística em cada passo pode levar a uma elevada volatilidade do resultado final (neste caso, o capital) por razão de risco de modelo.

O método mais comum para a mensuração da incerteza em estatística é o uso do erro absoluto das variáveis, Δx e de seu desvio padrão, σ . Se as variáveis estão correlacionadas, deve-se considerar também sua co-variância para o cálculo da propagação do erro.

Propagação do erro em combinações lineares

Seja $f_k(x_1, \dots, x_n)$ um conjunto de m funções que são combinações lineares de n variáveis x_1, \dots, x_n com coeficiente de combinação A_{k1}, \dots, A_{kn} ($k=1 \dots m$); ou seja:

$$f_k = \sum_{i=1}^n A_{ki}x_i = Ax$$

Então, é obtida a matriz de variâncias-covariâncias de f como::

$$cov_{ij}^f = \sum_k \sum_l A_{ik} cov_{kl}^x A_{jl} = Acov^x A^T$$

Onde cov^x é a matriz de variâncias-covariâncias do conjunto de variáveis x .

As expressões anteriores representam a propagação do erro de um conjunto de variáveis na função de que são parte. Quando os erros no conjunto de variáveis x não estão correlacionados, a expressão anterior reduz-se a:

$$cov_{ij}^f = \sum_k A_{ik} (\sigma_k^2)^x A_{jk}$$

Propagação do erro em combinações não lineares

Quando f é uma combinação não linear do conjunto de variáveis x , pode-se realizar uma propagação em um intervalo para calcular intervalos que contêm todos os valores consistentes das variáveis. Em um enfoque probabilístico, a função f deve se linearizar por sua aproximação de primeira ordem de sua série de Taylor:

$$f_k \approx f_k^0 + \sum_i \frac{\partial f_k}{\partial x_i} x_i \approx f^0 + Jx$$

onde $\partial f_k / \partial x_i$ denota a derivada parcial de f_k com relação à variável i -ésima e onde i -ésima e onde J é a matriz jacobiana de f . Dado que f^0 é uma constante, este termo não contribui para o erro de f . Portanto, conclui-se que a propagação do erro segue o caso linear da seção anterior substituindo os coeficientes lineares A_{ik} y A_{jk} pelas derivadas parciais $\partial f_k / \partial x_i$ y $\partial f_k / \partial x_j$:

$$cov^f = Jcov(x)J^T$$

Exemplos

A seguir, é apresentada uma tabela com as variâncias de distintas funções de variáveis reais A, B com desvios padrão σ_A, σ_B , variância e constantes a, b . Dado que a maioria dos modelos estatísticos podem ser construídos como uma composição destas funções, a partir delas é imediato deduzir como a volatilidade das variáveis originais é transferida para o resultado final do modelo combinado.

Função	Variância
$f = aA$	$\sigma_f^2 = a^2 \sigma_A^2$
$f = aA + bB$	$\sigma_f^2 = a^2 \sigma_A^2 + b^2 \sigma_B^2 + 2ab \cdot cov_{AB}$
$f = AB$	$\sigma_f^2 \approx f^2 \left[\left(\frac{\sigma_A}{A} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_B}{B} \right)^2 + 2 \frac{cov_{AB}}{AB} \right]$
$f = \frac{A}{B}$	$\sigma_f^2 \approx f^2 \left[\left(\frac{\sigma_A}{A} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_B}{B} \right)^2 - 2 \frac{cov_{AB}}{AB} \right]$
$f = aA^b$	$\sigma_f^2 \approx f^2 \left(b \frac{\sigma_A}{A} \right)^2$
$f = a \cdot \ln(bA)$	$\sigma_f^2 \approx \left(a \frac{\sigma_A}{A} \right)^2$
$f = a \cdot \log_{10}(A)$	$\sigma_f^2 \approx \left(a \frac{\sigma_A}{A \cdot \ln(10)} \right)^2$
$f = ae^{bA}$	$\sigma_f^2 \approx f^2 (b\sigma_A)^2$
$f = a^{bA}$	$\sigma_f^2 \approx f^2 (b \cdot \ln(a)\sigma_A)^2$
$f = A^B$	$\sigma_f^2 \approx f^2 \left[\left(\frac{B}{A} \sigma_A \right)^2 + (\ln(A)\sigma_B)^2 + 2 \frac{B \cdot \ln(A)}{A} cov_{AB} \right]$

Como é possível observar, a volatilidade do erro pode aumentar rapidamente ao concatenar dois modelos estatísticos, o que tem sérias implicações ao quantificar o risco de modelo em um sistema de decisão e reforça a necessidade de estabelecer controles de razoabilidade nos resultados intermediários.

Bibliografía

Banco de España (2007). *Documento de Validación nº 2. Criterios sobre validación interna de modelos avanzados de gestión de riesgos.*

Banco de España (2008-14). *Guía del Proceso de Autoevaluación del Capital de las Instituições de Crédito (PAC)* (revisões de 2009, 2011 e 2014).

Bank for International Settlements (2013). *Statistical release OTC derivatives statistics at end-June 2013.*

Basel Committee on Banking Supervision (2004-06). *International Convergence of Capital Measurement and Capital Standard. Framework* revisado en 2006. Versão integral.

Basel Committee on Banking Supervision (2005-1). *Basel Committee Newsletter No. 4 (January 2005). Update on work of the Accord Implementation Group related to validation under the Basel II Framework.*

Basel Committee on Banking Supervision (2005-2). *Basel Committee Newsletter No. 6 (September 2005). Validation of low-default portfolios in the Basel II Framework.*

Basel Committee on Banking Supervision (2006). *Basel Committee Newsletter No. 9 (September 2006). The IRB Use Test: Background and Implementation.*

Basel Committee on Banking Supervision (2010-11). *Basel III: A global regulatory framework for more resilient banks and banking systems* (revisão de junho de 2011).

EBA-CEBS (2006). *Guidelines on the implementation, validation and assessment of Advanced Measurement (AMA) and Internal Ratings Based (IRB) Approaches.*

EBA (2013). *RTS on Prudent Valuation, Consultation Paper.*

EBA (2014). *Model Validation (Single Rulebook).* <https://www.eba.europa.eu/regulation-and-policy/model-validation> (en desarrollo).

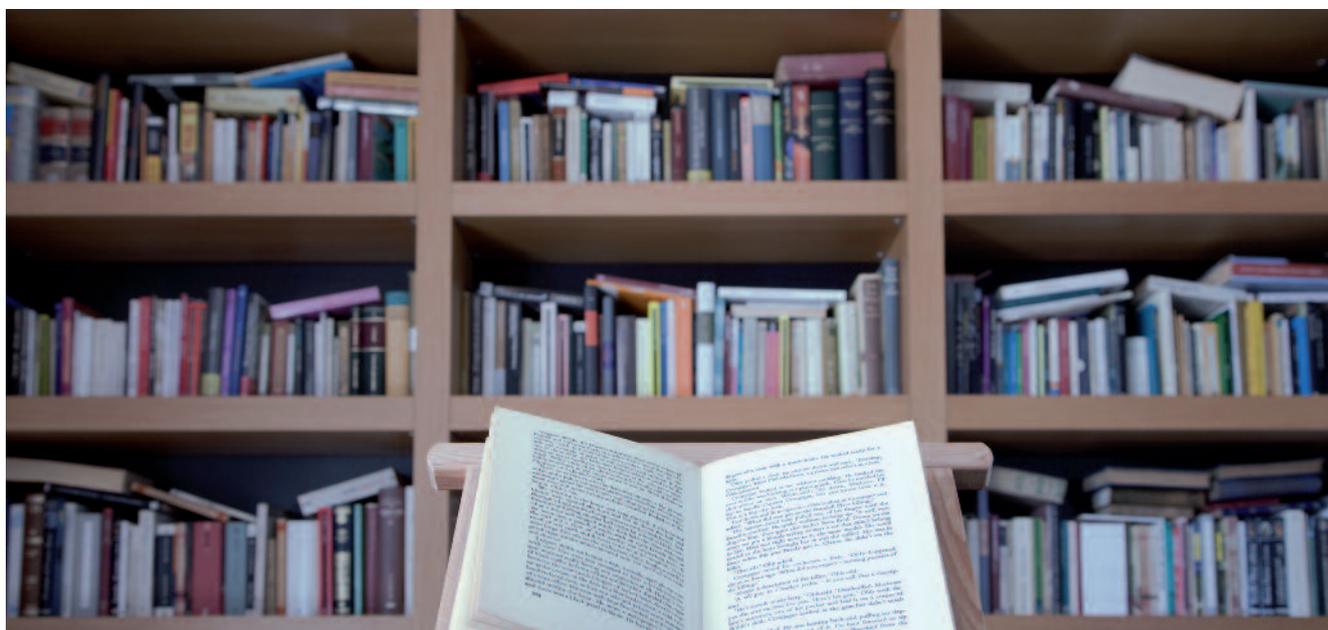
Efron, B. y Tibshirani, R. J. (1993). *An Introduction to the Bootstrap.* Chapman and Hall, London.

Management Solutions (2013). *Análise de impacto dos testes de estresse do sistema financeiro.*

MIT Sloan Management Review. T. H. Davenport y J. G. Harris (2005). *Automated Decision Making Comes of Age.*

Office of the Comptroller of the Currency y Board of Governors of the Federal Reserve System (2011-12). *Supervisory Guidance on Model Risk Management.*

Securities & Exchange Commission (SEC) y Commodity Futures Trading Commission (CFTC) (2010). *Findings regarding the market events of May 6, 2010. Report of the staffs of the CFTC and SEC to the Joint Advisory Committee on Emerging Regulatory Issues.*



Glossário

ALM: gestão de ativos e passivos (*assets and liabilities management*).

Análise *what-if*: simulação do impacto de um ou mais cenários específicos das variáveis de entrada (*inputs*) sobre os resultados (*outputs*) de um processo.

Buffer de capital: reserva de capital, cujo objetivo é garantir que uma instituição seja capaz de absorver as perdas derivadas de sua atividade em períodos de estresse.

CCF: fator de conversão do crédito (*credit conversion factor*).

Curva ROC (*receiver operating characteristic*): curva empregada para analisar o poder preditivo de um modelo de saída binária. Representa a relação entre o erro de tipo I (classificar incorretamente eventos adversos) e o erro de tipo II (classificar incorretamente eventos favoráveis).

Distância de Kolmogorov-Smirnov: teste não paramétrico utilizado para determinar a semelhança de duas distribuições de probabilidade entre si. Utiliza o supremo (máximo) da diferença absoluta entre a distribuição empírica e a estimada. É utilizada como métrica de poder preditivo em modelos de saída binária.

EAD: exposição no momento de *default* (*exposure at default*). Tem um componente de exposição fora de balanço (disponíveis, compromissos, etc.) para o qual é necessário estabelecer determinadas premissas. Por exemplo, para uma linha de crédito $EAD = \text{disposto} + CCF \times \text{disponível}$, onde CCF é o fator de conversão de crédito.

EBA (*European Banking Authority*): autoridade independente da União Europeia, cujo objetivo principal é manter a estabilidade financeira dentro da União e salvaguardar a integridade, a eficiência e o funcionamento do setor bancário. Foi estabelecida em 1º de janeiro de 2011 como parte do Sistema Europeu para a Supervisão Financeira (ESFS) e absorveu o anterior Comitê Europeu de Supervisores Bancários (CEBS).

Erro de tipo I: termo estatístico que faz referência ao erro proveniente de descartar a hipótese nula quando está certa.

Erro de tipo II: termo estatístico que faz referência ao erro proveniente de aceitar a hipótese nula quando é falsa.

Fed (*Federal Reserve System*): banco central dos EUA, fundado em 1913 com o objetivo de fornecer à nação um sistema monetário e financeiro mais seguro, flexível e estável. Com os anos, seu papel no setor bancário e econômico se expandiu, incluindo atividades como dirigir a política monetária nacional, supervisionar e regular as instituições bancárias ou prestar serviços financeiros para instituições depositárias.

Flash crash: queda rápida, profunda e volátil nos preços de ativos, ocorrida em um período muito breve de tempo; por exemplo, a que ocorreu em 6 de maio de 2010 nos EUA.

Override: decisão manual que contradiz o resultado de um modelo estatístico.

Índice de poder ou coeficiente de Gini: métrica que serve para analisar de forma quantitativa o poder discriminante de um modelo de saída binária, baseando-se na ordenação que faz dos eventos adversos e favoráveis.

IRB (*Internal Rating Based*): método avançado de estimativa de capital regulatório baseado em modelos de *rating* internos. Para acessá-lo, as instituições devem cumprir um conjunto de requisitos e obter autorização do supervisor.

KYC: informações relevantes de clientes (*know your customer*) obtidas com diversos objetivos, como o cumprimento regulatório em relação à fraude, lavagem de dinheiro, financiamento do terrorismo ou corrupção.

LGD: perda em caso de *default* (*loss given default*). É igual a 1 menos a taxa de recuperação. Conforme o Basileia II, parágrafo 468, deve ser calculada levando em conta uma conjuntura econômica desfavorável.

LTV: relação entre o montante pendente de um empréstimo e o valor da garantia associada (*loan to value*). Utiliza-se em empréstimos com garantia real, principalmente hipotecários.

Model Risk Additional Value Adjustment (AVA): ajuste necessário para a avaliação correta de posições no *trading book*.

OCC (*Office of the Comptroller of the Currency*): agência federal dos EUA que se encarrega da regulação e supervisão de bancos nacionais, escritórios federais e agências de bancos estrangeiros. Tem como objetivo principal garantir que operem de forma segura e sólida, assim como o cumprimento regulatório, incluindo o tratamento justo e imparcial de clientes e seu acesso ao mercado financeiro.

PD: probabilidade de *default* (*probability of default*).

RWA: ativos ponderados por risco (*risk weighted assets*); trata-se da exposição (dentro ou fora do balanço) ponderada pelo risco que comporta para a instituição, calculado de acordo com os métodos que o regulador estabelece.

Scoring/rating: modelo que atribui uma pontuação a cada objeto de qualificação (solicitações/contrapartes) de acordo com sua qualidade de crédito. Em caso de qualificar o binômio solicitação-cliente, trata-se de um modelo de *scoring*; em caso de qualificar contrapartes, trata-se de um modelo de *rating*.

Simulação de Monte Carlo: técnica utilizada para aproximar a probabilidade de um evento mediante a execução de múltiplas simulações utilizando variáveis aleatórias.

Teste de estresse: técnica de simulação utilizada para determinar a resistência de uma instituição perante uma situação financeira adversa. Em um sentido mais amplo, refere-se a qualquer técnica para avaliar a capacidade para suportar condições extremas, e é aplicável a instituições, carteiras, modelos, etc.

VaR (*Value at Risk*): técnica estatística utilizada para quantificar o nível de risco financeiro assumido em um período de tempo com um determinado nível de confiança.

Nosso objetivo é superar as expectativas dos nossos clientes sendo parceiros de confiança

A Management Solutions é uma empresa internacional de serviços de consultoria com foco em assessoria de negócios, riscos, organização e processos, tanto sobre seus componentes funcionais como na implementação de tecnologias relacionadas.

Com uma equipe multidisciplinar (funcionais, matemáticos, técnicos, etc.) com mais de 1.300 profissionais, a Management Solutions desenvolve suas atividades em 18 escritórios (9 na Europa, oito nas Américas e um na Ásia).

Para atender às necessidades de seus clientes, a Management Solutions estruturou suas práticas por setores (Instituições Financeiras, Energia e Telecomunicações) e por linha de negócio (FCRC, RBC, NT), reunindo uma ampla gama de competências de Estratégia, Gestão Comercial e *Marketing*, Organização e Processos, Gerenciamento e Controle de Riscos, Informação Gerencial e Financeira e Tecnologias Aplicadas.

No setor financeiro, a Management Solutions oferece serviços para todos os tipos de empresas, bancos, seguradoras, empresas de investimento, financeiras, etc. - tanto para organizações globais, como para instituições locais e órgãos públicos.

Luis Lamas

Sócio

luis.lamas.naveira@msspain.com

Javier Calvo

Gerente de P&D

javier.calvo.martin@msspain.com

Marta Herrero

Supervisora

marta.herrero.martin@msspain.com

Ana Isabel Bocos

Metodologista de P&D

ana.bocos@msspain.com

Design e diagramação

Departamento de Marketing e Comunicação
Management Solutions - Espanha

© Management Solutions. 2014

Todos os direitos reservados

Madrid Barcelona Bilbao London Frankfurt Warszawa Zürich Milano Lisboa Beijing
New York San Juan de Puerto Rico México D.F. Bogotá São Paulo Lima Santiago de Chile Buenos Aires

www.managementtsolutions.com