

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS JURÍDICAS E ECONÔMICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA

ALBERSON DA SILVA MIRANDA

MÉTODOS DE MACHINE LEARNING PARA
RECONCILIAÇÃO ÓTIMA DE SÉRIES
TEMPORAIS HIERÁRQUICAS E AGRUPADAS

VITÓRIA

2024

ALBERSON DA SILVA MIRANDA

MÉTODOS DE MACHINE LEARNING PARA
RECONCILIAÇÃO ÓTIMA DE SÉRIES TEMPORAIS
HIERÁRQUICAS E AGRUPADAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Economia.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme A. de A. Pereira

VITÓRIA

2024

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

M672 Miranda, Alberson da Silva, 1988-
m Métodos de machine learning para reconciliação ótima de
séries temporais hierárquicas e agrupadas / Alberson da Silva
Miranda. - 2024.
80 f.

Orientador: Guilherme Armando de Almeida Pereira.
Dissertação (Mestrado em Economia) - Universidade Federal
do Espírito Santo, Centro de Ciências Jurídicas e Econômicas.

1. Bancos. 2. Previsão. 3. Análise de séries temporais. 4.
Aprendizado de máquinas. I. Pereira, Guilherme Armando de
Almeida. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de
Ciências Jurídicas e Econômicas. III. Título.

CDU: 330

AGRADECIMENTOS

A jornada para a conclusão do mestrado não poderia ter sido tão gratificante e enriquecedora sem a influência de várias pessoas. Primeiramente, gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu orientador, Dr. Guilherme Pereira, por sua orientação, gentileza e encorajamento constante ao longo de todo o processo. Sua paciência e dedicação foram essenciais para transformar este aluno confuso em um pesquisador.

À banca examinadora, aos professores Dr. Edson Zambon e Dr. Fernando Cyrino, gostaria de agradecer por aceitarem o convite (mesmo que em curto prazo) para avaliar este trabalho e por fornecerem suas percepções valiosas que aprimoraram e ressignificaram minha pesquisa.

Ao corpo docente do PPGEco/UFES, em especial meus professores Dr. Edson Zambon, cuja meticulosidade e entrega, aula após aula, desde a graduação, foram determinantes tanto na minha vida acadêmica quanto profissional, e ao Dr. Alain Herscovici, pelas inúmeras conversas, da música à filosofia, da sociologia à epistemologia, que enriqueceram minha perspectiva e ampliaram meus horizontes.

Agradeço também aos Dr. Nikolaos Kourentzes e Dr. Evangelos Spiliotis por suas contribuições à literatura de previsão hierárquica, que serviram de inspiração para o meu trabalho. Sua generosidade em responder às minhas perguntas e compartilhar dados e códigos foi fundamental para o progresso da minha pesquisa.

Aos meus professores do curso de matemática do Ifes/Vitória, em particular aos professores Diogo Oliveira, Débora Domingues e Lourenço Gonçalves, expresso minha gratidão pelas conversas e pelo incentivo constante ao longo desta jornada acadêmica.

Aos meus colegas do programa, Dreyfuss, Yasmin (obrigado pelas revisões!), Amanda, Leina, Ricardo, Michelle e Eduardo, agradeço pela troca de experiências, pelo apoio mútuo e pela camaradagem durante todo o período do mestrado.

E o mais importante, à minha família, Regina, Aldo, Rafaela e minhas sobrinhas, por todo o apoio e amor incondicional. Tem sido uma jornada. Obrigado por estarem ao meu lado.

RESUMO

Na última década, a previsão de séries temporais hierárquicas experimentou um crescimento substancial, caracterizado por avanços que melhoraram significativamente a precisão dos modelos de previsão. Recentemente, os métodos de *machine learning* foram integrados à literatura de previsão hierárquica como uma nova abordagem para a reconciliação de previsões. Este trabalho se baseia nesses avanços, explorando ainda mais o potencial dos métodos de *machine learning* para otimizar a reconciliação de séries temporais hierárquicas e agrupadas. Além disso, investigou-se o impacto de várias estratégias de aquisição de conjuntos de treinamento, como previsões obtidas por *rolling forecasting*, valores ajustados de modelos reestimados e valores ajustados dos modelos de previsão base, como também estratégias alternativas de validação cruzada. Para avaliar a metodologia proposta, dois estudos de caso foram realizados. O primeiro estudo se concentra no setor financeiro brasileiro, especificamente na previsão de saldos de empréstimos e financiamentos para o Banco do Estado do Espírito Santo. O segundo estudo usa conjuntos de dados de turismo doméstico australiano, que são frequentemente referenciados na literatura de séries temporais hierárquicas. Comparou-se a metodologia proposta com métodos analíticos para reconciliação de previsões, como o *bottom-up*, *top-down* e traço mínimo. Os resultados mostram que não há um método ou estratégia única que supere consistentemente todos os outros. No entanto, a combinação apropriada de método ML e estratégia pode levar a uma melhoria de até 93% na precisão em comparação com o melhor método de reconciliação analítica.

Palavras-chave: Séries Temporais Hierárquicas. Reconciliação Ótima. *Machine Learning*. Economia Bancária.

ABSTRACT

In the last decade, hierarchical time series forecasting has experienced substantial growth, characterized by advancements that have significantly improved the accuracy of forecasting models. Recently, machine learning methods have been integrated into the literature on hierarchical time series as a new approach for forecasting reconciliation. This work builds upon these advancements by further exploring the potential of ML methods for optimizing the reconciliation of hierarchical and grouped time series. Moreover, the impact of various training set acquisition strategies, such as in-sample forecasts obtained through rolling origin forecasting, fitted values of reestimated models, and fitted values of base forecast models, as well as alternative cross-validation strategies, was investigated. To evaluate the proposed methodology, two case studies were carried out. The first study focuses on the Brazilian financial sector, specifically forecasting loan and financing balances for the State Bank of Espírito Santo. The second study uses Australian domestic tourism datasets, which are frequently referenced in hierarchical time series literature. The proposed methodology was compared with traditional methods for forecasting reconciliation such as bottom-up, top-down and minimum trace. The results show that there is no unique method or strategy that consistently outperforms all others. Nonetheless, the appropriate combination of ML method and strategy can lead to up to a 93% improvement in accuracy compared to the best-performing analytical reconciliation method.

Keywords: Hierarchical Time-Series. Optimal Reconciliation. Machine Learning. Economics of Banking.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Séries Hierárquicas	16
Figura 2 – Séries Agrupadas	17
Figura 3 – Séries Hierárquicas Agrupadas (a)	18
Figura 4 – Séries Hierárquicas Agrupadas (b)	18
Figura 5 – Previsões base a serem reconciliadas	26
Figura 6 – Esquema de modelagem <i>rolling forecast</i>	27
Figura 7 – Metodologia de combinação ótima via ML. Estratégia <i>rolling forecast</i>	28
Figura 8 – Metodologia de combinação ótima via ML. Estratégia <i>reduced fitted values</i>	29
Figura 9 – Metodologia de combinação ótima via ML. Estratégia <i>fitted values</i>	30
Figura 10 – Validação <i>k</i> -fold aleatória	32
Figura 11 – Validação <i>k</i> -fold com origem móvel	32
Figura 12 – Validação <i>k</i> -fold não-dependente	33
Figura 13 – O Estado do Espírito Santo e suas meso e microrregiões.	38
Figura 14 – Série temporal do agregado de crédito do Banestes no ES	39
Figura 15 – Séries temporais do agregado de crédito do Banestes por mesorregião do ES	39
Figura 16 – Séries temporais do agregado de crédito do Banestes por microrregião do ES	40
Figura 17 – Séries temporais dos verbetes no agregado do ES	40
Figura 18 – Séries temporais dos verbetes por mesorregião do ES	41
Figura 19 – Crescimento de árvores em algoritmos de <i>boosting</i>	74
Figura 20 – <i>Support vector classifiers</i>	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Conjunto de treinamento para predição dos modelos de ML	27
Tabela 2 – Microrregiões por mesorregião	37
Tabela 3 – Municípios por microrregião	38
Tabela 4 – Resultados do teste de Ljung-box para as previsões base ($\alpha = 0.05$)	41
Tabela 5 – Resultados Estban: Acurácia dos métodos analíticos de reconciliação	44
Tabela 6 – Resultados Estban: Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia <i>rolling forecast</i> + validação cruzada aleatória	44
Tabela 7 – Resultados Estban: Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia <i>rolling forecast</i> + validação cruzada com origem móvel	44
Tabela 8 – Resultados Estban: Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia <i>fitted values</i> + validação cruzada aleatória	45
Tabela 9 – Resultados Estban: Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia <i>fitted values</i> + validação cruzada com origem móvel	45
Tabela 10 – Resultados Estban: Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia <i>reduced fitted values</i> + validação cruzada aleatória	46
Tabela 11 – Resultados Estban: Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia <i>reduced fitted values</i> + validação cruzada com origem móvel	46
Tabela 12 – Resultados Estban: Tempo de processamento dos métodos de ML (em horas). Validação cruzada aleatória	46
Tabela 13 – Resultados Estban: Tempo de processamento dos métodos de ML (em horas). Validação cruzada com origem móvel	47
Tabela 14 – Resultados do teste de Ljung-box para as previsões base ($\alpha = 0.05$) da base de dados <i>overnight trips</i>	49
Tabela 15 – Resultados do teste de Ljung-box para as previsões base ($\alpha = 0.05$) da base de dados <i>visitor nights</i>	50
Tabela 16 – Resultados para <i>overnight trips</i> : Acurácia dos métodos analíticos de reconciliação	51
Tabela 17 – Resultados para <i>overnight trips</i> : Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia <i>rolling forecast</i> + validação cruzada aleatória	51
Tabela 18 – Resultados para <i>overnight trips</i> : Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia <i>rolling forecast</i> + validação cruzada com origem móvel	52
Tabela 19 – Resultados para <i>overnight trips</i> : Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia <i>fitted values</i> + validação cruzada aleatória	52
Tabela 20 – Resultados para <i>overnight trips</i> : Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia <i>fitted values</i> + validação cruzada com origem móvel	53

Tabela 21 – Resultados para <i>overnight trips</i> : Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia <i>reduced fitted values</i> + validação cruzada aleatória	53
Tabela 22 – Resultados para <i>overnight trips</i> : Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia <i>reduced fitted values</i> + validação cruzada com origem móvel	54
Tabela 23 – Resultados para <i>overnight trips</i> : Tempo de processamento dos métodos de ML (em horas). Validação cruzada aleatória	54
Tabela 24 – Resultados para <i>overnight trips</i> : Tempo de processamento dos métodos de ML (em horas). Validação cruzada com origem móvel	54
Tabela 25 – Resultados para <i>visitor nights</i> : Acurácia dos métodos analíticos de reconciliação	55
Tabela 26 – Resultados para <i>visitor nights</i> : Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia <i>rolling forecast</i> + validação cruzada aleatória	56
Tabela 27 – Resultados para <i>visitor nights</i> : Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia <i>rolling forecast</i> + validação cruzada com origem móvel	56
Tabela 28 – Resultados para <i>visitor nights</i> : Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia <i>fitted values</i> + validação cruzada aleatória	57
Tabela 29 – Resultados para <i>visitor nights</i> : Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia <i>fitted values</i> + validação cruzada com origem móvel	57
Tabela 30 – Resultados para <i>visitor nights</i> : Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia <i>reduced fitted values</i> + validação cruzada aleatória	58
Tabela 31 – Resultados para <i>visitor nights</i> : Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia <i>reduced fitted values</i> + validação cruzada com origem móvel	58
Tabela 32 – Resultados para <i>visitor nights</i> : Tempo de processamento dos métodos de ML (em horas). Validação cruzada aleatória	59
Tabela 33 – Resultados para <i>visitor nights</i> : Tempo de processamento dos métodos de ML (em horas). Validação cruzada com origem móvel	59
Tabela 34 – Intervalos de hiperparâmetros para {xgboost}	78
Tabela 35 – Intervalos de hiperparâmetros para {lightgbm}	78
Tabela 36 – Intervalos de hiperparâmetros para {ranger}	78
Tabela 37 – Intervalos de hiperparâmetros para {e1071} (svm)	79
Tabela 38 – Intervalos de hiperparâmetros para {glmnet}	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Banestes	Banco do Estado do Espírito Santo
ETS	<i>Exponential Smoothing</i>
Favar	<i>Factor Augmented Vector Autoregression</i>
Lasso	<i>Least Absolute Shrinkage and Selection Operator</i>
LGBM	<i>Light Gradient Boosting Machine</i>
MCRL	Modelo Clássico de Regressão Linear
MASE	<i>Mean Absolute Scaled Error</i>
MinT	<i>Minimum Trace</i>
ML	<i>Machine Learning</i>
MQGF	Mínimos Quadrados Generalizados Factíveis
MQO	Mínimos Quadrados Ordinários
MQP	Mínimos Quadrados Ponderados
PIB	Produto Interno Bruto
RF	<i>Random Forest</i>
RMSSE	<i>Root Mean Squared Scaled Error</i>
SFN	Sistema Financeiro Nacional
SVM	<i>Support Vector Machines</i>
SVR	<i>Support Vector Regression</i>
XGBoost	<i>Extreme Gradient Boosting</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

t	Tempo dentro da amostra
T	Último tempo dentro da amostra
Q	Último tempo do conjunto de treinamento para os modelos de ML
h	Horizonte de previsão, tempo fora da amostra
y	Série temporal
\hat{y}	Série temporal estimada
\tilde{y}	Série temporal reconciliada
n	Número de séries na hierarquia
m	Número de séries no menor nível da hierarquia
\mathbf{b}	Vetor de séries no nível mais desagregado
$\mathbf{\hat{e}}$	Vetor de erros das previsões base
$\mathbf{\hat{W}}$	Matriz de variância-covariância dos erros de previsão base
$\mathbf{\tilde{e}}$	Vetor de erros das previsões reconciliadas
\mathbf{S}	Matriz de soma
\mathbf{G}	Matriz de reconciliação
$\{\dots\}$	Conjunto
$ \{\dots\} $	Cardinalidade de um conjunto
Ω	Conjunto de dados

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Contextualização da pesquisa	13
1.2	Outline	15
2	RECONCILIAÇÃO DE SÉRIES TEMPORAIS HIERÁRQUICAS E AGRUPADAS	16
2.1	Notação algébrica	16
2.2	Abordagens de nível único	18
2.3	Coerência e reconciliação	23
3	ESTENDENDO O FRAMEWORK DE COMBINAÇÃO ÓTIMA VIA MACHINE LEARNING	25
3.1	Introdução	25
3.2	Metodologia de combinação ótima via machine learning	26
3.3	Notas sobre otimização de hiperparâmetros na reconciliação ótima	31
3.4	Conclusão	33
4	PREVISÕES DE SALDOS DE EMPRÉSTIMOS E FINANCIAMENTOS DO BANCO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO	34
4.1	Introdução	34
4.2	Revisão de literatura	36
4.3	Metodologia	36
4.4	Resultados	42
4.5	Conclusão	47
5	PREVISÕES PARA O TURISMO DOMÉSTICO AUSTRALIANO	49
5.1	Metodologia	49
5.2	Resultados e discussão	50
6	CONCLUSÕES	55
6.1	Conclusões da dissertação	55
6.2	Pesquisa futura	60
	REFERÊNCIAS	62
	APÊNDICES	68
	APÊNDICE A – DEMONSTRAÇÕES	69
	APÊNDICE B – MÉTODOS DE MACHINE LEARNING	72

1	Elastic Net	72
2	Gradient Boosting	73
3	Random Forest	73
4	Support Vector Machines	74
	APÊNDICE C – CONJUNTOS DE HIPERPARÂMETROS	78

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização da pesquisa

Diversas indústrias se enquadram em categorias de negócio que requerem previsões de múltiplas séries temporais correlacionadas que são resultados de agregação. Por exemplo, o total de empréstimos de uma instituição financeira corresponde ao agregado dos empréstimos de cada uma de suas agências; o total de vendas de uma rede nacional de farmácias corresponde ao agregado de vendas de suas unidades em cada estado; o total da produção de uma petrolífera multinacional corresponde ao total produzido em cada país por cada uma de suas plataformas. A essas estruturas naturais de agregação dá-se o nome de *séries temporais hierárquicas* (HYNDMAN; ATHANASOPOULOS, 2021).

No que concerne a elaboração dessas previsões, pode-se realizar previsões individualmente para todos os níveis da estrutura. No caso de uma empresa qualquer, isso significa realizar previsões, por exemplo, para cada filial, para o agregado das filiais de cada região e para o agregado da instituição. Infelizmente, não há qualquer razão matemática, exceto para métodos de previsão muito simples, para que essas previsões sejam *coerentes* (i.e. que a soma das previsões individuais seja igual às previsões do agregado). Para garantir previsões coerentes entre si foram desenvolvidos os chamados métodos de previsão hierárquicas (ATHANASOPOULOS; AHMED; HYNDMAN, 2009), sendo os mais simples o *top-down*, *bottom-up* e uma combinação das duas, o *middle-out*.

Ao menos desde a década de 1960, diversos trabalhos foram publicadas acerca das abordagens *bottom-up* e *top-down*, suas vantagens e desvantagens, e tentativas de se definir qual é o melhor método¹. A abordagem *top-down* envolve realizar previsões para o total e então distribuí-las para cada nó filho da estrutura seguindo alguma lógica proporcional. Tomando o caminho inverso, a abordagem *bottom-up* consiste em realizar previsões para cada série do nível mais desagregado e, então, agregá-las para obter as previsões para os níveis superiores. Ambos métodos possuem suas vantagens e desvantagens e cabe ao analista avaliar o *trade-off* entre os ganhos de precisão percebidos com a geração de previsões individuais para todas as séries do menor nível hierárquico e a economia de tempo e processamento em realizar o contrário (GROSS; SOHL, 1990).

Além disso, ambas são abordagens de nível único, isto é, são realizadas as previsões para um único nível e então os demais níveis são obtidos agregando ou desagregando. O problema com esses tipos de abordagem é que elas utilizam informação incompleta (HYNDMAN; ATHANASOPOULOS, 2021). Por exemplo, suponha-se que se escolha estimar modelos para cada uma das n filiais de uma empresa e agregá-las (*bottom-up*). Nesse caso, ignora-se a influência que os níveis mais agregados podem ter na estimação de cada filial. Por outro lado,

¹ Revisões sistemáticas das literaturas iniciais relacionadas ao tema podem ser encontradas em Athanasopoulos, Ahmed e Hyndman (2009) e Athanasopoulos, Hyndman, Kourentzes e Panagiotelis (2023).

caso se escolha estimar modelos para o nível mais agregado (*top-down*), ignora-se a informação individual de cada filial.

Uma terceira possibilidade é a *reconciliação ótima*. Ela é uma abordagem que busca resolver esse problema e consiste em realizar previsões para todos os níveis hierárquicos e, então, estimar um modelo para reescrever as previsões do nível mais desagregado como uma combinação linear de todos os elementos da hierarquia. Obtidas as novas previsões no menor nível, elas são então agregadas, gerando previsões coerentes nos níveis superiores. Dessa forma, a informação de todos os níveis é utilizada na estimação dos modelos e na geração das previsões ao mesmo tempo em que a variância do erro de previsão é minimizada (WICKRAMASURIYA; ATHANASOPOULOS; HYNDMAN, 2019).

Atualmente, os métodos analíticos baseados na minimização do traço (MinT) da matriz da variância-covariância dos erros das previsões reconciliadas, desenvolvidos em Wickramasuriya, Athanasopoulos e Hyndman (2019), estão entre os mais populares na literatura da reconciliação ótima. Esses métodos divergem apenas na forma da qual se dá o relacionamento entre os diferentes elementos da hierarquia, resultando numa estimação por mínimos quadrados ordinários (MQO), mínimos quadrados ponderados (MQP) ou mínimos quadrados generalizados (MQG)².

Entretanto, tais métodos são sujeitos a uma série de restrições, como as do modelo clássico de regressão linear (MCRL), e têm sua capacidade preditiva reduzida quando suas hipóteses são violadas. Além disso, esses métodos requerem que *toda* a informação seja utilizada, mesmo aquelas que eventualmente não sejam relevantes para aquela previsão. Nesse sentido, métodos de *machine learning* são mais gerais, de modo a permitir parâmetros não lineares e poderem aproximar virtualmente qualquer função, além de incluírem parâmetros de regularização, de forma que não necessariamente utilizam toda a informação disponível. Espera-se, portanto, que esses métodos alcancem melhor performance no problema da reconciliação ótima, justificando a pesquisa e atenção ao tema. Nessa direção, Spiliotis et al. (2021) propuseram uma metodologia para reconciliação ótima de séries temporais hierárquicas utilizando métodos de *machine learning*, especificamente o *gradient boosting* e *random forest*, obtendo resultados superiores aos métodos analíticos em algumas situações.

Tomando como ponto de partida a metodologia proposta por Spiliotis et al. (2021), este trabalho explora métodos adicionais de ML na tarefa de reconciliação ótima, especificamente os métodos de regressão regularizada Lasso, *ridge* e *elastic net*, e *support vector machines* (SVM), além de outra implementação de *gradient boosting*, o *LightGBM* (LGBM). Paralelamente, propõe e avalia estratégias alternativas na obtenção do conjunto de treinamento para os modelos de ML, verificando se sua performance preditiva supera a dos métodos analíticos nas

² Se os erros de previsão são descorrelacionados e homoscedásticos ao longo de toda estrutura (MQO), o que é impossível em séries temporais hierárquicas; se os erros são descorrelacionados e homoscedásticos apenas dentro do mesmo nível hierárquico (MQP estrutural); se os erros são descorrelacionados mas ponderados pela variância da série (MQP); ou se são correlacionados e variantes ao longo de toda a estrutura (MQG).

situações em que a metodologia original não foi capaz.

Para tanto, foram realizados três estudos de caso, sendo o primeiro em um contexto de economia bancária brasileira, enquanto os demais envolvem bases de dados amplamente utilizadas na literatura de séries temporais hierárquicas, relacionadas ao setor de turismo doméstico australiano. O primeiro estudo de caso trata da previsão de saldos de empréstimos e financiamentos do Banco do Estado do Espírito Santo (Banestes); o segundo, da previsão da quantidade trimestral de viagens domésticas na Austrália; e o terceiro, da previsão da quantidade mensal de noites que os visitantes passam em viagens domésticas na Austrália.

1.2 Outline

Esta dissertação está organizada da seguinte forma: no Capítulo 2, é introduzida a formalização algébrica e metodológica necessária para a compreensão dos métodos de previsões de séries temporais hierárquicas e reconciliação ótima, assim como uma breve revisão de literatura englobando os artigos seminais para o tema. No Capítulo 3, são apresentadas as propostas de variações metodológicas para combinação ótima por ML. No Capítulo 4, é realizado o estudo de caso para a previsão de saldos de crédito e financiamento para o Banestes. No Capítulo 5, são realizados os estudos de casos para as bases de turismo doméstico australiano.

Uma síntese das contribuições desse trabalho é expressa pelos seguintes pontos:

1. Como trabalhos anteriores já haviam evidenciado, a reconciliação ótima por ML é capaz de melhorar a acurácia das previsões de séries temporais hierárquicas e agrupadas em relação aos métodos analíticos;
2. Além do *XGBoost* (XGB) e do *random forest* (RF), já testados em [Spiliotis et al. \(2021\)](#), foram avaliados na tarefa de reconciliação ótima os métodos de ML LGBM, *Lasso*, *ridge*, *elastic net*, e SVM.
3. Principalmente devido à quantidade de hiperparâmetros a serem calibrados, os métodos de ML baseados em árvore de decisão (XGB, RF e LGBM) apresentaram custo elevado em tempo de processamento, ao mesmo tempo em que não foram capazes de superar métodos mais simples, como os de regressão regularizada e SVM, de forma que o *trade-off* entre acurácia e tempo de processamento não foi justificado.
4. Foram investigadas três estratégias para obtenção do conjunto de treinamento dos modelos de reconciliação ótima por ML: o *rolling forecasting* (proposta em [Spiliotis et al. \(2021\)](#)), e outras duas adicionais propostas neste trabalho, a primeira utilizando os valores ajustados dos modelos de previsão base e a segunda utilizando os valores ajustados de modelos reestimados;
5. Para otimização dos hiperparâmetros dos modelos de ML, foi proposta a utilização de validação cruzada com origem móvel;

6. Não houve método ou estratégia que alcançasse consistentemente a melhor performance em todos os três estudos de caso, ou mesmo ao longo de todos os níveis hierárquicos de cada estudo de caso. Em geral, os métodos de ML obtiveram melhor resultados, ou nos níveis mais desagregados, ou nos mais agregados, a depender do conjunto de dados analisado;
7. A combinação correta do método de ML e da estratégia para obtenção do conjunto treinamento pode resultar em até 93% de ganho de performance em relação aos métodos analíticos de reconciliação ótima.

2 RECONCILIAÇÃO DE SÉRIES TEMPORAIS HIERÁRQUICAS E AGRUPADAS

2.1 Notação algébrica

Séries temporais hierárquicas são aquelas que podem ser agregadas ou desagregadas naturalmente em uma estrutura aninhada (HYNDMAN; ATHANASOPOULOS, 2021). Para ilustrar, tome a série do PIB de um país fictício com três estados, cada um com dois municípios. Essa série pode ser desagregada por estado que, por sua vez, pode ser desagregada por município (Figura 1).

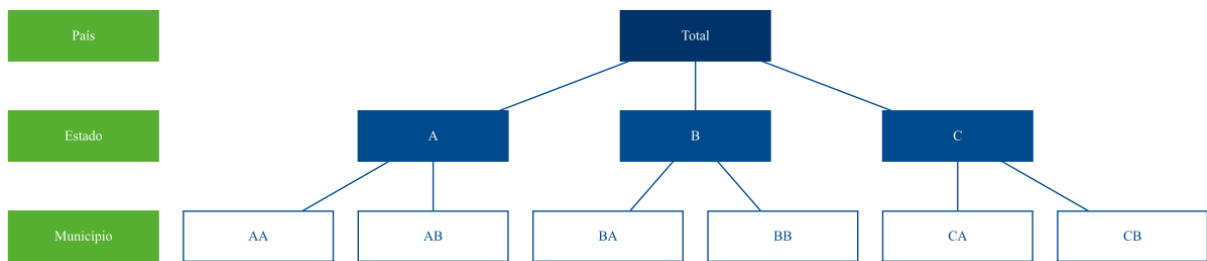


Figura 1 – Séries Hierárquicas

Essa estrutura pode ser representada através de equações para qualquer nível de agregação. Dessa forma, o agregado nacional pode ser descrito pelos agregados dos estados, Equação (1), ou como o agregado dos municípios, Equação (2). Já o agregado para o estado A é representado pela Equação (3).

$$y_t = y_{A,t} + y_{B,t} + y_{C,t} \quad (1)$$

$$y_t = y_{AA,t} + y_{AB,t} + y_{BA,t} + y_{BB,t} + y_{CA,t} + y_{CB,t} \quad (2)$$

$$y_{A,t} = y_{AA,t} + y_{AB,t} \quad (3)$$

Alternativamente, podemos descrever a estrutura completa de forma matricial:

$$\begin{bmatrix} y_t \\ y_{A,t} \\ y_{B,t} \\ y_{C,t} \\ y_{AA,t} \\ y_{AB,t} \\ y_{BA,t} \\ y_{BB,t} \\ y_{CA,t} \\ y_{CB,t} \end{bmatrix}_{10 \times 1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{10 \times 6} \begin{bmatrix} y_{AA,t} \\ y_{AB,t} \\ y_{BA,t} \\ y_{BB,t} \\ y_{CA,t} \\ y_{CB,t} \end{bmatrix}_{6 \times 1} \quad (4)$$

Uma outra forma de desagregarmos o PIB é por atividade econômica — agricultura, indústrias extrativas, indústria de transformação, eletricidade e gás, construção etc (Figura 2). Essa estrutura não pode ser desagregada naturalmente de uma única maneira, como é a hierarquia de estados e municípios. Não pode ser aninhada por um atributo como a própria geografia. A esse tipo de estrutura dá-se o nome de *séries temporais agrupadas*.

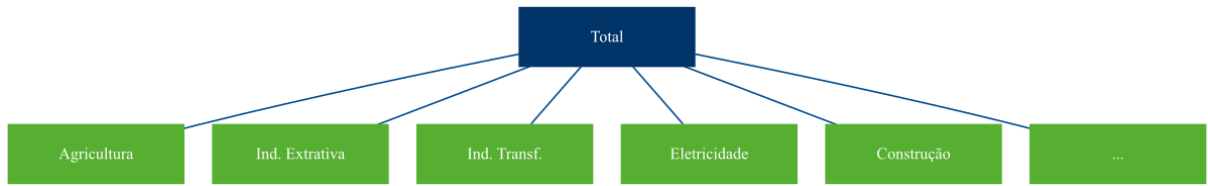


Figura 2 – Séries Agrupadas

Combinando as duas, temos a estrutura de séries hierárquicas agrupadas. Ao contrário da estrutura hierárquica, que só pode ser agregada de uma forma, como com os municípios abaixo dos estados³, a adição da estrutura agrupada pode ocorrer tanto acima (Figura 3) quanto abaixo (Figura 4) da hierárquica.

Na notação matricial, a estrutura da Figura 4 é representada como abaixo. Formalmente, o primeiro membro da igualdade é composto pelo vetor y_t n -dimensional com todas as observações no tempo t para todos os níveis da hierarquia. O segundo membro é composto pela matriz de soma S de dimensão $n \times m$ que define as equações para todo nível de agregação, e pelo vetor b_t composta pelas séries no nível mais desagregado.

$$y_t = Sb_t \quad (5)$$

³ Essa estrutura é única no sentido que o somatório dos municípios totaliza o estado, mas não se pode somar estados para totalizar um município. Outro exemplo de estrutura hierárquica é a série de vendas de uma empresa: pode-se agregar as vendas de cada filial para obter o total, mas não o contrário.

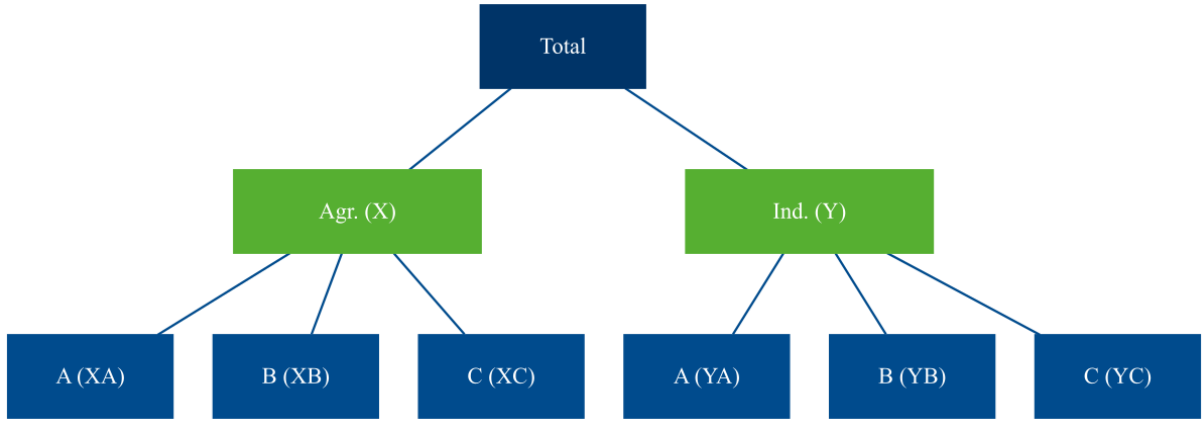


Figura 3 – Séries Hierárquicas Agrupadas (a)

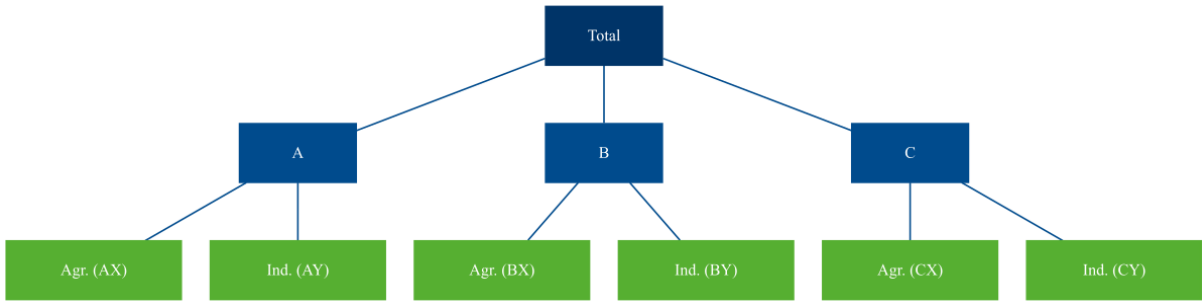


Figura 4 – Séries Hierárquicas Agrupadas (b)

$$\begin{bmatrix} y_t \\ y_{A,t} \\ y_{B,t} \\ y_{C,t} \\ y_{X,t} \\ y_{Y,t} \\ y_{AX,t} \\ y_{AY,t} \\ y_{BX,t} \\ y_{BY,t} \\ y_{CX,t} \\ y_{CY,t} \end{bmatrix}_{12 \times 1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{12 \times 6} \begin{bmatrix} y_{AX,t} \\ y_{AY,t} \\ y_{BX,t} \\ y_{BY,t} \\ y_{CX,t} \\ y_{CY,t} \end{bmatrix}_{6 \times 1} \quad (6)$$

2.2 Abordagens de nível único

As abordagens de nível único são aquelas em que as previsões são realizadas para um único nível hierárquico. A partir dessas previsões, os demais níveis são obtidos, ou desagregando (no caso dos níveis inferiores), ou agregando (no caso dos níveis superiores) essas previsões (HYNDMAN; ATHANASOPOULOS, 2021). Os métodos *top-down*, *bottom-up* e *middle-out* são abordagens de nível único.

Enquanto há apenas uma única forma de se agregar níveis na hierarquia (*bottom-up*), a desagregação (*top-down*) pode ser realizada de, ao menos, duas dezenas de maneiras (GROSS; SOHL, 1990). Dois dos métodos mais intuitivos são a média das proporções históricas e a proporção das médias históricas.

Na média das proporções históricas, cada proporção p_j , com $j = 1, \dots, m$, consiste em tomar a média das proporções da série desagregada $y_{j,t}$ em relação ao agregado $y_{1,t}$:

$$p_j = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{y_{j,t}}{y_{1,t}} \quad (7)$$

Já a proporção das médias históricas consiste em tomar a proporção das médias das séries desagregadas em relação à média do agregado⁴.

$$p_j = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{y_{j,t}}{T}}{\sum_{t=1}^T \frac{y_{1,t}}{T}} \quad (8)$$

Athanasopoulos, Ahmed e Hyndman (2009) desenvolvem o método proporções de previsão, que consiste em um método *top-down* em que os pesos são calculados a partir das proporções das previsões fora da amostra ao invés do passado. A vantagem do método é que os pesos estarão os mais próximos das características mais recentes da série, ao invés de serem baseados em dados históricos. A desvantagem é que se deve realizar previsões para toda a hierarquia, perdendo o ganho de agilidade dos demais métodos *top-down*.

$$p_j = \prod_{i=0}^{K-1} \frac{\hat{Y}_{j,t+h}^i}{\sum \hat{Y}_{j,t+h}^{(i+1)}}$$

Uma vez definida a forma e os pesos com os quais as previsões do agregado serão distribuídas nos níveis inferiores, podemos definir uma matriz com todos esses pesos, que, seguindo a formulação de Hyndman e Athanasopoulos (2021), chamamos de G :

$$G = \begin{bmatrix} p_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{6 \times 10} \quad (9)$$

⁴ Isso é equivalente a tomar a proporção direta entre os somatórios das séries. Note que, pelas propriedades do operador de somatório, $\sum_{t=1}^T \frac{y_t}{T} = \frac{y_1}{T} + \dots + \frac{y_T}{T} = \frac{y_1 + \dots + y_T}{T} = \frac{\sum_{t=1}^T y_t}{T}$. Então, a equação Equação 8 pode ser simplificada para $p_j = \frac{\sum_{t=1}^T y_{j,t}}{\sum_{t=1}^T y_{1,t}}$.

\mathbf{G} é uma matriz $m \times n$ que multiplica o vetor $\hat{\mathbf{y}}_{T+h|T}$ que chamamos de *previsões base*, isto é, as previsões individuais para todos os níveis de agregação. A equação para a abordagem *top-down* será, então:

$$\tilde{\mathbf{y}}_{T+h|T} = \mathbf{S}\mathbf{G}\hat{\mathbf{y}}_{T+h|T} \quad (10)$$

Na notação matricial para a estrutura da Figura 1, temos:

$$\begin{bmatrix} \tilde{y}_t \\ \tilde{y}_{A,t} \\ \tilde{y}_{B,t} \\ \tilde{y}_{C,t} \\ \tilde{y}_{AA,t} \\ \tilde{y}_{AB,t} \\ \tilde{y}_{BA,t} \\ \tilde{y}_{BB,t} \\ \tilde{y}_{CA,t} \\ \tilde{y}_{CB,t} \end{bmatrix}_{10 \times 1} = \mathbf{S}_{10 \times 6} \begin{bmatrix} p_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{6 \times 10} \begin{bmatrix} \hat{y}_{T+h|T} \\ \hat{y}_{A,T+h|T} \\ \hat{y}_{B,T+h|T} \\ \hat{y}_{C,T+h|T} \\ \hat{y}_{AA,T+h|T} \\ \hat{y}_{AB,T+h|T} \\ \hat{y}_{BA,T+h|T} \\ \hat{y}_{BB,T+h|T} \\ \hat{y}_{CA,T+h|T} \\ \hat{y}_{CB,T+h|T} \end{bmatrix}_{10 \times 1} \quad (11)$$

Multiplicando as matrizes \mathbf{G} e $\hat{\mathbf{y}}$ obtemos o vetor \mathbf{b}_t^5 , que contém as previsões para os níveis mais desagregados, agora definidas como proporção do total.

$$\begin{bmatrix} \tilde{y}_t \\ \tilde{y}_{A,t} \\ \tilde{y}_{B,t} \\ \tilde{y}_{C,t} \\ \tilde{y}_{AA,t} \\ \tilde{y}_{AB,t} \\ \tilde{y}_{BA,t} \\ \tilde{y}_{BB,t} \\ \tilde{y}_{CA,t} \\ \tilde{y}_{CB,t} \end{bmatrix}_{10 \times 1} = \mathbf{S}_{10 \times 6} \begin{bmatrix} p_1 \hat{y}_{T+h|T} \\ p_2 \hat{y}_{T+h|T} \\ p_3 \hat{y}_{T+h|T} \\ p_4 \hat{y}_{T+h|T} \\ p_5 \hat{y}_{T+h|T} \\ p_6 \hat{y}_{T+h|T} \end{bmatrix}_{6 \times 1} \quad (12)$$

Note que, por se tratar de um método *top-down*, é necessário apenas o primeiro elemento do vetor de previsões base, ou seja, a previsão do nível mais agregado (Equação 12). Sendo essa exatamente uma das vantagens do método *top-down*, na prática, podemos anular os demais elementos de $\hat{\mathbf{y}}$.

⁵ Ver Equação 5.

$$\begin{bmatrix} \tilde{y}_t \\ \tilde{y}_{A,t} \\ \tilde{y}_{B,t} \\ \tilde{y}_{C,t} \\ \tilde{y}_{AA,t} \\ \tilde{y}_{AB,t} \\ \tilde{y}_{BA,t} \\ \tilde{y}_{BB,t} \\ \tilde{y}_{CA,t} \\ \tilde{y}_{CB,t} \end{bmatrix}_{10 \times 1} = \mathbf{S}_{10 \times 6} \begin{bmatrix} p_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{6 \times 10} \begin{bmatrix} \hat{y}_{T+h|T} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{10 \times 1} \quad (13)$$

Substituindo a matriz \mathbf{S} , temos as equações que definem as previsões reconciliadas.

$$\begin{bmatrix} \tilde{y}_t \\ \tilde{y}_{A,t} \\ \tilde{y}_{B,t} \\ \tilde{y}_{C,t} \\ \tilde{y}_{AA,t} \\ \tilde{y}_{AB,t} \\ \tilde{y}_{BA,t} \\ \tilde{y}_{BB,t} \\ \tilde{y}_{CA,t} \\ \tilde{y}_{CB,t} \end{bmatrix}_{10 \times 1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{10 \times 6} \begin{bmatrix} p_1 \hat{y}_{T+h|T} \\ p_2 \hat{y}_{T+h|T} \\ p_3 \hat{y}_{T+h|T} \\ p_4 \hat{y}_{T+h|T} \\ p_5 \hat{y}_{T+h|T} \\ p_6 \hat{y}_{T+h|T} \end{bmatrix}_{6 \times 1} \quad (14)$$

Já a abordagem *bottom-up* parte do raciocínio inverso e define as previsões de cada elemento da estrutura a partir das previsões dos elementos mais desagregados. Para tanto, basta modificar a matriz \mathbf{G} .

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{6 \times 10} \quad (15)$$

Portanto, \mathbf{G} define a abordagem — se *top-down*, *bottom-up* ou outro qualquer —, e \mathbf{S} define a maneira da qual as previsões são somadas para formar as equações de previsão para cada elemento da estrutura. Portanto, chamamos \mathbf{G} de matriz de reconciliação.

$$\begin{bmatrix} \tilde{y}_t \\ \tilde{y}_{A,t} \\ \tilde{y}_{B,t} \\ \tilde{y}_{C,t} \\ \tilde{y}_{AA,t} \\ \tilde{y}_{AB,t} \\ \tilde{y}_{BA,t} \\ \tilde{y}_{BB,t} \\ \tilde{y}_{CA,t} \\ \tilde{y}_{CB,t} \end{bmatrix}_{10 \times 1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{10 \times 6} \begin{bmatrix} \hat{y}_{AA,T+h|T} \\ \hat{y}_{AB,T+h|T} \\ \hat{y}_{BA,T+h|T} \\ \hat{y}_{BB,T+h|T} \\ \hat{y}_{CA,T+h|T} \\ \hat{y}_{CB,T+h|T} \end{bmatrix}_{6 \times 1} \quad (16)$$

Quando m — a quantidade de elementos do nível mais desagregado — é muito grande, tornando muito custoso obter $\hat{\mathbf{y}}_t$, e não se deseja uma abordagem estritamente *top-down*, pode-se combinar as duas formas:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & p_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (17)$$

Esse método é chamado de *middle-out*. Nele, o vetor \mathbf{b}_t é reescrito como proporções de algum nível intermediário arbitrariamente escolhido, ao invés de proporções do total. Isso permite uma abordagem mais econômica, em termos de custo computacional e de tempo, ao mesmo tempo em que mantém em algum grau as características individuais das hierarquias.

$$\begin{bmatrix} \tilde{y}_t \\ \tilde{y}_{A,t} \\ \tilde{y}_{B,t} \\ \tilde{y}_{C,t} \\ \tilde{y}_{AA,t} \\ \tilde{y}_{AB,t} \\ \tilde{y}_{BA,t} \\ \tilde{y}_{BB,t} \\ \tilde{y}_{CA,t} \\ \tilde{y}_{CB,t} \end{bmatrix}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{n \times m} \begin{bmatrix} p_1 \hat{y}_{A,T+h|T} \\ p_2 \hat{y}_{A,T+h|T} \\ p_3 \hat{y}_{A,T+h|T} \\ p_4 \hat{y}_{B,T+h|T} \\ p_5 \hat{y}_{B,T+h|T} \\ p_6 \hat{y}_{B,T+h|T} \end{bmatrix}_{m \times 1} \quad (18)$$

2.3 Coerência e reconciliação

Seja somando as previsões do nível mais desagregado para formar os níveis superiores da hierarquia (*bottom-up*) ou distribuindo proporcionalmente as previsões do nível mais agregado (*top-down*), o vetor $\tilde{\mathbf{y}}_t$ representa as previsões *coerentes*. Isso significa que as previsões são totalizadas corretamente — as previsões de cada elemento agregado corresponde ao somatório das previsões dos níveis inferiores da hierarquia. Isso é garantido pela multiplicação das matrizes $\mathbf{S}\mathbf{G}$.

Não fosse essa pré-multiplicação, nada garantiria a coerência das previsões. Tomando a estrutura da Figura 1 como exemplo, seria um acaso improvável que as previsões do agregado para o estado do Espírito Santo fossem exatamente a soma das previsões individuais de seus municípios. Isso porque não há qualquer razão para que cada série siga o mesmo processo estocástico.

Os métodos para gerar previsões coerentes ($\tilde{\mathbf{y}}_t$) a partir de previsões base ($\hat{\mathbf{y}}_t$) são chamados de métodos de *reconciliação*. Os métodos de reconciliação tradicionais apresentados, *top-down* e *bottom-up*, utilizam informação limitada. No método *top-down*, utiliza-se apenas informações do nível mais agregado — por isso, apenas a primeira coluna em (Equação 9) é diferente de zero. Já na abordagem *bottom-up*, utiliza-se apenas as informações dos níveis mais desagregados, o que resulta na submatriz identidade $m \times m$ (Equação 15), enquanto as colunas que representam os níveis mais agregados são nulas.

Alternativamente, podemos pensar numa matriz \mathbf{G} qualquer que utilize toda a informação disponível e tenha algumas propriedades que garantam que as previsões coerentes tenham o menor erro o possível. Esse é o problema de pesquisa trabalhado na *reconciliação ótima*.

Os métodos analíticos de reconciliação ótima são aqueles que estimam a matriz de reconciliação \mathbf{G} através de regressão linear. Isso resulta na redefinição das previsões do nível mais desagregado como uma combinação linear⁶ das previsões de todos os elementos de todos os níveis da hierarquia, utilizando, assim, toda a informação disponível.

A primeira abordagem prática para reconciliação ótima, via MQO, é formalizada apenas em Hyndman, Ahmed et al. (2011). Hyndman, Lee e Wang (2016) tentam aperfeiçoar o método usando as variâncias das previsões individuais estimadas (dentro da amostra) como estimativa para a matriz de variância-covariância dos erros de reconciliação, de forma a utilizá-las como pesos e realizar a reconciliação ótima por mínimos quadrados ponderados (MQP).

Wickramasuriya, Athanasopoulos e Hyndman (2019) argumentam que o que de fato interessa é que as previsões reconciliadas tenham o menor erro. Então, corrigem a abordagem de reconciliação ótima para o objetivo de minimização dos erros das previsões reconciliadas $\tilde{\mathbf{y}}_{t+h}$, ao invés dos erros das previsões individuais $\hat{\mathbf{y}}_{t+h}$. Dado que isso implica na minimização da variância de $\tilde{\mathbf{e}}_{t+h}$, ou seja, na minimização do somatório da diagonal, o traço, da matriz de

⁶ Por essa razão, esses métodos são também chamados de métodos de combinação.

variância-covariância de $\tilde{\mathbf{e}}_{t+h}$, eles chamaram esse método de Traço Mínimo (MinT, na sigla em inglês).

Este método é considerado o estado-da-arte para a reconciliação ótima analítica. Nele, o objetivo é minimizar o erro das previsões reconciliadas:

$$\tilde{\mathbf{e}}_{t+h|t} = \mathbf{y}_{t+h} - \tilde{\mathbf{y}}_{t+h|t} \quad (19)$$

Essa equação pode ser reescrita como $\tilde{\mathbf{e}}_t = \mathbf{S}\mathbf{G}\hat{\mathbf{e}}_t$, que tem variância dada por⁷

$$\text{Var}[\tilde{\mathbf{e}}] = \mathbf{S}\mathbf{G}\hat{\mathbf{W}}_{t+h|t}\mathbf{G}'\mathbf{S}' \quad (20)$$

em que $\hat{\mathbf{W}}_{t+h|t}$ é a matriz de variância-covariância dos erros de previsão base.

A abordagem consiste então em se obter um valor de \mathbf{G} que minimize o traço de $\text{Var}[\mathbf{y}_{t+h} - \tilde{\mathbf{y}}_{t+h|t}]$. Isso resultaria no melhor (variância mínima) estimador linear não viesado⁸ (WICKRAMASURIYA; ATHANASOPOULOS; HYNDMAN, 2019). Sua solução é dada por

$$\mathbf{G} = (\mathbf{S}'\hat{\mathbf{W}}_{t+h|t}^\dagger\mathbf{S})^{-1}\mathbf{S}'\hat{\mathbf{W}}_{t+h|t}^\dagger \quad (21)$$

em que $\hat{\mathbf{W}}_{t+h|t}^\dagger$ é a inversa generalizada de Moore-Penrose para $\hat{\mathbf{W}}_{t+h|t}$ ⁹. Essa formulação corresponde a um problema de regressão por mínimos quadrados generalizados, considerando \mathbf{S} como a matriz de preditores e \mathbf{G} os coeficientes a serem estimados. Consequentemente, as previsões ótimas reconciliadas são dadas por

$$\tilde{\mathbf{y}}_{t+h|t} = \mathbf{S}(\mathbf{S}'\hat{\mathbf{W}}_{t+h|t}^\dagger\mathbf{S})^{-1}\mathbf{S}'\hat{\mathbf{W}}_{t+h|t}^\dagger\hat{\mathbf{y}}_{t+h|t} \quad (22)$$

que são ao menos tão boas quanto as previsões individuais, de acordo com o demonstrado pelos autores.

Spiliotis et al. (2021) propõem a utilização de *machine learning* para a reconciliação ótima de séries temporais, especificamente os métodos de RF e *gradient boosting*. A ideia subjacente é treinar modelos individuais de ML para cada série do nível mais desagregado a partir de previsões para dentro da amostra obtidas via *rolling forecasting*, com o objetivo de encontrar a combinação contemporânea que minimiza os erros, para então usar esses modelos para combinar as previsões base. Os autores descrevem como vantagens desse método em relação aos anteriores a descrição de relacionamentos não lineares, performance preditiva e a desnecessidade da utilização de todos os elementos da hierarquia na combinação ótima. Para o conjunto de

⁷ Ver demonstração A.3.

⁸ A ausência de viés é garantida pela condição de ausência de viés em $\tilde{\mathbf{y}}$.

⁹ A necessidade da inversa generalizada aqui é trivial, uma vez que a inversa regular, do tipo \mathbf{A}^{-1} , requer matriz quadrada, o que não acontece no caso de séries temporais hierárquicas, uma vez que, necessariamente, tem-se $n > m$ ($n = m + \text{número de nós de agregação}$). Além disso, $\hat{\mathbf{W}}$ é posto incompleto (ver demonstração A.4).

dados utilizados, os autores afirmam que o uso de ML, especialmente o XGB, permite alcançar maior performance em relação às abordagens de nível único e o MinT.

[Panagiotelis et al. \(2021\)](#) reinterpreta a literatura de coerência e reconciliação de previsões pontuais a partir de uma abordagem geométrica, trazendo provas alternativas para conclusões anteriores ao mesmo tempo em que fornece novos teoremas. Além disso, os autores estendem essa interpretação geométrica para o contexto probabilístico, fornecendo métodos paramétricos e não paramétricos (via *bootstrapping*) para reconciliação de previsões probabilísticas.

[Shiratori, Kobayashi e Takano \(2020\)](#) propõem a utilização de um termo de regularização para penalizar o erro dos níveis superiores na previsão das séries do nível mais desagregado, de forma a obter as previsões base já com a informação dos níveis superiores, substituindo a abordagem de combinação ótima. Assim como nas demais abordagens, a coerência é obtida através de agregação BU.

Uma revisão sistemática descrevendo os avanços e diferentes abordagens para reconciliação de previsões hierárquicas pode ser encontrada em [Athanasopoulos, Hyndman, Kourentzes e Panagiotelis \(2023\)](#). Isto posto, a presente dissertação foca em estender a abordagem de combinação ótima por ML, realizada em trabalhos como de [Spiliotis et al. \(2021\)](#), para a reconciliação de séries temporais hierárquicas e agrupadas, avaliando a efetividade de 7 implementações de métodos de ML (RF, XGB, *Lasso*, *ridge*, *elastic net*, SVM e LGBM), propondo variações metodológicas para a obtenção do conjunto de treinamento dos modelos de ML e obtendo ganhos significativos de performance em três estudos de caso.

3 ESTENDENDO O FRAMEWORK DE COMBINAÇÃO ÓTIMA VIA MACHINE LEARNING

3.1 Introdução

A ideia da reconciliação de previsões por combinação consiste em encontrar combinações, lineares ou não, que minimizem o erro de combinação contemporânea dentro da amostra e tenham o menor erro de generalização para o conjunto de previsões base, incoerentes, para fora da amostra. O objetivo é que, dada a performance das previsões base individuais \hat{y}_t , as previsões reconciliadas \tilde{y}_t , obtidas por combinação e agregadas de maneira BU, se tornem mais precisas por conta da incorporação de informações dos diferentes níveis hierárquicos e demais nós da estrutura.

Embora os métodos de ML também sejam utilizados no contexto de previsão de séries temporais, é importante ressaltar que este não é caso deste trabalho. As previsões de séries temporais são realizadas anteriormente, na obtenção das previsões base \hat{y}_t . Nada impede que essas previsões sejam obtidas por métodos de ML, inclusive utilizando técnicas de

previsão hierárquica na predição de séries individuais (ATHANASOPOULOS; HYNDMAN; KOURENTZES; PETROPOULOS, 2017), entretanto, a aplicação dos métodos de ML aqui ocorrem na reconciliação, ou seja, na combinação contemporânea, *cross section*, das previsões base que, por sua vez, podem ter sido obtidas através de qualquer método.

Nesse sentido, este trabalho busca estender o *framework* de combinação ótima utilizando métodos de ML para a reconciliação de séries temporais hierárquicas e agrupadas. Além de avaliar 7 implementações de métodos de ML (RF, XGB, *Lasso*, *ridge*, *elastic net*, SVM e LGBM)¹⁰, propõe variações metodológicas para a obtenção do conjunto de treinamento dos modelos de ML.

3.2 Metodologia de combinação ótima via machine learning

Spiliotis et al. (2021) propõem estimar essa combinação em uma abordagem que constitui-se nas seguintes etapas:

1. Previsões base: Para cada série y_t , incluindo os nós de agregação, utiliza-se todo o conjunto de treinamento, de tamanho T , para produzir previsões h passos à frente, $\hat{y}_{t+h|T}$, utilizando qualquer método de previsão. Essas são as previsões base a serem reconciliadas.



Figura 5 – Previsões base a serem reconciliadas. Em azul, o conjunto de treino e, em verde, as previsões h passos à frente para fora da amostra.

2. *Rolling forecast*: A amostra treino é separada em p subamostras para todas as séries em todos os níveis de agregação, com a primeira separação abrangendo y_1 até y_Q , a segunda y_1 até y_{Q+1} e assim sucessivamente até a última separação abrangendo y_1 até y_{Q+p-1} . Para cada subamostra é treinado um modelo que, mais uma vez, pode ser estimado utilizando qualquer método. Então, é realizada previsão um passo a frente. Essas previsões são então concatenadas para formar o conjunto de treinamento para os modelos de ML.
3. Treino dos modelos de ML: Para cada série do nível mais desagregado, y_m , é treinado um modelo de ML com $n + 1$ variáveis, compostas pelas n séries previstas — que incluem todos os níveis de agregação —, mais a própria y_m como variável explicada (Tabela 1). Cada uma das n séries contam com p previsões obtidas na 2ª etapa, representadas na Figura 6 pela cor verde. Isso resulta em um modelo de reconciliação ótima para cada

¹⁰ Uma breve introdução sobre cada um desses métodos pode ser encontrado no Apêndice B.

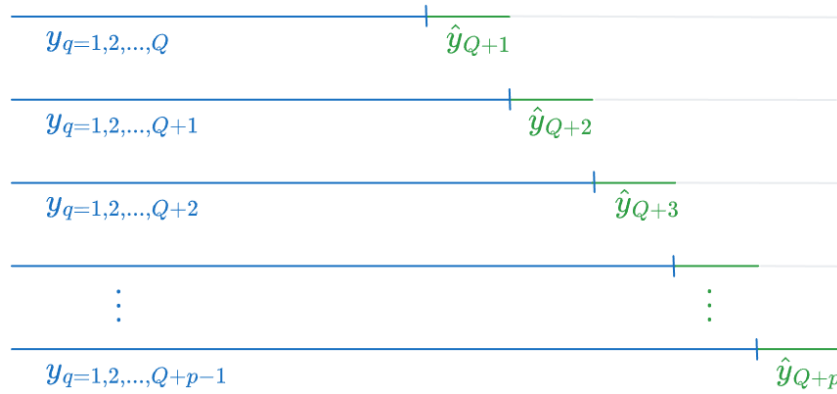


Figura 6 – Esquema de modelagem *rolling forecast*

elemento do menor nível da hierarquia, combinando informações disponíveis de todos os níveis hierárquicos.

Tabela 1 – Conjunto de treinamento para predição dos modelos de ML

Var. Explicada	Variável 1	Variável 2	...	Variável n
$y_{1,Q+1}$	$\hat{y}_{1,Q+1}$	$\hat{y}_{2,Q+1}$...	$\hat{y}_{n,Q+1}$
$y_{1,Q+2}$	$\hat{y}_{1,Q+2}$	$\hat{y}_{2,Q+2}$...	$\hat{y}_{n,Q+2}$
...
$y_{m,Q+p}$	$\hat{y}_{1,Q+p}$	$\hat{y}_{2,Q+p}$...	$\hat{y}_{n,Q+p}$

4. Reconciliação ótima: Com os modelos treinados na 3ª etapa, passa-se as previsões base obtidas na 1ª etapa como regressores para se obter as previsões reconciliadas h passos à frente das séries do nível mais desagregado \tilde{y}_m .
5. Agregação: Assim como nos métodos analíticos de combinação ótima, a obtenção das previsões reconciliadas para os demais níveis de hierárquicos \tilde{y}_n se dá através da agregação BU, mas ao invés de se somar as previsões base \hat{y}_m , somam-se as previsões reconciliadas \tilde{y}_m .

Dessa forma, essa metodologia é semelhante à aplicada na reconciliação ótima analítica, se afastando principalmente em três pontos: (i) a utilização de algoritmos de ML ao invés de MQG, (ii) a não atribuição de peso de forma obrigatória para todos os nós da hierarquia e (iii) no ajuste de um modelo individual para cada série do nível mais desagregado, permitindo maior especialização e sendo capaz de se adaptar melhor aos diferentes padrões de cada série (SPILLOTIS et al., 2021). A Figura 7 ilustra a metodologia de combinação ótima via ML.

Um ponto negativo na estratégia de *rolling forecasting* (2ª etapa) é o custo em tempo de processamento. Em um cenário de hierarquias largas e agrupadas, o ganho de performance com a estimação de um modelo individual para cada p subamostras pode não compensar o *trade-off* em relação ao custo.

que o da estratégia por *rolling forecasting*, mas o custo computacional é reduzido, uma vez que é treinado apenas um modelo para cada série y_t . Além disso, como alterações são comuns em processos estocásticos de séries longas de natureza econômica ou social, a estratégia *reduced fitted values* pode resultar em previsões mais precisas, uma vez que os modelos são reestimados apenas com os dados de Ω_2 , resultando em coeficientes adaptados às características mais recentes das séries.

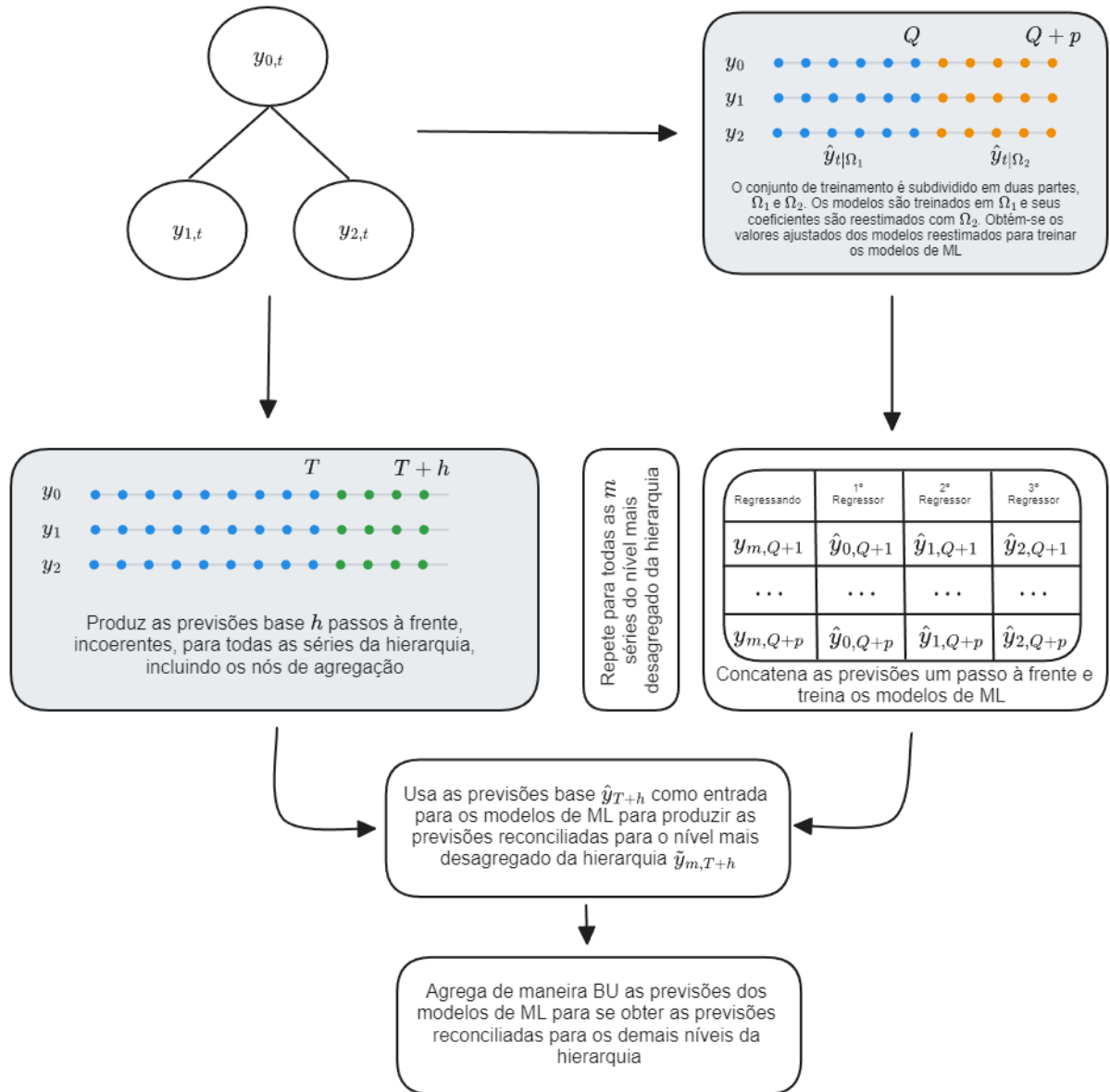


Figura 8 – Metodologia de combinação ótima via ML. Estratégia *reduced fitted values*

As duas estratégias possuem uma dificuldade em comum: a necessidade de realização de previsões para dentro do conjunto de treinamento. Isso pode ser um problema para séries temporais com poucas observações ou incompletas. Por exemplo, suponha o problema de previsão hierárquica para uma franquia de varejo. O fechamento e abertura de novas filiais é bastante frequente, o que eventualmente irá resultar em filiais abertas após o período escolhido para Q . Como a combinação ótima trata da combinação contemporânea, isso significaria lidar com da-

dos faltantes no conjunto de treinamento dos modelos de ML. As alternativas metodológicas para contornar esse problema passam por restringir a escolha dos métodos de ML para apenas aqueles capazes de trabalhar com dados faltantes nativamente ou utilizar uma estratégia de imputação na etapa de pré-processamento.

Para as séries de processo estocástico bem definido, mesmo em longos períodos, uma 3º estratégia para aquisição do conjunto de treinamento para os modelos de ML é usar os valores ajustados dos modelos das previsões base \hat{y} (passo 1) como input para os modelos de ML. Chamarei essa estratégia de *fitted values* (Figura 9).

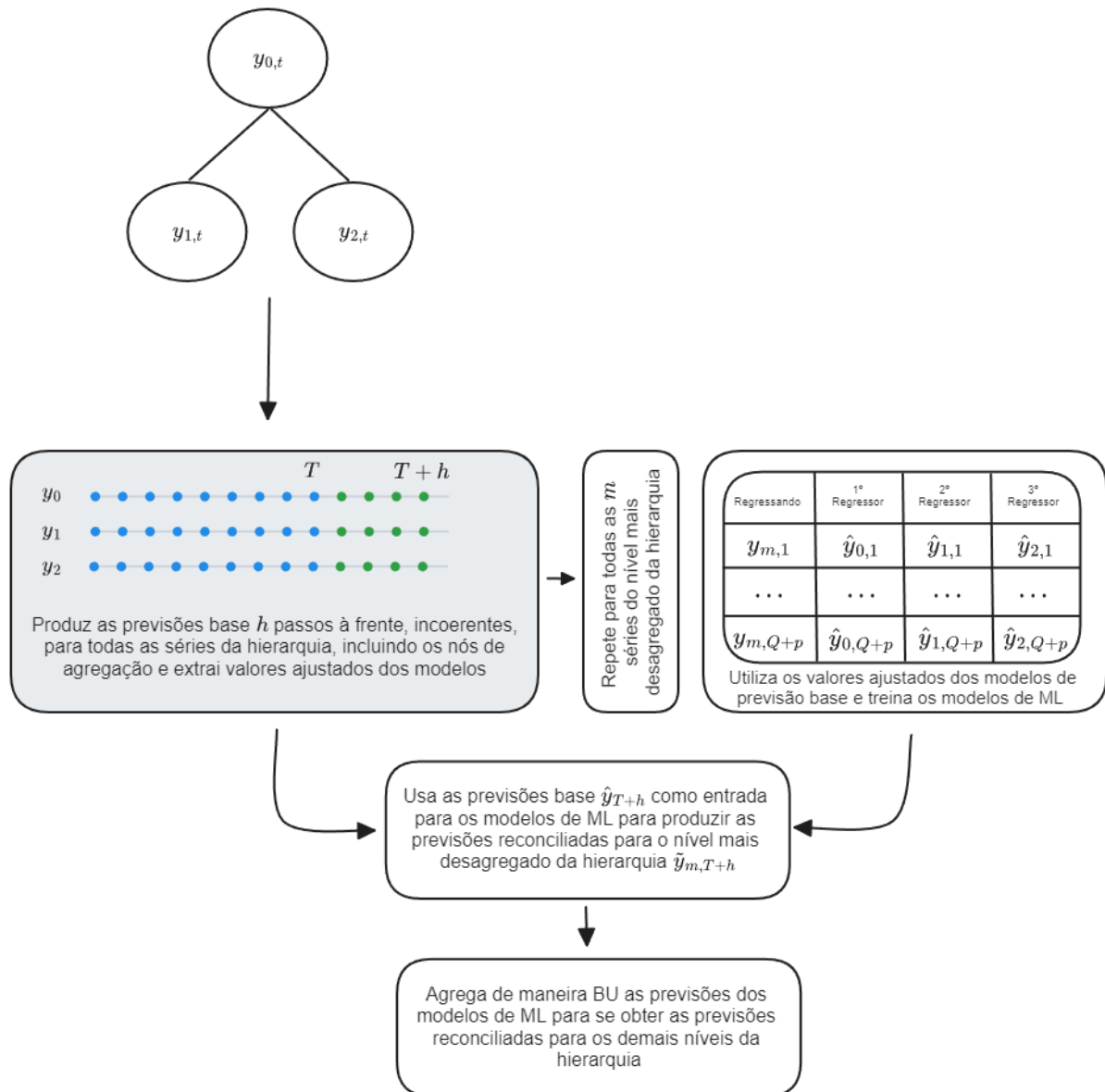


Figura 9 – Metodologia de combinação ótima via ML. Estratégia *fitted values*

Essa estratégia equivale a usar previsões um passo à frente obtidas a partir do conjunto de dados completo $\Omega = \Omega_1 + \Omega_2$. Em relação às duas estratégias anteriores, essa abordagem aumenta o tamanho da amostra treino em Q observações para cada série, o que pode melhorar a

qualidade modelos de ML. Além disso, ela é ainda mais simples de implementar, uma vez que não é necessário gerar novos modelos, utilizando aqueles já estimados na 1ª etapa.

3.3 Notas sobre otimização de hiperparâmetros na reconciliação ótima

Considere uma função de ajuste f , um conjunto de pontos $\Omega = \omega_1, \dots, \omega_n$ com $\omega_i = (\mathbf{x}_i \ y_i)'$, variáveis de decisão ou parâmetros $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^m$ e imagem $y_i = f(\mathbf{x}_i) \in \mathbb{R}$. Diferentemente da abordagem do modelo clássico de regressão linear em que, cumpridas certas hipóteses, há um modelo teórico de coeficientes estimados por mínimos quadrados ordinários (MQO) que é garantido pelo teorema de Gauss-Markov ser o melhor estimador linear não viesado (BLUE), em ML o objetivo é encontrar, de forma iterativa, um modelo que melhor aproxima a função f usando a informação contida em Ω , ou seja, queremos ajustar uma função de regressão \hat{f}_Ω aos nossos dados Ω de forma que $\hat{\mathbf{y}} = \hat{f}_\Omega(\mathbf{x}, \varepsilon)$ tenha o menor erro de aproximação ε (BISCHL; MERSMANN et al., 2012).

Para verificar o quão bem o modelo \hat{f}_D se aproxima da função real f , é necessário uma função de perda $L(\mathbf{y}, \hat{f}(\mathbf{x}))$ que, no caso de regressão, será a perda quadrática $(\mathbf{y} - \hat{f}(\mathbf{x}))^2$ ou a perda absoluta $|\mathbf{x} - \hat{f}(\mathbf{x})|$. Esses valores são agregados pela média para formar as funções de custo erro médio quadrático (MSE) e erro médio absoluto (MAE).

A fim de evitar o problema de sobreajuste, diferentes métodos para mensuração do erro de generalização (i.e. performance fora da amostra) foram desenvolvidos, sendo a validação cruzada (STONE, 1974) um dos mais populares. Este método consiste em gerar repetidamente i subconjuntos de treino Ω_i^a e teste Ω_i^b , com $\Omega = \Omega_i^a + \Omega_i^b$; ajustar um meta-modelo com cada conjunto de treino; e avaliar sua qualidade no conjunto de teste correspondente. Dessa forma, a estimativa do erro de generalização se dá por

$$\widehat{GE}_{me} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \widehat{GE}(\hat{f}_{\Omega_i^a}, \Omega_i^b) \quad (23)$$

sendo \widehat{GE}_{me} o erro de generalização médio. Dividindo a amostra em k subconjuntos, utilizando $k - 1$ para ajustar um meta-modelo e validando a performance no subconjunto restante — e repetindo esse procedimento para todas as possibilidades de subconjuntos —, temos a validação cruzada k -fold. Esta é uma técnica de reamostragem que permite estimar o erro de generalização de um modelo de forma mais robusta e confiável que o *hold-out* simples (quando $k = 1$). Isso porque, ao contrário do *hold-out*, a validação cruzada permite que todos os dados sejam usados tanto para treino quanto para teste, o que reduz a variância da estimativa do erro de generalização.

Para dados *cross-section*, essa definição de validação cruzada k -fold é geralmente suficiente. Entretanto, no caso de séries temporais, o analista deve tomar alguns cuidados na escolha da abordagem de validação cruzada. Isso porque, ao contrário de dados *cross-section*, os dados de séries temporais são dependentes no tempo. Isso traz dois problemas aparentes:

primeiramente, ao dividir a amostra em k subconjuntos aleatórios, o meta-modelo será treinado em períodos descontínuos e com dados futuros aos dados de teste em, ao menos, $k - 1$ subconjuntos. Em segundo lugar, realizando a subdivisão treino-teste em y_t , com y_{t-1} na amostra treino, significa que os subconjuntos de treino e teste são dependentes (Figura 10).

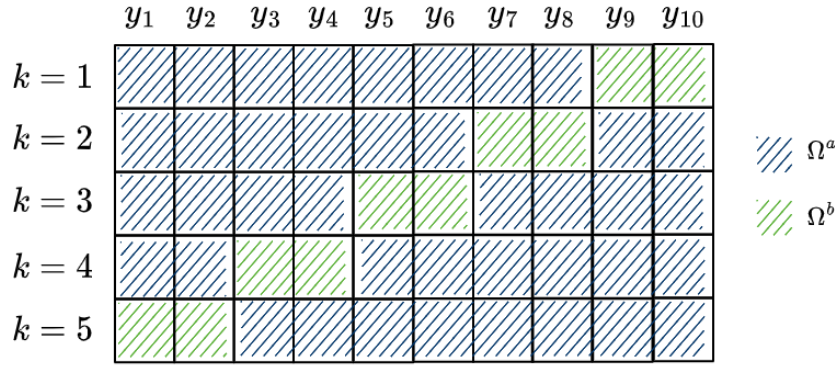


Figura 10 – Validação k -fold aleatória

Para contornar esse problema, outros métodos de validação cruzada foram desenvolvidos pensando em séries temporais. Tomando o conjunto de validação com dados exclusivamente posteriores aos dados de treino, temos o método conhecido como validação cruzada com origem móvel (Figura 11).

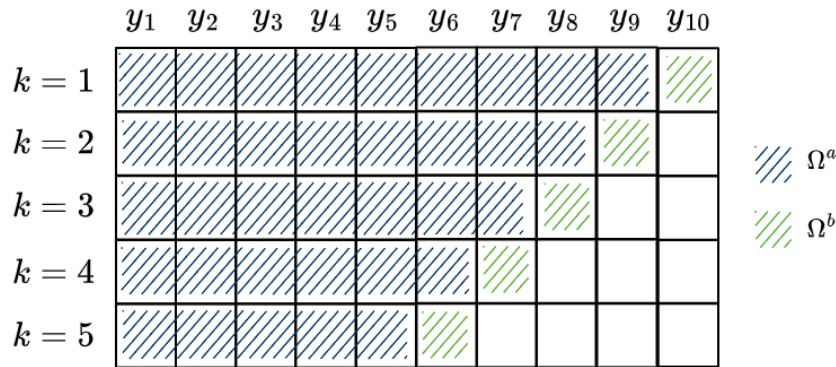


Figura 11 – Validação k -fold com origem móvel

Já quando excluimos as defasagens dependentes do subconjunto de treino (em relação ao conjunto de validação), temos a validação cruzada não dependente (Figura 12). Para ilustrar esse caso, tome um processo AR(3). Excluir as defasagens dependentes significa que, se o conjunto de validação começa em y_t , então o conjunto de treino pode conter observações apenas até y_{t-4} . O problema evidente dessa abordagem é que, dependendo do tamanho da estrutura de autocorrelação da série, muitas defasagens são excluídas de cada k -fold, podendo inviabilizar o processo de validação.

Cumpridas algumas restrições, esses problemas são apenas aparentes. [Bergmeir e Benítez \(2012\)](#) comparam uma série de métodos de validação em séries temporais e concluem que, considerando séries estacionárias, os problemas teóricos relacionados à dependência não

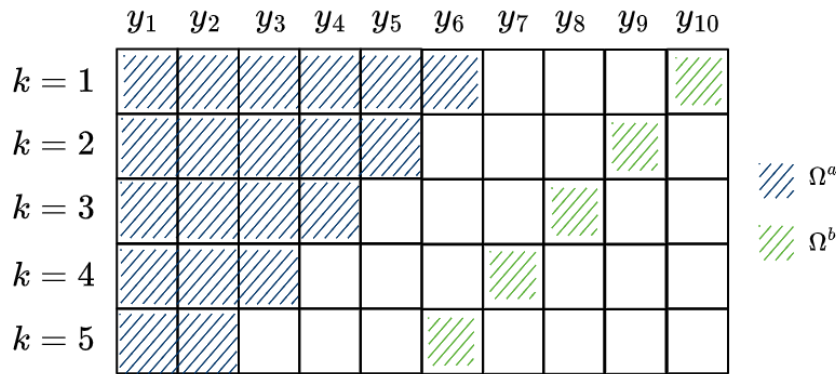


Figura 12 – Validação k -fold não-dependente

produzem impactos empíricos. [Bergmeir, Hyndman e Koo \(2018\)](#) vão além e abordam esse problema teórico e empiricamente, concluindo que não apenas é possível o uso de validação cruzada k -fold quando a série não apresenta autocorrelação serial nos resíduos, mas também é uma melhor escolha do que a validação fora da amostra¹¹.

Entretanto, no mundo real, trabalhando com uma longa coleção de séries temporais hierárquicas agrupadas, raramente será o caso em que a totalidade das séries são estacionárias. Nesse sentido, é razoável supor que, mesmo que o método de reconciliação via combinação ótima trate da combinação contemporânea das previsões, se as médias das séries estão se alterando ao longo do tempo, a combinação ótima entre elas também possa se alterar. Por isso, um processo de validação cruzada que não suponha estacionariedade pode ser mais adequado.

Por essa razão, proponho que o processo de reamostragem para otimização de hiperparâmetros conte com, além da validação cruzada k -fold, a validação cruzada com origem móvel em seu *benchmark*. Para tanto, é necessário definir uma janela mínima para Ω^a e um horizonte para o conjunto de teste Ω^b , que devem ser escolhidos de acordo com as características do conjunto de dados trabalhado.

3.4 Conclusão

Nesta seção, foram apresentadas a abordagem para a reconciliação de previsões de séries temporais hierárquicas e agrupadas por combinação ótima utilizando métodos de ML. Foram propostas três estratégias para a obtenção do conjunto de treinamento dos modelos de ML: *rolling forecast*, *reduced fitted values* e *fitted values*. Cada uma dessas estratégias tem suas vantagens e desvantagens, e a escolha entre elas depende das características específicas das séries temporais que estão sendo previstas.

Além disso, discutiu-se a importância da validação cruzada na otimização de hiperparâmetros para modelos de ML no cenário de combinação ótima. Em particular, destacou-se a necessidade de considerar a dependência temporal nos dados ao escolher o método de valida-

¹¹ *Out-of-sample evaluation* é o método padrão na literatura de séries temporais e consiste na separação da porção final da série — geralmente entre 20% e 30% — para validação.

ção cruzada. Nesse sentido, propus o uso da validação cruzada com origem móvel como uma alternativa para calibração dos modelos de combinação ótima.

4 PREVISÕES DE SALDOS DE EMPRÉSTIMOS E FINANCIAMENTOS DO BANCO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO

4.1 Introdução

Embora no séc. XX ainda houvesse espaço para uma gestão guiada apenas por instinto (WALLANDER, 1999), atualmente é impensável um banco não realizar previsões de seus resultados e comunicar suas expectativas ao mercado. Nesse documento, ou *guidance*, a projeção da carteira de crédito — o total de empréstimos e financiamentos, dentre outros itens — é frequentemente a primeira informação fornecida. Juntamente com as projeções de depósitos, provisões para créditos de liquidação duvidosa, eficiência operacional, entre outros indicadores-chave, essas projeções determinam a temperatura das expectativas da instituição, e isso é essencial para os acionistas e investidores. Essas projeções precisam ser tão precisas quanto possível para que se possa calcular o risco de transacionar com a instituição financeira.

Ainda que não existam penalidades específicas para instituições financeiras que erram (por uma boa margem) em suas projeções, elas podem sofrer consequências negativas em outros aspectos, como na avaliação de seus desempenhos por parte dos investidores e clientes. Estes podem considerar as projeções equivocadas como um sinal de falta de competência ou confiança na instituição financeira, o que pode afetar negativamente a reputação e a imagem da instituição.

Além disso, nos casos em que algum grupo se sentir lesado, os bancos podem enfrentar ações judiciais se suas projeções forem consideradas enganosas ou fraudulentas. Por exemplo, se uma instituição financeira fizer projeções excessivamente otimistas para incentivar os investidores a comprar seus títulos e, posteriormente, as projeções se mostrarem incorretas, ela pode ser acusada de fraude¹² ou, ao menos, gestão temerária¹³ — ambos caracterizados como crime contra o Sistema Financeiro Nacional (SFN).

Por isso, é importante que as instituições financeiras sejam transparentes e precisas em suas projeções, fornecendo informações confiáveis e atualizadas para seus clientes e investidores. No entanto, há também motivações estratégicas para essa atividade. Beccalli et al. (2015) mostraram que, em uma amostra de 55 bancos europeus, a utilização de *guidance* está associada a um aumento de 15% na probabilidade do banco atingir ou superar as expectativas de mercado.

¹² Art. 3º: Divulgar informação falsa ou prejudicialmente incompleta sobre instituição financeira. Pena: Reclusão, de 2 (dois) a 6 (seis) anos, e multa. Art. 4º: Gerir fraudulentamente instituição financeira. Pena: Reclusão, de 3 (três) a 12 (doze) anos, e multa (BRASIL, 1986).

¹³ Art. 4º, parágrafo único: Se a gestão é temerária: Pena: Reclusão, de 2 (dois) a 8 (oito) anos, e multa (BRASIL, 1986).

Isso, por sua vez, está associado a um incremento de até 5% no retorno por ação em relação aos bancos que não alcançaram ou superaram as expectativas.

A prática usual em *budgeting*¹⁴, principalmente para empresas com muitas filiais, é a *top-down*. No caso dos bancos de varejo, com muitas agências espalhadas pelo território, esse método pode ser muito útil. Na prática, em um país continental como o Brasil, a quantidade de filiais para as quais se deve realizar previsões pode tornar a tarefa desafiadora mesmo para instituições regionais.

Esse é o caso do Banestes. Com 134 agências distribuídas pelos 78 municípios capixabas, realizar o *budgeting* para R\$ 5,5 bi de faturamento¹⁵ não é uma tarefa trivial. Além de uma estrutura hierárquica de alta dimensionalidade por conta da quantidade de agências, se tratando de um banco múltiplo¹⁶ que opera com diversas carteiras, as n modalidades de crédito¹⁷ expandem a estrutura para um total de $n \times 134$ séries temporais a serem estimadas.

Dada tal complexidade, a abordagem *top-down* se coloca como uma opção viável em termos de tempo de processamento e análise. No entanto, conforme descemos na hierarquia, menos precisa ela se torna e, além disso, as características individuais das séries temporais do menor nível hierárquicos são ignoradas. No sentido inverso, caso se escolha estimar modelos para cada uma das 134 agências e agregá-las (*bottom-up*), ignora-se a influência que os níveis mais agregados — aqui a carteira de crédito da região ou de todo o estado — podem ter na estimação do saldo de crédito de cada agência. De qualquer forma, utiliza-se informação incompleta. Nesse sentido, a reconciliação ótima pode incrementar em grande medida a acurácia das previsões de saldos de crédito de instituições financeiras, permitindo a elaboração do *guidance* e do orçamento de forma mais precisa.

Neste estudo de caso, buscou-se aprimorar as previsões de saldos de empréstimos e financiamentos do Banco do Estado do Espírito Santo através da aplicação da metodologia de combinação ótima via ML. Para o *benchmarking*, foram testadas 7 implementações de métodos de ML (XGB, RF, LGBM, *Elastic Net*, *Lasso*, *ridge* e SVM), 2 métodos analíticos (*bottom-up* e MinT), 3 estratégias de aquisição do conjunto de treinamento para os modelos de ML (*rolling forecast*, *fitted values* e *reduced fitted values*) e 2 estratégias de validação cruzada (aleatória e *rolling origin*).

¹⁴ O orçamento é um documento no qual é definido o planejamento financeiro de um empresa, geralmente para o ano seguinte, estabelecendo metas e objetivos. Nele, são projetadas as expectativas da empresa e é base de comparação para saber como os resultados estão se desviando da performance esperada.

¹⁵ Conforme demonstrativos publicados referentes ao exercício de 2022 ([BANCO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, 2022](#)).

¹⁶ Para ser classificado como banco múltiplo, a instituição financeira deve operar com, no mínimo, duas carteiras dentre: comercial; investimento ou desenvolvimento; crédito imobiliário; de crédito, financiamento e investimento, e; arrendamento mercantil ([CONSELHO MONETÁRIO NACIONAL, 1994](#)).

¹⁷ Crédito consignado, rural, imobiliário, pessoal, capital de giro, desconto de títulos etc.

4.2 Revisão de literatura

A nível macroeconômico, a previsão do agregado de crédito das instituições financeiras é uma preocupação de bancos centrais ao redor do mundo. No Brasil, [Bader, Koyama, Sérgio Mikio e Tsuchida, Marcos Hiroyuki \(2014\)](#) aprimoram o método FAVAR (*Factor Augmented Vector Autoregression*) com uma etapa de análise de correlação canônica para identificar as melhores, em termos de correlação com as variáveis de crédito do SFN, combinações lineares de componentes principais. [Çolak et al. \(2019\)](#) produzem, a partir de séries filtradas do agregado de crédito, indicadores para monitoramento de períodos de expansão e desaceleração de crédito no setor bancário turco.

Já para níveis abaixo do agregado de crédito, poucos trabalhos foram encontrados. Tangenciando o tema da previsão de saldos de crédito, outros tópicos da economia bancária foram objeto de estudo para previsão de séries temporais. [Sezer, Gudelek e Ozbayoglu \(2019\)](#) produziram revisão de literatura de trabalhos que realizaram previsão de séries temporais financeiras utilizando *deep learning*. [Gorodetskaya, Gobareva e Koroteev \(2021\)](#) propõem o que chamaram de “uma metodologia universal” para aplicação automática de *machine learning* na previsão de séries temporais do setor bancário. Entretanto, nenhum dos trabalhos combinaram estruturas hierárquicas com *machine learning*.

No que diz respeito à previsão de séries temporais em largas hierarquias, [Prayoga, Suhartono e Rahayu \(2017\)](#) trabalharam na previsão do fluxo de caixa do Banco da Indonésia, utilizando uma hierarquia de 3 níveis. Porém, utilizaram apenas a abordagem *top-down* para reconciliação. Inversamente, [Li et al. \(2016\)](#) compararam dois métodos de *machine learning* para previsão da produção de energia solar no estado da Flórida/EUA, redes neurais artificiais e SVM, em uma abordagem *bottom-up*, caracterizando ambos trabalhos como de nível único.

Aplicações de reconciliação ótima foram realizadas a nível macroeconômico para previsão do PIB australiano, índices de inflação no Reino Unido e México, e previsão de desemprego no Brasil ([ATHANASOPOULOS; HYNDMAN; KOURENTZES; PANAGIOTELIS, 2023](#)). Entretanto, não foram encontradas referências à aplicação de reconciliação ótima para previsão hierárquica de saldos de empréstimos e financiamentos de bancos, tanto a nível individual quanto para o agregado de crédito de uma economia, de forma que este trabalho possa ser o primeiro a aplicar a abordagem de combinação ótima via ML para esse contexto.

4.3 Metodologia

Os dados usados nesse trabalho são dados terciários obtidos do *datalake* público Base dos Dados ([DAHIS et al., 2022](#)). A fonte primária são os bancos comerciais e múltiplos com carteira comercial que disponibilizam mensalmente os saldos dos principais verbetes do balan-

cete via documento 4500¹⁸ ao Banco Central do Brasil, que os compila e publica, agrupados por agência bancária e por município, no relatório ESTBAN — Estatística Bancária Mensal e por Município¹⁹.

O que compõe os verbetes de crédito, ou seja, os valores das séries temporais a serem trabalhadas, são os saldos de crédito ativo (empréstimos e financiamentos), que correspondem ao principal mais os juros calculados até 59 dias de atraso²⁰. Além das estatísticas bancárias, foram obtidas informações de regiões, mesorregiões e microrregiões dos estados, também a partir *datalake* Base dos Dados, com o objetivo de enriquecer a estrutura hierárquica dos dados do ESTBAN, limitada aos municípios.

Em relação à cobertura temporal, utilizou-se dados entre 2003 e 2022. Por brevidade, optou-se por não trabalhar com dados faltantes²¹. Portanto, apesar do Banestes contar com 134 agências, foram mantidas apenas as agências com série completa, ou seja, que já estavam em atividade em 2003.

Por fim, o conjunto de dados conta com séries mensais de saldos de empréstimos e financiamentos de 79 agências bancárias, distribuídas por 62 municípios, entre janeiro de 2003 e dezembro de 2022, totalizando 37.920 observações. Esses dados então são organizados de forma hierárquica por estado, mesorregião, microrregião, município e agência bancária; e, de forma agrupada, por verbe. Com a estrutura hierárquica e agrupada, o conjunto de dados alcança 114 480 observações.

O estado do Espírito Santo está localizado no sudeste brasileiro e é dividido em 78 municípios, que estão agrupados em 4 mesorregiões e 13 microrregiões.

Tabela 2 – Microrregiões por mesorregião

Mesorregião	Microrregiões
Central Espírito Santense	Afonso Claudio, Guarapari, Santa Teresa, Vitória
Litoral Norte Espírito Santense	Linhares, Montanha, São Mateus
Noroeste Espírito Santense	Barra de São Francisco, Colatina, Nova Venécia
Sul Espírito Santense	Alegre, Cachoeiro de Itapemirim, Itapemirim

Na amostra selecionada para este trabalho, com exceção dos municípios de Colatina e Cachoeiro de Itapemirim, que contam com 2 agências cada, todos os demais municípios no interior contam com uma única agência. Já na microrregião da capital Vitória, se encontram municípios com múltiplas unidades. Considerando que essa microrregião é a mais representativa (Figura 16), é importante a manutenção do nível hierárquico municipal.

¹⁸ Esses documentos são relatórios eletrônicos obrigatórios demandados pelo Bacen às instituições financeiras que permitem ao regulador o conhecimento minucioso dos bancos e de seus clientes.

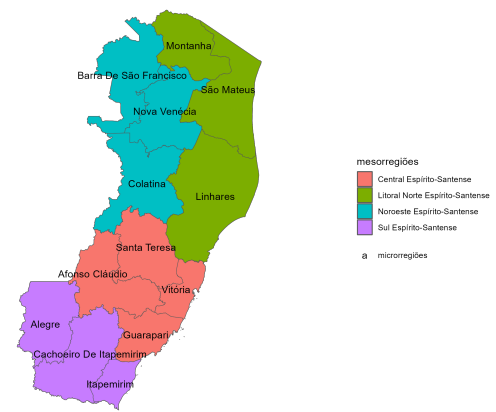
¹⁹ <https://www4.bcb.gov.br/fis/cosif/estban.asp?frame=1>

²⁰ Não são consideradas crédito ativo as operações de crédito liquidadas ou que tenham sido transferidas para prejuízo. São transferidas para prejuízo as operações de crédito em atraso há mais 6 meses após sua classificação de risco em H, que é a mínima (CONSELHO MONETÁRIO NACIONAL, 1999).

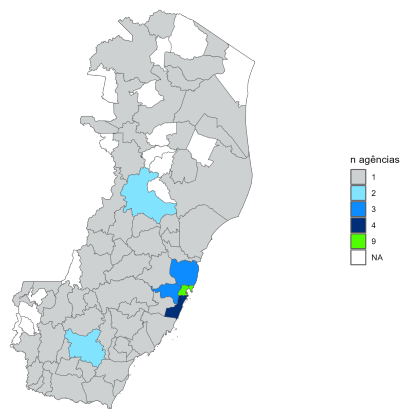
²¹ Ver Section 3.2.



(a) Posição no Brasil



(b) Micro e mesorregiões



(c) Quantidade de agências por município

Figura 13 – O Estado do Espírito Santo e suas meso e microrregiões.**Tabela 3** – Municípios por microrregião

Microrregiões	Municípios
Afonso Claudio	Afonso Claudio, Conceicao do Castelo, domingos Martins, Laranja da Terra, Marechal Floriano, Venda Nova do Imigrante
Alegre	Alegre, Guacui, Ibatiba, Iuna, Muniz Freire
Barra de Sao Francisco	Barra de Sao Francisco, Ecoporanga, Mantenopolis
Cachoeiro de Itapemirim	Apiaca, Atilio Vivacqua, Bom Jesus do Norte, Cachoeiro de Itapemirim, Castelo, Jeronimo Monteiro, Mimoso do Sul, Muqui, Sao Jose do Calcado, Vargem Alta
Colatina	Baixo Guandu, Colatina, Pancas
Guarapari	Alfredo Chaves, Anchieta, Guarapari, Iconha, Piuma, Rio Novo do Sul
Itapemirim	Itapemirim, Marataizes, Presidente Kennedy
Linhares	Aracruz, Fundao, Ibiracu, Joao Neiva, Linhares, Rio Bananal
Montanha	Mucurici, Pinheiros
Nova Venecia	Aguia Branca, Boa Esperanca, Nova Venecia, Vila Valerio
Santa Teresa	Itaguacu, Itarana, Santa Leopoldina, Santa Maria de Jetiba, Santa Teresa, Sao Roque do Canaa
Sao Mateus	Jaguare, Pedro Canario, Sao Mateus
Vitoria	Cariacica, Serra, Viana, Vila Velha, Vitoria

A série temporal do agregado de crédito no Banestes no Espírito Santo é apresentada na Figura 14. Em relação à distribuição, a mesorregião Central Espírito-santense concentra mais crédito do que o somatório das demais regiões (Figura 15), sendo a microrregião de Vitória a responsável por essa concentração (Figura 16). Na ótica dos verbetes, o crédito para financiamentos é uma pequena fração do saldo de empréstimos, independentemente da mesorregião (Figura 17 e Figura 18).

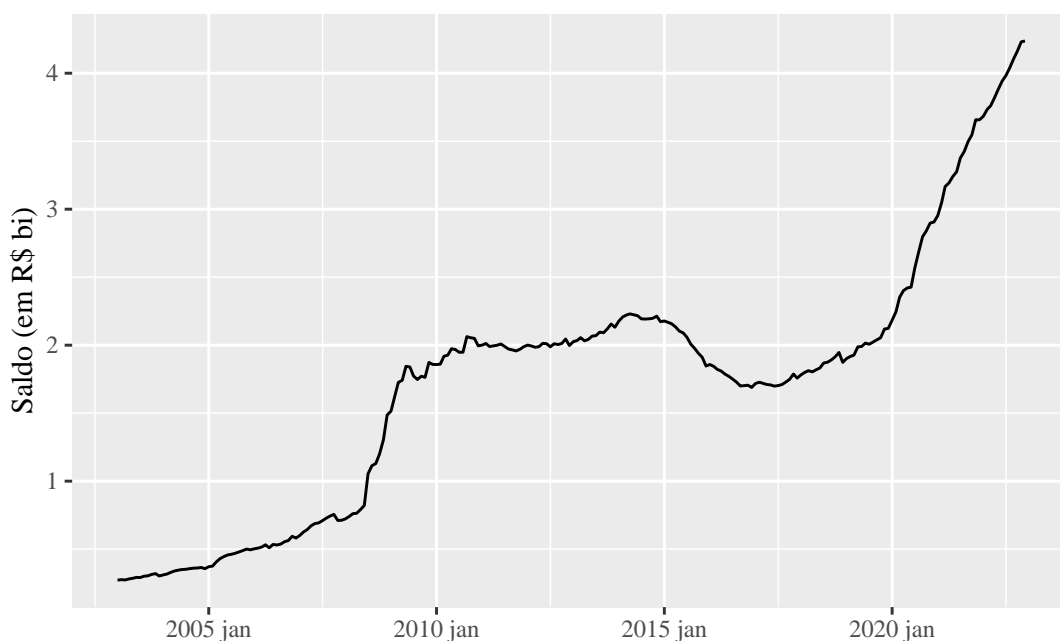


Figura 14 – Série temporal do agregado de crédito do Banestes no ES

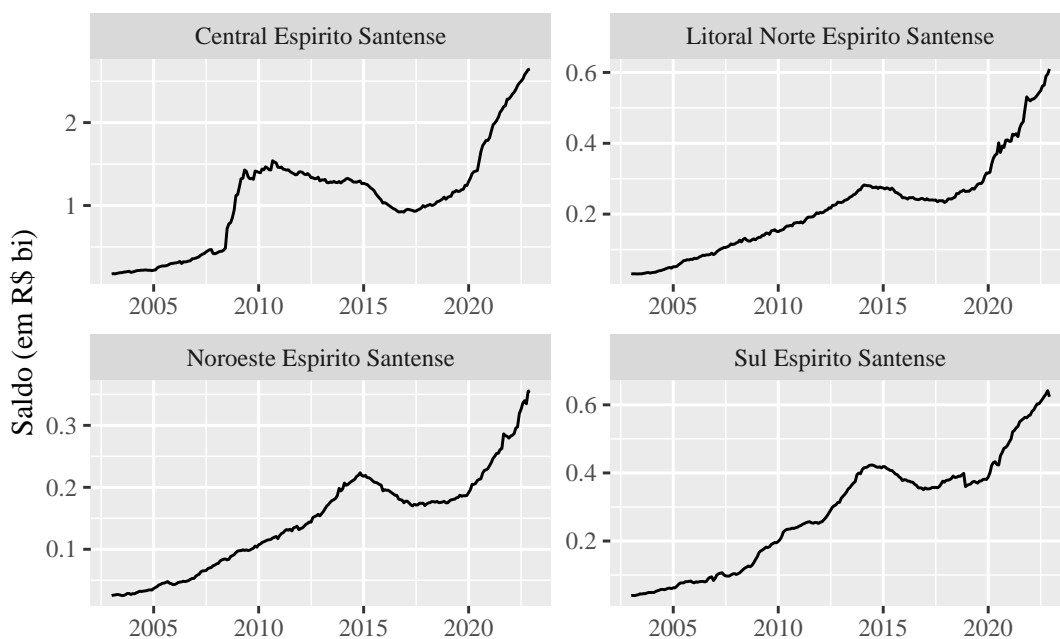


Figura 15 – Séries temporais do agregado de crédito do Banestes por mesorregião do ES

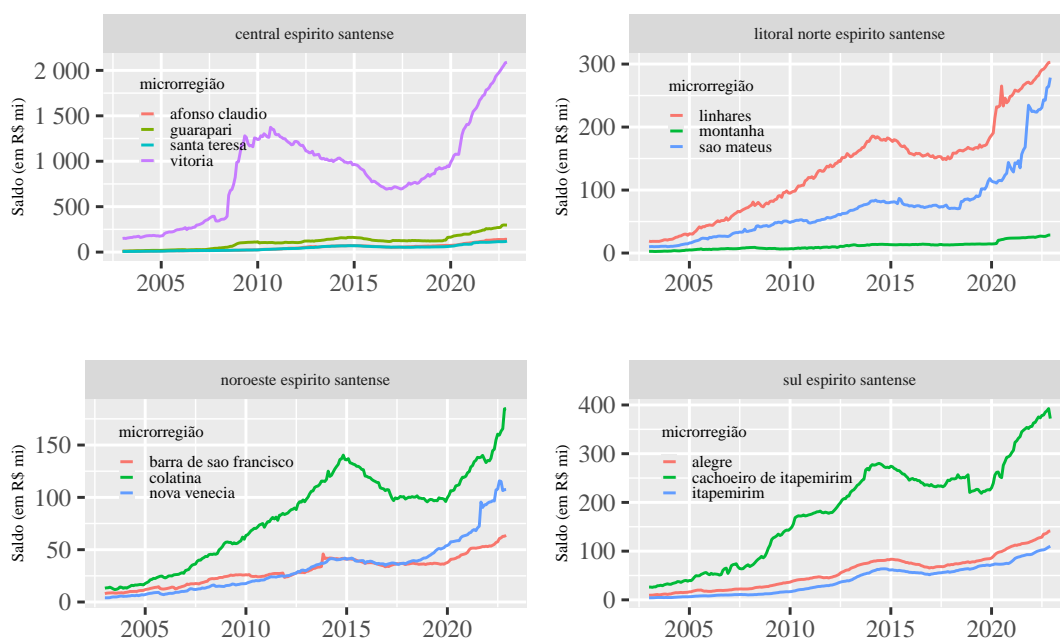


Figura 16 – Séries temporais do agregado de crédito do Banestes por microrregião do ES

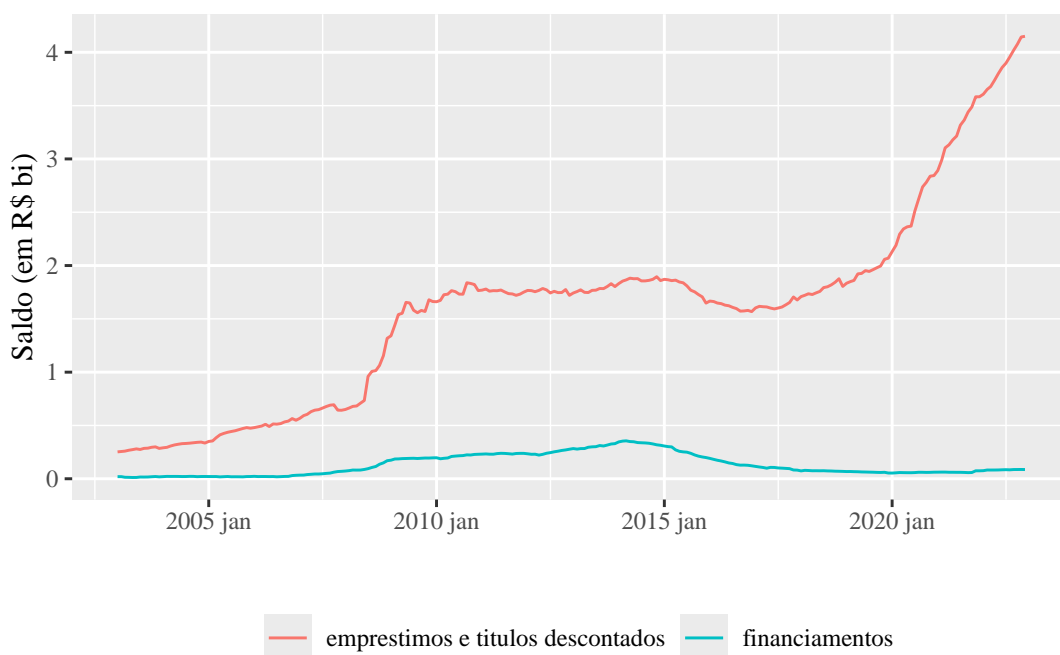


Figura 17 – Séries temporais dos verbetes no agregado do ES

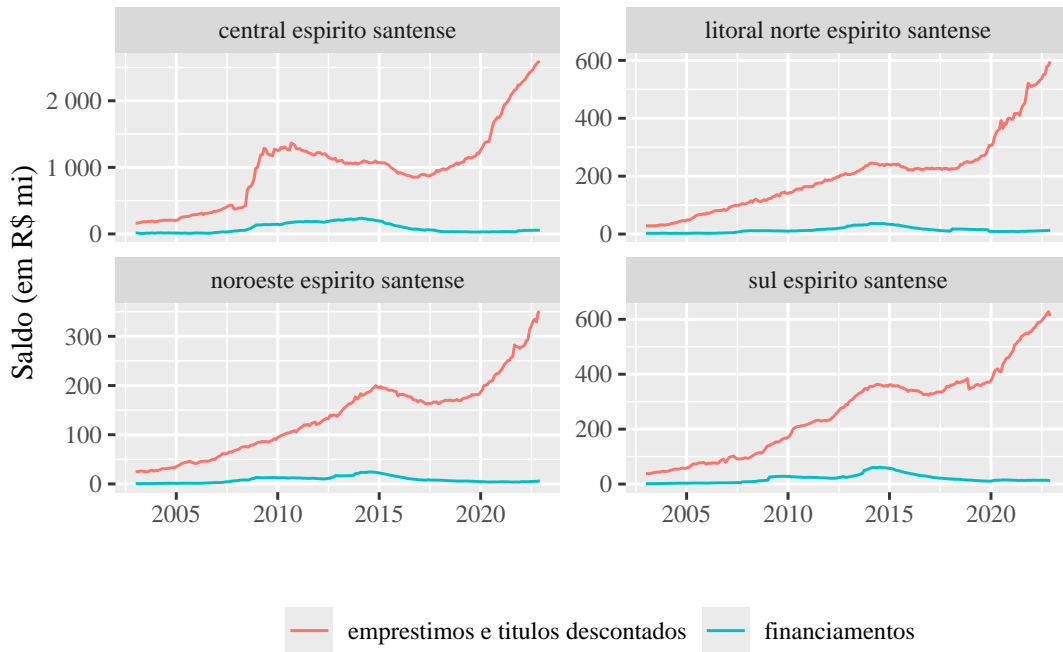


Figura 18 – Séries temporais dos verbetes por mesorregião do ES

Em relação às previsões base, uma vez que o foco deste trabalho está no incremento de performance proporcionado pela reconciliação ótima sobre um conjunto de previsões individuais para fora da amostra e não na qualidade destas, elas foram obtidas por meio de métodos simples para previsão de séries temporais, especificamente o algoritmo de Hyndman-Koehler-Snyder-Große para suavização exponencial (ETS) (HYNDMAN; KOEHLER et al., 2002). Esses métodos são amplamente utilizados na literatura de séries temporais e, portanto, servem como *benchmark* para a avaliação dos métodos de reconciliação ótima.

Os modelos de previsão base foram treinados com dados de 2003 a 2021 e as previsões h passos à frente foram realizadas para o ano de 2022, com $h = \{1, 2, 3, \dots, 12\}$ (Figura 5). Para verificar a qualidade básica do ajuste, foram realizados testes de Ljung-Box para os resíduos das previsões. Considerando nível de significância de $\alpha = 0.05$ e 12 defasagens, cerca de 80% dos modelos não rejeitam a hipótese nula de que os resíduos são decorrelacionados. Isso sugere que os modelos de previsão base são, em sua maior parte, adequados para o propósito deste trabalho.

Tabela 4 – Resultados do teste de Ljung-box para as previsões base ($\alpha = 0.05$)

Resultado	Proporção
não rejeita	0.795
rejeita	0.205

O *software* usado foi o R (R CORE TEAM, 2023). As previsões base, as previsões hierárquicas de nível único e a reconciliação ótima através da MinT foram realizadas com os pacotes {fable} (O'HARA-WILD; HYNDMAN; WANG, 2024a) e {fabletools} (O'HARA-WILD; HYNDMAN; WANG, 2024b). Já metodologia de *machine learning* (reamostragem,

otimização de hiperparâmetros, treino e predição) foi executada com o pacote {mlr3} (LANG et al., 2024) e suas extensões. As implementações do XGB e LGBM utilizadas foram as de seus pacotes homônimos {xgboost} (CHEN; HE et al., 2024) e {lighthgbm} (SHI et al., 2024). Para as configurações de *Elastic Net* foi utilizado o pacote {glmnet} (FRIEDMAN et al., 2023). Já para os métodos de RF e SVM foram usados os pacotes {ranger} (WRIGHT; WAGER; PROBST, 2023) e {e1071} (MEYER et al., 2023), respectivamente.

Boa parte dos métodos de ML são altamente parametrizáveis, sendo sua performance de generalização sensível à escolha de seus hiperparâmetros. Para os métodos avaliados neste trabalho, os conjuntos de hiperparâmetros a serem otimizados e seus respectivos espaços de busca são apresentados no Apêndice C, de acordo com a recomendação em Bischl, Binder et al. (2021).

Para a otimização, foram utilizadas dois calibradores: (i) busca em grade, com resolução de 10 combinações, mais custoso em tempo de processamento, para os métodos de menor quantidade de hiperparâmetros a serem otimizados; e (ii) otimização bayesiana, na configuração padrão do pacote {mlr3MBO} (SCHNEIDER et al., 2024), mais eficiente para os métodos com maior quantidade de hiperparâmetros. As estratégias de amostragem utilizadas foram a validação cruzada k -fold aleatória e a k -fold com origem móvel, ambas com $k = 10$. Para a segunda, utilizou-se janela mínima de 5 anos e $|\Omega^b| = 12$, compatível com o horizonte de previsão para o experimento.

A otimização bayesiana foi usada em todos os métodos, exceto no *elastic net*, uma vez que apenas um (no caso do *Lasso* e *ridge*) ou dois hiperparâmetros foram otimizados. A medida de performance utilizada para a otimização foi a raiz do erro quadrático médio (*root mean squared error* — RMSE).

Por fim, cada modelo foi calibrado individualmente, ou seja, cada série y_m possui um conjunto de hiperparâmetros otimizados para cada um dos 7 métodos de ML empregados para combinação ótima.

4.4 Resultados

As tabelas a seguir apresentam os resultados obtidos para o experimento. As métricas utilizadas foram a Raiz do Erro Médio Escalado Quadrático (*Root Mean Squared Scaled Error* — RMSSE) e o erro médio escalado absoluto (*Mean Absolute Scaled Error* — MASE), que permitem a comparação independentemente da escala — essencial no contexto de previsão hierárquica, onde a agregação torna natural a diferença de escala.

A Tabela 5 contém as medidas de acurácia RMSSE e MASE para os métodos analíticos de reconciliação ótima BU e MinT, e para as previsões base, ou seja, sem aplicar qualquer método de reconciliação. A primeira coluna especifica o método utilizado, enquanto as demais colunas apresentam a média da performance em cada nível de agregação.

As Tabela 6, Tabela 8 e Tabela 10 reportam as medidas de acurácia para os métodos de reconciliação ótima baseados em ML utilizando validação cruzada aleatória, enquanto as Tabela 7, Tabela 9 e Tabela 11 exibem os resultado para validação cruzada com origem móvel. Já as Tabela 12 e Tabela 13 reportam o tempo de processamento para as etapas de calibragem, treino e predição desses métodos²².

Em geral, os métodos baseados em árvore, além de requererem maior tempo de processamento devido a sua complexidade no espaço de hiperparâmetros, também tenderam a perder qualidade conforme suas previsões são agregadas para formação dos níveis superiores da hierarquia. Contrariamente, os métodos de regressão regularizada se mostraram mais robustos à agregação.

Nas tabelas a seguir, **negrito** indica a melhor performance entre os métodos para aquele determinado nível de agregação, e sublinhado indica que aquele método de ML superou o método analítico de melhor performance naquele nível de agregação.

Nos resultados para a base de dados Estban estão incluídas as médias de performance para cada nível hierárquico e agrupado. As colunas “agregado”, “mesorregiao”, “microrregiao”, “município” e “agencia”, fazem referência à estrutura hierárquica, ou seja, tratam o verbete de forma agregada. Já as colunas “verbeta”, “bottom” e “hierarquia”, incluem também a estrutura agrupada, tratando o verbete de forma desagregada. Detalhadamente:

- Agregado: performance do método para a série que representa o total, com os verbetes agregados, (Figura 14).
- Mesorregião: a média das performances do método para as séries do agregado de cada mesorregião, com os verbetes agregados (Figura 15).
- Microrregião: a média das performances do método para as séries do agregado de cada microrregião, com os verbetes agregados (Figura 16).
- Município: a média das performances do método para as séries do agregado de cada município, com os verbetes agregados.
- Agência: a média das performances do método para as séries de cada agência, com os verbetes agregados.
- Verbeta: a média das performances do método para as séries de cada verbete, para o total da hierarquia (Figura 17).
- Bottom: a média das performances do método para as séries do nível mais desagregado, ou seja, verbete por agência.
- Hierarquia: a média das performances do método para todas as séries, agregadas e desagregadas.

²² Os métodos analíticos não tiveram seu tempo de processamento medidos porque executam quase que instantaneamente, já sinalizando uma vantagem para esses métodos.

Tabela 5 – Resultados Estban: Acurácia dos métodos analíticos de reconciliação

.model	agregado	mesorregiao	microrregiao	municipio	agencia	verbete	bottom	hierarquia
RMSSE								
base	0.197	0.690	0.846	0.671	0.717	0.183	0.656	0.657
bu	0.196	0.561	0.706	0.710	0.739	0.185	0.656	0.663
mint	0.172	0.619	0.722	0.689	0.712	0.140	0.634	0.641
MASE								
base	0.278	0.818	0.998	0.790	0.886	0.250	0.883	0.847
bu	0.240	0.572	0.771	0.820	0.895	0.221	0.883	0.844
mint	0.224	0.692	0.865	0.830	0.891	0.164	0.864	0.837

Tabela 6 – Resultados Estban: Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia *rolling forecast* + validação cruzada aleatória

modelo	agregado	mesorregiao	microrregiao	municipio	agencia	verbete	bottom	hierarquia
RMSSE								
elastic net	0.280	0.763	1.178	1.211	1.251	0.770	1.062	1.094
lasso	0.196	0.726	1.054	0.995	1.043	0.501	0.839	0.882
lightgbm	1.407	1.628	1.530	1.294	1.322	0.883	0.972	1.095
random forest	1.227	1.397	1.303	1.118	1.171	0.725	0.858	0.949
ridge	0.416	0.776	1.131	1.511	1.535	0.919	1.357	1.368
svm	0.262	0.745	0.858	0.853	0.911	0.234	0.847	0.838
xgb	1.186	1.405	1.296	1.096	1.139	0.700	0.830	0.924
MASE								
elastic net	0.234	0.726	1.406	1.491	1.582	0.949	1.439	1.428
lasso	0.166	0.714	1.250	1.193	1.298	0.641	1.142	1.147
lightgbm	1.890	1.896	1.874	1.600	1.654	1.234	1.390	1.478
random forest	1.615	1.560	1.501	1.332	1.423	0.996	1.097	1.177
ridge	0.402	0.757	1.315	1.800	1.881	1.090	1.790	1.738
svm	0.306	0.684	0.862	0.991	1.108	0.290	1.251	1.143
xgb	1.542	1.564	1.479	1.297	1.373	0.948	1.022	1.115

Tabela 7 – Resultados Estban: Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia *rolling forecast* + validação cruzada com origem móvel

modelo	agregado	mesorregiao	microrregiao	municipio	agencia	verbete	bottom	hierarquia
RMSSE								
elastic net	0.272	0.636	1.107	1.282	1.346	0.711	1.105	1.137
lasso	0.278	0.724	1.001	0.979	1.035	0.644	0.837	0.875
lightgbm	1.339	1.460	1.375	1.158	1.208	0.916	0.939	1.025
random forest	1.362	1.522	1.377	1.144	1.197	0.798	0.875	0.974
ridge	0.458	0.756	1.159	1.551	1.569	0.913	1.406	1.410
svm	1.727	1.766	1.663	1.714	1.755	0.981	1.353	1.463
xgb	1.246	1.489	1.336	1.114	1.156	0.847	0.849	0.951
MASE								
elastic net	0.224	0.615	1.334	1.557	1.682	0.856	1.469	1.464
lasso	0.209	0.704	1.165	1.171	1.286	0.769	1.139	1.135
lightgbm	1.784	1.642	1.609	1.401	1.489	1.269	1.286	1.335
random forest	1.831	1.757	1.636	1.379	1.471	1.117	1.130	1.222
ridge	0.456	0.738	1.372	1.858	1.931	1.084	1.855	1.795
svm	2.507	2.202	2.081	2.214	2.344	1.476	1.996	2.052
xgb	1.631	1.671	1.529	1.323	1.394	1.156	1.043	1.149

Tabela 8 – Resultados Estban: Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia *fitted values* + validação cruzada aleatória

modelo	agregado	mesorregiao	microrregiao	municipio	agencia	verbete	bottom	hierarquia
RMSSE								
elastic net	0.777	0.986	1.086	1.038	1.149	0.579	0.924	0.961
lasso	0.661	0.955	1.074	0.909	1.008	0.530	0.826	0.862
lightgbm	1.495	1.649	1.557	1.300	1.342	0.923	0.999	1.116
random forest	1.204	1.397	1.294	1.098	1.150	0.694	0.839	0.930
ridge	1.001	1.146	1.247	1.208	1.327	0.689	1.125	1.147
svm	0.395	0.929	0.928	0.934	0.961	0.319	0.905	0.898
xgb	1.196	1.373	1.282	1.084	1.133	0.699	0.824	0.916
MASE								
elastic net	1.049	1.143	1.317	1.268	1.451	0.795	1.290	1.284
lasso	0.894	1.087	1.319	1.114	1.276	0.728	1.167	1.162
lightgbm	2.027	1.931	1.906	1.610	1.683	1.302	1.433	1.512
random forest	1.576	1.557	1.488	1.311	1.397	0.947	1.043	1.132
ridge	1.338	1.350	1.549	1.501	1.696	0.935	1.584	1.551
svm	0.445	0.947	1.080	1.163	1.226	0.341	1.282	1.217
xgb	1.545	1.509	1.476	1.293	1.375	0.942	1.017	1.109

Tabela 9 – Resultados Estban: Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia *fitted values* + validação cruzada com origem móvel

modelo	agregado	mesorregiao	microrregiao	municipio	agencia	verbete	bottom	hierarquia
RMSSE								
elastic net	0.873	1.108	1.146	0.984	1.082	0.582	0.909	0.942
lasso	0.788	1.006	1.169	0.948	1.053	0.575	0.842	0.890
lightgbm	1.515	1.632	1.543	1.307	1.347	0.956	1.010	1.126
random forest	1.217	1.462	1.343	1.139	1.179	0.723	0.863	0.961
ridge	0.990	1.127	1.223	1.196	1.317	0.687	1.123	1.143
svm	1.189	1.867	1.882	1.738	1.764	0.889	1.335	1.475
xgb	1.274	1.428	1.341	1.137	1.183	0.856	0.874	0.972
MASE								
elastic net	1.170	1.272	1.423	1.224	1.389	0.799	1.282	1.273
lasso	1.051	1.149	1.448	1.165	1.339	0.788	1.189	1.198
lightgbm	2.064	1.918	1.892	1.619	1.692	1.352	1.393	1.489
random forest	1.598	1.657	1.578	1.368	1.438	0.988	1.112	1.202
ridge	1.320	1.326	1.508	1.489	1.686	0.930	1.580	1.545
svm	1.737	2.287	2.479	2.292	2.412	1.309	1.991	2.100
xgb	1.661	1.596	1.539	1.351	1.426	1.165	1.075	1.177

Tabela 10 – Resultados Estban: Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia *reduced fitted values* + validação cruzada aleatória

modelo	agregado	mesorregiao	microrregiao	municipio	agencia	verbeta	bottom	hierarquia
RMSSE								
elastic net	0.090	0.582	0.730	0.819	0.838	0.164	0.730	0.736
lasso	<u>0.132</u>	<u>0.523</u>	0.766	0.757	0.774	0.187	0.681	0.693
lightgbm	1.406	1.588	1.520	1.281	1.323	0.889	0.971	1.091
random forest	1.248	1.409	1.319	1.119	1.167	0.692	0.857	0.949
ridge	<u>0.141</u>	0.635	0.784	0.902	0.922	0.207	0.841	0.829
svm	0.187	0.743	0.767	0.792	0.834	0.295	0.807	0.792
xgb	1.218	1.347	1.253	1.084	1.140	0.708	0.844	0.927
MASE								
elastic net	0.086	0.584	0.834	0.973	1.008	0.208	0.944	0.922
lasso	<u>0.138</u>	<u>0.520</u>	0.883	0.907	0.933	0.216	0.891	0.878
lightgbm	1.879	1.831	1.832	1.580	1.652	1.236	1.388	1.470
random forest	1.636	1.576	1.526	1.333	1.418	0.947	1.065	1.155
ridge	<u>0.159</u>	0.630	0.894	1.047	1.087	0.231	1.073	1.021
svm	0.225	0.764	0.850	0.949	1.022	0.395	1.176	1.083
xgb	1.593	1.491	1.427	1.293	1.380	0.965	1.064	1.137

Tabela 11 – Resultados Estban: Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia *reduced fitted values* + validação cruzada com origem móvel

modelo	agregado	mesorregiao	microrregiao	municipio	agencia	verbeta	bottom	hierarquia
RMSSE								
elastic net	<u>0.154</u>	0.609	<u>0.682</u>	0.770	0.796	0.189	0.710	0.709
lasso	0.197	0.509	0.665	0.747	0.786	0.217	0.675	0.682
lightgbm	1.577	1.666	1.554	1.265	1.339	0.955	1.018	1.122
random forest	1.273	1.477	1.360	1.157	1.204	0.717	0.879	0.978
ridge	<u>0.142</u>	0.668	0.794	0.916	0.941	0.222	0.861	0.848
svm	1.604	1.755	1.626	1.667	1.655	0.927	1.237	1.378
xgb	1.415	1.660	1.488	1.181	1.228	0.950	0.902	1.015
MASE								
elastic net	<u>0.175</u>	0.619	<u>0.760</u>	0.915	0.953	0.222	0.920	0.889
lasso	0.248	0.519	0.753	0.888	0.940	0.265	0.879	0.859
lightgbm	2.160	1.944	1.862	1.554	1.705	1.360	1.406	1.481
random forest	1.685	1.683	1.610	1.397	1.478	0.991	1.132	1.224
ridge	<u>0.162</u>	0.664	0.895	1.066	1.112	0.259	1.111	1.054
svm	2.316	2.202	2.132	2.162	2.203	1.388	1.821	1.936
xgb	1.884	1.908	1.762	1.424	1.528	1.316	1.135	1.254

Tabela 12 – Resultados Estban: Tempo de processamento dos métodos de ML (em horas). Validação cruzada aleatória

	xgb	random forest	elastic net	lasso	ridge	svm	lightgbm
reduced fitted values	19.235	5.483	1.428	0.879	0.993	1.279	3.290
fitted values	21.758	5.521	1.363	0.829	0.924	1.273	3.341
rolling forecast	20.908	5.429	1.345	0.838	0.929	1.285	3.377

Tabela 13 – Resultados Estban: Tempo de processamento dos métodos de ML (em horas). Validação cruzada com origem móvel

	xgb	random forest	elastic net	lasso	ridge	svm	lightgbm
reduced fitted values	15.795	3.986	1.226	0.745	0.823	0.631	3.177
fitted values	15.170	4.029	1.206	0.698	0.780	0.629	4.365
rolling forecast	13.134	3.593	1.060	0.665	0.737	0.529	2.356

Para a base de dados Estban, não houve uma combinação de método e estratégia que fosse consistentemente melhor ao longo de todos os níveis de agregação. Portanto, a escolha do método e da estratégia a serem utilizados dependerá do objetivo do pesquisador²³.

Para os níveis ao topo da hierarquia, os métodos de ML se mostraram a melhor opção para estimação. No nível agregado, o *elastic net* na estratégia *reduced fitted values* + validação cruzada aleatória (Tabela 10) se mostrou a melhor opção para a estimação do agregado, com 91% de ganho de performance sobre o MinT (Tabela 5), em termos de RMSSE, ou seja, o MinT obteve quase o dobro do erro do *elastic net*. Para os níveis de meso e microrregião, o *elastic net* na configuração *Lasso* e na estratégia *reduced fitted values* + validação cruzada com origem móvel obteve as melhores performances, sendo 10% melhor que BU para mesorregião e 6% melhor que o BU para microrregião (Tabela 11). Por outro lado, tanto nos níveis hierárquicos abaixo, quanto no nível agrupado, os métodos de ML não foram capazes de superar os métodos analíticos.

Os resultados se mostraram bastante sensíveis à estratégia utilizada. Na métrica RMSS, nenhum método utilizando as estratégias *rolling forecast* e *fitted values* foi capaz de superar o MinT em qualquer nível de agregação, enquanto na estratégia *reduced fitted values* os métodos de ML mostraram ganhos de performance nas três configurações do *elastic net* em ao menos um nível de agregação.

Em geral, as medidas RMSSE e MASE se mostraram bastante correlacionadas, com os métodos que obtiveram melhor performance em uma métrica também obtendo melhor performance na outra. A exceção foi para o método *lasso* na estratégia *rolling forecast*, que obteve performance melhor que o MinT, em termos de MASE, para o nível agregado, sendo o único resultado positivo para a estratégia *rolling forecast*.

4.5 Conclusão

Neste estudo de caso, foram apresentados experimentos de reconciliação ótima para séries temporais hierárquicas e agrupadas, utilizando métodos analíticos e de ML com o objetivo de obter coerência e ganhos de acurácia nas previsões de saldos de empréstimos e financiamentos

²³ Se o objetivo é a elaboração de *guidance*, por exemplo, o pesquisador deve preferir o método e estratégia que geram as previsões mais precisas para o nível agregado. Já para elaboração de metas individuais, os níveis individuais ou regionais podem ser preferíveis.

do Banco do Estado do Espírito Santo. Pesquisas anteriores já haviam mostrado que a reconciliação ótima pode trazer ganhos de acurácia, e que métodos de ML podem ser competitivos em relação aos métodos analíticos.

Este trabalho trouxe, além dos métodos de RF e XGB já trabalhados em [Spiliotis et al. \(2021\)](#), o método de regressão regularizada *elastic net*, também em suas configurações *Lasso* e *ridge*, e o SVM, além de avaliar outra implementação de *gradient boosting*, o LGBM. Paralelamente, este trabalho propôs duas estratégias alternativas para aquisição do conjunto de treinamento dos modelos de ML e também avaliou a estratégia de validação cruzada com origem móvel para a tarefa de combinação ótima.

Os resultados obtidos para a base de dados Estban mostraram, primeiramente, que não houve uma combinação de método e estratégia que obtivesse melhor performance de maneira consistente ao longo de todos os níveis hierárquicos. Dessa forma, a escolha do método e da estratégia a serem utilizados dependerá do objetivo do pesquisador. Para os níveis ao topo da hierarquia, a combinação correta de método e estratégia de estimação (*elastic net* + *reduced fitted values*) gerou 91% de ganho de performance no nível mais agregado, o que imputaria a instituição financeira maior precisão para tomada de decisão e planejamento estratégico, além de sinalizar maior confiança nas estimativas comunicadas ao mercado e aos investidores.

Por outro lado, para os níveis inferiores na estrutura hierárquica (municípios e agências), os métodos analíticos se mostraram a melhor escolha. Isto sugere que, com o objetivo de elaboração de metas individuais — seja para as agências ou superintendências regionais —, os métodos analíticos ainda são preferíveis, enquanto para microrregiões, mesorregiões e total, os métodos de ML demonstram maior acurácia.

Os resultados também mostram que o resultado da reconciliação ótima é sensível à estratégia de aquisição do conjunto de treinamento dos modelos de ML. Apenas na estratégia *reduced fitted values*, proposta neste trabalho, que os ganhos de performance foram observados, enquanto nas estratégias *rolling forecast* e *fitted values* os métodos de ML não foram capazes de superar os métodos analíticos. Em relação às estratégias de reamostragem, a validação cruzada com origem móvel se mostrou eficiente para otimização de hiperparâmetros na tarefa de combinação ótima, tendo gerado os modelos mais precisos para os níveis de meso e microrregião.

Contrariamente aos resultados de [Spiliotis et al. \(2021\)](#), as implementações de ML baseadas em árvore de decisão (XGB, RF e LGBM) não foram capazes de superar os métodos analíticos em nenhum nível de agregação.

5 PREVISÕES PARA O TURISMO DOMÉSTICO AUSTRALIANO

5.1 Metodologia

Com o objetivo de avaliar a metodologia proposta em diferentes contextos e compará-la aos trabalhos anteriores, foi realizado um segundo estudo de caso com as bases de dados *overnight trips* e *domestic visitor nights*, ambas relacionadas ao setor de turismo australiano.

A base de dados *overnight trips* consiste na quantidade trimestral de viagens domésticas que duram uma noite na Austrália entre 1998 e 2017. A estrutura é hierárquica e agrupada, composta por 3 níveis hierárquicos — *State* (Estados), *Region* (Regiões) e total —, e agrupado por *Purpose* (Propósito). Essa base de dados foi utilizada em Athanasopoulos, Ahmed e Hyndman (2009) para comparar a performance da combinação ótima contra BU e algumas variações de TD e é também utilizada em Hyndman e Athanasopoulos (2021) como recurso didático no capítulo de previsão hierárquica, onde uma análise exploratória dos dados pode ser encontrada. Esta base de dados está disponível no pacote {tsibble} (WANG et al., 2024).

Para esse estudo de caso, o *benchmark* será composto pelos métodos analíticos de reconciliação BU e MinT, e pelos métodos de ML *elastic net*, *Lasso*, *ridge*, RF, XGB, LGBM e SVM. Serão avaliadas a estratégia *rolling forecast* e as duas propostas neste trabalho, *fitted values* e *reduced fitted values*, com validação cruzada aleatória e com origem móvel.

Os modelos de previsões base, obtidos pelo algoritmo de Hyndman-Koehler-Snyder-Große para ETS, foram treinados com dados entre 1998 a 2015 e as previsões h passos à frente foram realizadas para os anos de 2016 e 2017, com $h = \{1, 2, \dots, 8\}$. Foram realizados testes de Ljung-Box para verificar a presença de autocorrelação nos resíduos das previsões base, com $\alpha = 0.05$. Considerando que 99% das séries não apresentam autocorrelação serial nos resíduos, espera-se que a validação cruzada aleatória seja suficiente para avaliação dos modelos (BERGMEIR; HYNDMAN; KOO, 2018).

Tabela 14 – Resultados do teste de Ljung-box para as previsões base ($\alpha = 0.05$) da base de dados *overnight trips*

Resultado	Proporção
não rejeita	0.986
rejeita	0.014

A base de dados *domestic visitor nights* registra o número total de noites que os visitantes domésticos passam em viagens na Austrália. A estrutura desse dataset é estritamente hierárquica, composta por 4 níveis hierárquicos: *State* (Estados), *Zones* (Zonas), *Region* (Regiões) e total. Essa base de dados foi utilizada em trabalhos como Wickramasuriya, Athanasopoulos e Hyndman (2019), Kourentzes e Athanasopoulos (2019) e Spiliotis et al. (2021). Por brevidade,

dispensa-se a análise exploratória dos dados, que pode ser encontrada nos artigos supracitados.

Por essa base de dados ser estritamente hierárquica, além dos métodos empregados na base *overnight trips*, também será avaliado o método TD por proporções de previsão (ATHANASOPOULOS; AHMED; HYNDMAN, 2009), disponível no pacote {hts} (HYNDMAN; LEE; WANG; WICKRAMASURIYA, 2021). Todas as estratégias supracitadas para a base *overnight trips* serão avaliadas também para essa base de dados.

Os modelos de previsões base foram treinados com dados entre 1998 a 2015 e as previsões h passos à frente foram realizadas para os anos de 2016 e 2017, com $h = \{1, 2, \dots, 12\}$. Para manter alguma semelhança com o experimento de Spiliotis et al. (2021), os modelos foram treinados utilizando o algoritmo de Hyndman-Khandakar para modelagem Arima automática (HYNDMAN; KHANDAKAR, 2008). Assim como na base *overnight trips*, foram realizados testes de Ljung-Box para verificar a presença de autocorrelação nos resíduos das previsões base, com $\alpha = 0.05$. Com cerca de 14% dos modelos apresentando autocorrelação serial nos resíduos, espera-se algum ganho de performance com a validação cruzada com origem móvel.

Tabela 15 – Resultados do teste de Ljung-box para as previsões base ($\alpha = 0.05$) da base de dados *visitor nights*

Resultado	Proporção
não rejeita	0.8648649
rejeita	0.1351351

Para os métodos de ML, foram otimizados o conjunto de hiperparâmetros em seus respectivos espaços de busca informados no Apêndice C. Cada série y_m possui um conjunto de hiperparâmetros otimizados para cada um dos 7 métodos de ML empregados. Para a base de dados *overnight trips*, de dados trimestrais, a estratégia de reamostragem por validação cruzada com origem móvel contou com $|\Omega^a| \geq 12$ e $|\Omega^b| = 4$, ou seja, janela mínima de 12 observações (3 anos) e horizonte de 4 observações (1 ano). Já para a base de dados *domestic visitor nights*, de dados mensais, a estratégia de reamostragem contou com $|\Omega^a| \geq 60$ e $|\Omega^b| = 12$. Demais pontos em relação a *softwares* e configurações utilizadas seguem os mesmos padrões da seção Section 4.3.

5.2 Resultados e discussão

Primeiramente, para a base de dados *overnight trips*, a tabela Tabela 16 contém as medidas RMSSE e MASE para os métodos analíticos de reconciliação, BU e MinT, e para as previsões base, ou seja, sem aplicar qualquer método de reconciliação. A primeira coluna especifica o método utilizado, enquanto as demais colunas apresentam a média da performance em cada nível de agregação.

As Tabela 17, Tabela 19 e Tabela 21 reportam as medidas de acurácia para os métodos de reconciliação ótima baseados em ML utilizando validação cruzada aleatória, enquanto as

Tabela 18, Tabela 20 e Tabela 22 reportam as medidas de acurácia para os métodos de reconciliação ótima baseados em ML utilizando validação cruzada com origem móvel. As Tabela 23 e Tabela 24 apresentam o tempo de processamento dos métodos de ML em horas, para validação cruzada aleatória e com origem móvel, respectivamente.

Para essa base de dados, a aplicação da reconciliação foi capaz de melhorar a qualidade da previsão em relação às previsões base em todos os níveis de agregação, com os métodos de ML alcançando as melhores performances em todos os níveis de agregação, exceto no mais desagregado, onde o MinT obteve a melhor performance. O SVM, na estratégia *rolling forecast* + validação cruzada aleatória, se mostrou a melhor combinação dentre os métodos de ML, alcançando 93% de incremento de performance em relação ao MinT, em termos de RMSSE, ou seja, o MinT teve quase o dobro do erro que o SVM.

Tabela 16 – Resultados para *overnight trips*: Acurácia dos métodos analíticos de reconciliação

.model	agregado	state	region	purpose	bottom	hierarquia
RMSSE						
base	1.446	1.260	1.068	1.265	0.925	0.976
bu	2.580	1.634	1.113	2.004	0.925	1.011
mint	1.813	1.296	0.978	1.420	0.876	0.923
MASE						
base	1.533	1.399	1.132	1.330	0.979	1.036
bu	3.164	1.877	1.176	2.323	0.979	1.078
mint	2.086	1.449	1.021	1.512	0.937	0.984

Tabela 17 – Resultados para *overnight trips*: Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia *rolling forecast* + validação cruzada aleatória

modelo	agregado	State	Region	Purpose	bottom	hierarquia
RMSSE						
elastic net	1.990	1.386	1.086	1.541	0.988	1.041
lasso	1.929	1.373	1.100	1.523	1.026	1.069
lightgbm	4.330	2.762	1.651	3.456	1.141	1.354
random forest	2.135	1.365	1.033	1.709	0.908	0.966
ridge	<u>1.256</u>	<u>1.185</u>	1.013	<u>1.202</u>	0.919	0.959
svm	0.940	1.010	1.076	1.011	1.100	1.097
xgb	2.340	1.451	1.114	1.892	0.964	1.031
MASE						
elastic net	2.360	1.572	1.145	1.653	1.058	1.115
lasso	2.264	1.557	1.168	1.593	1.110	1.155
lightgbm	5.505	3.214	1.763	4.060	1.200	1.448
random forest	2.579	1.528	1.073	1.816	0.961	1.020
ridge	<u>1.343</u>	<u>1.309</u>	1.058	<u>1.192</u>	0.981	1.020
svm	1.070	1.096	1.140	1.033	1.178	1.174
xgb	2.888	1.650	1.162	2.118	1.013	1.087

Tabela 18 – Resultados para *overnight trips*: Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia *rolling forecast* + validação cruzada com origem móvel

modelo	agregado	State	Region	Purpose	bottom	hierarquia
RMSSE						
elastic net	2.698	1.633	1.190	2.160	0.997	1.081
lasso	2.596	1.786	1.242	2.111	1.004	1.107
lightgbm	4.330	2.762	1.651	3.456	1.141	1.354
random forest	1.980	1.300	1.021	1.616	0.906	0.958
ridge	2.219	1.525	1.125	1.896	0.933	1.014
svm	2.798	1.798	1.255	2.332	1.001	1.112
xgb	1.785	1.305	1.043	1.472	0.935	0.981
MASE						
elastic net	3.349	1.903	1.270	2.460	1.059	1.157
lasso	3.186	2.098	1.333	2.365	1.065	1.187
lightgbm	5.505	3.214	1.763	4.060	1.200	1.448
random forest	2.363	1.457	1.063	1.711	0.968	1.018
ridge	2.704	1.711	1.169	2.069	0.977	1.065
svm	3.469	2.060	1.333	2.646	1.048	1.179
xgb	2.106	1.482	1.082	1.535	0.991	1.038

Tabela 19 – Resultados para *overnight trips*: Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia *fitted values* + validação cruzada aleatória

modelo	agregado	State	Region	Purpose	bottom	hierarquia
RMSSE						
elastic net	2.166	1.400	1.100	1.771	0.972	1.034
lasso	1.904	1.446	1.093	1.611	0.973	1.034
lightgbm	4.330	2.762	1.651	3.456	1.141	1.354
random forest	2.115	1.361	1.032	1.715	0.907	0.964
ridge	1.568	<u>1.156</u>	0.971	1.292	0.897	0.933
svm	1.495	<u>1.189</u>	1.046	1.383	1.036	1.054
xgb	2.269	1.418	1.100	1.829	0.962	1.023
MASE						
elastic net	2.587	1.570	1.160	1.955	1.035	1.102
lasso	2.212	1.672	1.156	1.729	1.040	1.108
lightgbm	5.505	3.214	1.763	4.060	1.200	1.448
random forest	2.543	1.538	1.073	1.837	0.966	1.024
ridge	1.773	<u>1.290</u>	1.012	<u>1.308</u>	0.960	0.993
svm	1.747	<u>1.304</u>	1.091	1.364	1.097	1.113
xgb	2.790	1.619	1.153	2.041	1.013	1.080

Tabela 20 – Resultados para *overnight trips*: Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia *fitted values* + validação cruzada com origem móvel

modelo	agregado	State	Region	Purpose	bottom	hierarquia
RMSSE						
elastic net	2.568	1.583	1.154	2.081	0.957	1.043
lasso	2.868	1.751	1.196	2.323	0.973	1.074
lightgbm	4.330	2.762	1.651	3.456	1.141	1.354
random forest	1.946	1.301	1.012	1.585	0.908	0.958
ridge	1.739	<u>1.254</u>	1.000	1.473	0.891	0.939
svm	1.900	1.358	1.071	1.620	0.972	1.019
xgb	1.970	<u>1.253</u>	1.027	1.564	0.950	0.989
MASE						
elastic net	3.165	1.819	1.213	2.376	1.003	1.103
lasso	3.561	2.020	1.272	2.674	1.026	1.144
lightgbm	5.505	3.214	1.763	4.060	1.200	1.448
random forest	2.299	1.467	1.060	1.659	0.974	1.021
ridge	2.038	<u>1.363</u>	1.034	1.522	0.941	0.987
svm	2.270	1.495	1.118	1.717	1.022	1.074
xgb	2.361	<u>1.396</u>	1.072	1.651	1.017	1.054

Tabela 21 – Resultados para *overnight trips*: Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia *reduced fitted values* + validação cruzada aleatória

modelo	agregado	State	Region	Purpose	bottom	hierarquia
RMSSE						
elastic net	496.4	449	405.5	510.4	281.6	317.9
lasso	593.1	381	411.8	502.4	309.8	338.5
lightgbm	4.33	2.762	1.651	3.456	1.141	1.354
random forest	2.582	1.55	1.108	2.015	0.9236	1.005
ridge	328.9	282.3	220.1	331	129.9	159.5
svm	5.328e+09	1.378e+10	1.15e+10	1.179e+10	5.643e+09	7.244e+09
xgb	3.14	1.934	1.284	2.441	1.019	1.136
MASE						
elastic net	563.8	521.7	459.7	586.9	324.1	363.4
lasso	656	423.9	460.8	599.1	359.5	388.5
lightgbm	5.505	3.214	1.763	4.06	1.2	1.448
random forest	3.176	1.762	1.167	2.236	0.9756	1.066
ridge	361.5	324.7	248	377.6	147.8	180.7
svm	6.081e+09	1.413e+10	1.08e+10	1.095e+10	5.255e+09	6.82e+09
xgb	3.932	2.265	1.378	2.857	1.072	1.213

Tabela 22 – Resultados para *overnight trips*: Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia *reduced fitted values* + validação cruzada com origem móvel

modelo	agregado	State	Region	Purpose	bottom	hierarquia
RMSSE						
elastic net	369.7	317.8	212.2	289.9	114.1	149.8
lasso	228.1	208.6	153.4	214.1	86.86	109.3
lightgbm	4.33	2.762	1.651	3.456	1.141	1.354
random forest	2.271	1.391	1.059	1.782	0.9128	0.9757
ridge	198.6	153.7	114.7	190.9	68.59	84.28
svm	7.126e+09	5.237e+09	2.84e+09	2.222e+10	2.166e+09	3.026e+09
xgb	2.601	1.584	1.139	1.988	0.9675	1.043
MASE						
elastic net	392.3	380.7	240.4	326.4	131.1	171.9
lasso	252	248.7	172.6	241.8	99.77	125.3
lightgbm	5.505	3.214	1.763	4.06	1.2	1.448
random forest	2.745	1.553	1.108	1.926	0.9731	1.037
ridge	236.1	185	133.8	213.4	79.89	98.34
svm	6.615e+09	5.306e+09	2.562e+09	2.125e+10	2.052e+09	2.878e+09
xgb	3.207	1.838	1.219	2.227	1.03	1.117

Tabela 23 – Resultados para *overnight trips*: Tempo de processamento dos métodos de ML (em horas). Validação cruzada aleatória

	xgb	random forest	elastic net	lasso	ridge	svm	lightgbm
fitted values	15.767	3.687	1.540	1.282	1.371	1.977	3.535
rolling forecast	12.087	2.987	0.957	0.796	1.073	2.035	3.596
reduced fitted values	24.627	15.386	6.006	4.968	5.323	10.474	19.362

Tabela 24 – Resultados para *overnight trips*: Tempo de processamento dos métodos de ML (em horas). Validação cruzada com origem móvel

	xgb	random forest	elastic net	lasso	ridge	svm	lightgbm
fitted values	25.642	9.780	5.085	4.434	4.785	8.247	17.661
rolling forecast	24.744	11.086	6.635	5.530	6.001	10.058	19.867
reduced fitted values	21.455	11.345	5.794	5.069	5.262	8.742	16.653

Em relação à base de dados *visitors night*, a tabela Tabela 25 contém as medidas RMSSE e MASE para os métodos analíticos de reconciliação, BU, TD e MinT, e para as previsões base, ou seja, sem aplicar qualquer método de reconciliação. Como nas demais tabelas, a primeira coluna especifica o método utilizado, enquanto as outras apresentam a média da performance em cada nível de agregação.

As Tabela 26, Tabela 28 e Tabela 30 reportam as medidas de acurácia para os métodos de reconciliação ótima baseados em ML utilizando validação cruzada aleatória, enquanto as Tabela 27, Tabela 29 e Tabela 31 reportam as medidas de acurácia para os métodos de reconciliação ótima baseados em ML utilizando validação cruzada com origem móvel. As Tabela 32 e Tabela 33 apresentam o tempo de processamento dos métodos de ML em horas, para validação cruzada aleatória e com origem móvel, respectivamente.

Para essa base de dados, os métodos de combinação ótima obtiveram a melhor performance em 2 dos 4 níveis hierárquicos, os mais desagregados (*zone* e *region*), enquanto o *top-down* por proporções de previsão foi o método mais preciso nos níveis agregado e *state*. Dentre os métodos de ML, o *elastic net* em sua configuração *ridge*, na estratégia *fitted values* + validação cruzada aleatória, se mostrou a melhor combinação, com 3% de incremento de performance em relação ao MinT no nível *zone* e 2% no nível *region*, também alcanando a melhor média no indicador geral da hierarquia.

Tabela 25 – Resultados para *visitor nights*: Acurácia dos métodos analíticos de reconciliação

.model	agregado	state	zone	region	hierarquia
RMSSE					
base	0.782	0.900	0.932	0.876	0.890
bu	1.749	1.172	0.963	0.876	0.924
mint	1.146	0.911	0.835	0.822	0.834
td	0.782	0.858	0.843	0.836	0.839
MASE					
base	0.788	0.955	1.014	0.949	0.964
bu	1.850	1.278	1.029	0.949	0.997
mint	1.176	0.950	0.902	0.893	0.901
td	0.788	0.881	0.919	0.916	0.913

6 CONCLUSÕES

6.1 Conclusões da dissertação

O rápido crescimento de métodos computacionais e de ML tem permitido a utilização de modelos mais complexos e flexíveis para a previsão hierárquica. Nesse sentido, essa dissertação buscou investigar a aplicação de diversos métodos de ML para a tarefa de reconciliação de previsões incoerentes, com o objetivo de melhorar a acurácia das previsões em diferentes

Tabela 26 – Resultados para *visitor nights*: Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia *rolling forecast* + validação cruzada aleatória

modelo	agregado	State	Zone	Region	hierarquia
RMSSE					
elastic net	1.298	1.037	0.905	0.857	0.884
lasso	1.248	1.015	0.883	0.839	0.865
lightgbm	1.563	1.124	0.933	0.866	0.905
random forest	1.251	0.951	<u>0.828</u>	<u>0.805</u>	<u>0.824</u>
ridge	1.231	0.950	0.838	<u>0.811</u>	<u>0.830</u>
svm	1.478	1.087	0.921	0.856	0.892
xgb	1.427	1.062	0.895	0.846	0.877
MASE					
elastic net	1.396	1.080	0.969	0.924	0.949
lasso	1.322	1.046	0.933	0.903	0.923
lightgbm	1.466	1.124	0.978	0.933	0.961
random forest	1.301	0.986	<u>0.882</u>	<u>0.868</u>	<u>0.883</u>
ridge	1.311	0.994	0.902	<u>0.885</u>	<u>0.899</u>
svm	1.560	1.117	0.979	0.919	0.952
xgb	1.447	1.102	0.950	0.907	0.935

Tabela 27 – Resultados para *visitor nights*: Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia *rolling forecast* + validação cruzada com origem móvel

modelo	agregado	State	Zone	Region	hierarquia
RMSSE					
elastic net	1.347	1.049	0.915	0.849	0.882
lasso	1.309	1.064	0.913	0.851	0.884
lightgbm	1.490	1.095	0.923	0.874	0.906
random forest	1.263	0.967	0.849	<u>0.820</u>	0.840
ridge	1.293	0.967	0.867	0.823	0.847
svm	2.026	1.299	1.028	0.930	0.987
xgb	1.439	1.020	0.877	0.852	0.874
MASE					
elastic net	1.402	1.072	0.965	0.922	0.946
lasso	1.373	1.090	0.957	0.916	0.941
lightgbm	1.383	1.088	0.984	0.950	0.971
random forest	1.310	1.010	<u>0.901</u>	<u>0.888</u>	0.902
ridge	1.361	1.010	0.933	0.893	0.915
svm	2.065	1.364	1.063	0.976	1.031
xgb	1.449	1.056	0.919	0.918	0.932

Tabela 28 – Resultados para *visitor nights*: Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia *fitted values* + validação cruzada aleatória

modelo	agregado	State	Zone	Region	hierarquia
RMSSE					
elastic net	1.285	0.979	0.864	0.830	0.852
lasso	1.097	0.974	0.848	<u>0.819</u>	0.838
lightgbm	1.342	1.037	0.886	0.842	0.869
random forest	1.202	0.931	<u>0.820</u>	<u>0.813</u>	<u>0.826</u>
ridge	1.068	0.906	0.813	0.804	0.815
svm	1.232	0.971	0.859	0.835	0.853
xgb	1.376	0.994	0.857	0.838	0.858
MASE					
elastic net	1.343	1.019	0.923	0.895	0.914
lasso	1.136	0.989	<u>0.888</u>	<u>0.883</u>	<u>0.893</u>
lightgbm	1.249	1.040	0.941	0.916	0.933
random forest	1.207	0.964	<u>0.883</u>	<u>0.879</u>	<u>0.888</u>
ridge	1.120	<u>0.950</u>	0.869	0.875	0.880
svm	1.292	0.999	0.915	0.895	0.910
xgb	1.396	1.025	0.925	0.907	0.924

Tabela 29 – Resultados para *visitor nights*: Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia *fitted values* + validação cruzada com origem móvel

modelo	agregado	State	Zone	Region	hierarquia
RMSSE					
elastic net	1.466	1.059	0.936	0.856	0.894
lasso	1.356	1.059	0.895	0.836	0.869
lightgbm	1.318	1.035	0.899	0.854	0.881
random forest	1.174	0.929	<u>0.824</u>	<u>0.811</u>	<u>0.825</u>
ridge	1.264	0.990	0.859	<u>0.817</u>	0.842
svm	1.174	0.948	0.871	0.862	0.873
xgb	1.469	1.050	0.874	0.837	0.865
MASE					
elastic net	1.497	1.080	0.988	0.925	0.955
lasso	1.395	1.076	0.942	0.898	0.925
lightgbm	1.293	1.074	0.942	0.933	0.948
random forest	1.180	0.963	<u>0.883</u>	<u>0.882</u>	<u>0.890</u>
ridge	1.331	1.041	0.905	<u>0.885</u>	0.904
svm	1.234	0.957	0.926	0.927	0.931
xgb	1.455	1.104	0.918	0.907	0.927

Tabela 30 – Resultados para *visitor nights*: Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia *reduced fitted values* + validação cruzada aleatória

modelo	agregado	State	Zone	Region	hierarquia
RMSSE					
elastic net	7.424e+12	2.628e+12	1.601e+12	7.51e+11	1.136e+12
lasso	1.354	1.086	0.9167	0.8473	0.8838
lightgbm	1.705	1.15	0.9707	0.877	0.9245
random forest	1.232	0.9545	0.8502	0.8424	0.8548
ridge	1.99e+12	2.238e+12	1.728e+12	1.455e+12	1.576e+12
svm	1.717	1.332	1.116	0.9758	1.039
xgb	1.724	1.16	0.9431	0.8713	0.9147
MASE					
elastic net	8.493e+12	2.931e+12	1.81e+12	8.536e+11	1.286e+12
lasso	1.468	1.126	0.9676	0.913	0.9447
lightgbm	1.761	1.219	1.025	0.9422	0.9871
random forest	1.254	1.016	0.9184	0.9151	0.9253
ridge	2.356e+12	2.614e+12	2.046e+12	1.813e+12	1.925e+12
svm	1.96	1.516	1.227	1.092	1.159
xgb	1.821	1.248	1.002	0.9243	0.9716

Tabela 31 – Resultados para *visitor nights*: Acurácia dos métodos de ML de reconciliação, estratégia *reduced fitted values* + validação cruzada com origem móvel

modelo	agregado	State	Zone	Region	hierarquia
RMSSE					
elastic net	3.276e+11	2.182e+11	1.244e+11	8.378e+10	1.043e+11
lasso	1.412	1.114	0.9283	0.8525	0.8925
lightgbm	1.638	1.149	0.9607	0.8736	0.919
random forest	1.206	0.9467	0.8446	0.8335	0.8467
ridge	1.7e+12	1.197e+12	8.537e+11	5.821e+11	6.97e+11
svm	2.015	1.52	1.453	1.239	1.315
xgb	1.718	1.177	0.9591	0.8832	0.9277
MASE					
elastic net	3.796e+11	2.508e+11	1.431e+11	9.793e+10	1.211e+11
lasso	1.497	1.155	0.971	0.9144	0.9486
lightgbm	1.647	1.21	1.023	0.9386	0.9826
random forest	1.219	1.001	0.9186	0.9081	0.9193
ridge	2.117e+12	1.432e+12	1.043e+12	7.482e+11	8.753e+11
svm	2.123	1.559	1.495	1.304	1.374
xgb	1.828	1.229	0.9999	0.9408	0.9813

Tabela 32 – Resultados para *visitor nights*: Tempo de processamento dos métodos de ML (em horas). Validação cruzada aleatória

	xgb	random forest	elastic net	lasso	ridge	svm	lightgbm
fitted values	5.089	1.493	0.315	0.236	0.235	2.439	1.353
rolling forecast	5.585	1.645	0.260	0.253	0.294	1.746	1.374
reduced fitted values	4.910	1.453	0.283	0.222	0.221	6.395	1.343

Tabela 33 – Resultados para *visitor nights*: Tempo de processamento dos métodos de ML (em horas). Validação cruzada com origem móvel

	xgb	random forest	elastic net	lasso	ridge	svm	lightgbm
fitted values	4.287	1.109	0.329	0.261	0.258	1.034	1.551
rolling forecast	4.761	1.117	0.294	0.230	0.231	0.237	1.143
reduced fitted values	4.128	1.027	0.305	0.252	0.247	1.173	1.178

níveis de agregação. Em adição à exploração desses diferentes métodos, a dissertação também contribuiu com elementos para a metodologia de combinação ótima, oferecendo estratégias para aquisição do conjunto de treinamento, bem como a utilização de validação cruzada com origem móvel na otimização dos hiperparâmetros dos modelos de ML. Essas contribuições foram colocadas a teste em três estudos de caso, um em economia bancária e os demais em bases de dados amplamente utilizadas na literatura de referência, onde puderam ser observado o sucesso das metodologias propostas.

Seguindo um capítulo introdutório, o capítulo 2 revisou os fundamentos de séries temporais hierárquicas e agrupadas, detalhando seus conceitos e álgebra matricial. Foram cobertas as principais abordagens de previsão hierárquica de nível único: a *bottom-up*, as três principais técnicas de *top-down* e o conceito de *middle-out*. Em seguida, foram apresentados os conceitos de coerência e reconciliação a partir da lógica algébrica, assim como a dedução do método de reconciliação ótima por meio de minimização do traço.

As principais contribuições da dissertação se encontram no capítulo 3. Elas se conectam com a metodologia de reconciliação por combinação ótima discutidas na literatura de referência, [Spiliotis et al. \(2021\)](#). No capítulo, são propostas duas estratégias inéditas para aquisição do conjunto de treinamento dos modelos de ML, denominados de *fitted values* e *reduced fitted values*. Essas estratégias podem favorecer a metodologia tanto em relação à acurácia das previsões reconciliadas quanto ao tempo de processamento, a depender da amostra. Além disso, dadas determinadas circunstâncias, argumenta-se a favor da utilização de validação cruzada com origem móvel na otimização dos hiperparâmetros dos modelos de ML.

No capítulo 4, é realizado um estudo de caso no tópico de economia bancária, com dados de empréstimos e financiamentos do Banco do Estado do Espírito Santo. No estudo, foi possível perceber ganhos de acurácia com a metodologia proposta no capítulo 3, com a estratégia *reduced fitted values* obtendo a melhor performance no nível agregado e sua combinação com a validação

cruzada com origem móvel gerando a melhor performance nos níveis de meso e microrregião.

Nesse estudo de caso, foram empregados, além do XGB e RF, já utilizados na literatura de combinação ótima, os métodos de ML *elastic net*, em suas configurações *lasso*, *ridge* e *elastic net*, e os métodos SVM e LGBM. Os resultados demonstraram que a aplicação de métodos de reconciliação ótima aumentaram a precisão das previsões em quase todos os níveis hierárquicos, com exceção do nível municipal. Esse resultado vai ao encontro da literatura e já havia sido apontado em [Athanasopoulos, Hyndman, Kourentzes e Panagiotelis \(2023\)](#), que chama atenção para o fato de que na maior parte dos trabalhos empíricos não é observada melhoria em *todos* os níveis hierárquicos. Não obstante, os ganhos nos demais níveis hierárquicos foram significativos, especialmente nos níveis mais agregados, com destaque para os métodos de ML propostos neste trabalho. Ao contrário dos resultados de [Spiliotis et al. \(2021\)](#), os métodos baseados em árvore de decisão (XGB, RF e LGBM) não superaram o MinT em nenhum nível hierárquico. Já os métodos de regressão regularizada, obtiveram resultados expressivos, com o *elastic net* na estratégia *reduced fitted values* + validação cruzada aleatória alcançando 91% de ganho de acurácia no nível agregado em relação ao método analítico de melhor performance, enquanto o *Lasso* na estratégia *reduced fitted values* + validação cruzada com origem móvel foi o método de melhor performance nos níveis de mesorregião e microrregião, também superando o MinT no nível agregado. Nos demais níveis (agência, verbete e *bottom*), o MinT foi o método de melhor performance.

No capítulo 5, com o objetivo de permitir a comparação com trabalhos anteriores, foram realizados dois estudos de caso adicionais, um com a base de dados *overnight trips* e outro com a base de dados *visitor nights*. Para a primeira, o método SVM na abordagem *rolling forecast* + validação cruzada aleatória obteve a melhor performance em 3 dos 5 níveis, com os dois níveis restantes liderados pelo *ridge* na estratégia *fitted values* + validação cruzada aleatória e MinT. Já na base *visitor nights*, a estratégia *fitted values* + validação cruzada aleatória foi a que obteve os melhores resultados, quando aplicada ao método *elastic net* em sua configuração *ridge*.

6.2 Pesquisa futura

Coincidentemente, cada estudo de caso dentre os três apresentados contaram com uma combinação de método e estratégia diferente como metodologia vencedora. Para pesquisas futuras, pode-se investigar se a performance dos diferentes métodos e estratégias estão relacionadas às características das séries temporais, por exemplo:

- Existem características específicas das séries temporais que favorecem o uso de métodos de ML em níveis agregados ou desagregados?
- Existe motivo teórico para que os métodos de ML baseados em árvore de decisão não tenham superado os demais em nenhum nível hierárquico?

- Os efeitos do ruído de previsão: se os diferentes métodos e estratégias exibem aumento ou deterioração de performance quando as previsões individuais são mais ou menos ruidosas (i.e. se a variância do erro das previsões individuais é maior ou menor).
- Os efeitos de correlação entre as séries: se os métodos e estratégias exibem aumento ou deterioração de performance quando as séries temporais no menor nível hierárquico são mais ou menos correlacionadas.
- Os efeitos de componentes sazonais: se os métodos e estratégias exibem aumento ou deterioração de performance quando as séries temporais do menor nível hierárquico possuem ou não componentes sazonais.
- Os efeitos do tamanho da hierarquia: verificar se os métodos e estratégias exibem aumento ou deterioração de performance quando a hierarquia é mais ou menos profunda (i.e. possui mais ou menos níveis hierárquicos).

REFERÊNCIAS

- ATHANASOPOULOS, G.; AHMED, R. A.; HYNDMAN, R. J. Hierarchical forecasts for Australian domestic tourism. **International Journal of Forecasting**, v. 25, n. 1, p. 146–166, 1 jan. 2009. ISSN 0169-2070. DOI: [10.1016/j.ijforecast.2008.07.004](https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2008.07.004). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169207008000691>. Acesso em: 11 jan. 2023. Citado nas pp. 13, 19, 49, 50.
- ATHANASOPOULOS, G.; HYNDMAN, R. J.; KOURENTZES, N.; PANAGIOTELIS, A. Forecast reconciliation: A review, 2023. Citado nas pp. 13, 25, 36, 60.
- ATHANASOPOULOS, G.; HYNDMAN, R. J.; KOURENTZES, N.; PETROPOULOS, F. Forecasting with temporal hierarchies. **European Journal of Operational Research**, v. 262, n. 1, p. 60–74, 1 out. 2017. ISSN 0377-2217. DOI: [10.1016/j.ejor.2017.02.046](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.02.046). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221717301911>. Acesso em: 11 jan. 2023. Citado na p. 26.
- BADER, F. L. C.; KOYAMA, SÉRGIO MIKIO; TSUCHIDA, MARCOS HIROYUKI. Modelo favar canônico para previsão do mercado de crédito. **Banco Central do Brasil**, v. 369, p. 38, nov. 2014. ISSN 1519-1028. Citado na p. 36.
- BANCO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. **Demonstrações Financeiras**. Vitória, 2022. Disponível em: https://www.banestes.com.br/ri/arquivos/informacoes/demoFinanceiras/2022_2S_demonFinanceiras.pdf. Acesso em: 4 jun. 2023. Citado na p. 35.
- BECCALLI, E. et al. Earnings management, forecast guidance and the banking crisis. **The European Journal of Finance**, v. 21, n. 3, p. 242–268, 19 fev. 2015. ISSN 1351-847X. DOI: [10.1080/1351847X.2013.809548](https://doi.org/10.1080/1351847X.2013.809548). Disponível em: <https://doi.org/10.1080/1351847X.2013.809548>. Acesso em: 7 mai. 2023. Citado na p. 34.
- BERGMEIR, C.; BENÍTEZ, J. M. On the use of cross-validation for time series predictor evaluation. **Information Sciences**, v. 191, p. 192–213, 15 mai. 2012. ISSN 0020-0255. DOI: [10.1016/j.ins.2011.12.028](https://doi.org/10.1016/j.ins.2011.12.028). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025511006773>. Acesso em: 30 mai. 2023. Citado na p. 32.
- BERGMEIR, C.; HYNDMAN, R. J.; KOO, B. A note on the validity of cross-validation for evaluating autoregressive time series prediction. **Computational Statistics & Data Analysis**, v. 120, p. 70–83, abr. 2018. ISSN 01679473. DOI: [10.1016/j.csda.2017.11.003](https://doi.org/10.1016/j.csda.2017.11.003). Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167947317302384>. Acesso em: 28 mai. 2023. Citado nas pp. 33, 49.

BISCHL, B.; MERSMANN, O. et al. Resampling Methods for Meta-Model Validation with Recommendations for Evolutionary Computation. **Evolutionary Computation**, v. 20, n. 2, p. 249–275, jun. 2012. Conference Name: Evolutionary Computation. ISSN 1063-6560. DOI: [10.1162/EVCO_a_00069](https://doi.org/10.1162/EVCO_a_00069). Citado na p. 31.

BISCHL, B.; BINDER, M. et al. **Hyperparameter Optimization: Foundations, Algorithms, Best Practices and Open Challenges**. [S.l.]: arXiv, 24 nov. 2021. DOI: [10.48550/arXiv.2107.05847](https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.05847). arXiv: [2107.05847\[cs,stat\]](https://arxiv.org/abs/2107.05847). Disponível em: <http://arxiv.org/abs/2107.05847>. Acesso em: 4 set. 2023. Citado na p. 42.

BRASIL. **Lei nº 7.492, de 16 de junho de 1986**. Brasília, DF: Presidência da República, 18 jun. 1986. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/17492.htm. Citado na p. 34.

CHEN, T.; GUESTRIN, C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. In: PROCEEDINGS of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 13 ago. 2016. (KDD '16), p. 785–794. ISBN 978-1-4503-4232-2. DOI: [10.1145/2939672.2939785](https://doi.org/10.1145/2939672.2939785). Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2939672.2939785>. Acesso em: 23 jan. 2024. Citado na p. 73.

CHEN, T.; HE, T. et al. **xgboost: Extreme Gradient Boosting**. [S.l.], 2024. R package version 1.7.7.1. Disponível em: <https://github.com/dmlc/xgboost>. Citado na p. 42.

ÇOLAK, M. S. et al. **TCMB - Monitoring and Forecasting Cyclical Dynamics in Bank Credits: Evidence from Turkish Banking Sector**. Ankara, Turquia, 2019. Disponível em: <https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/EN/TCMB+EN/Main+Menu/Publications/Research/Working+Papers/2019/19-29>. Acesso em: 6 mar. 2023. Citado na p. 36.

CONSELHO MONETÁRIO NACIONAL. **Resolução nº 2.099, de 17 de agosto de 1994**. Brasília, DF: Banco Central do Brasil, 17 ago. 1994. Disponível em: https://www.bcb.gov.br/pre/normativos/res/1994/pdf/res_2099_v1_O.pdf. Citado na p. 35.

_____. **Resolução nº 2.682, de 21 de dezembro de 1999**. Brasília, DF: Banco Central do Brasil, 21 dez. 1999. Disponível em: https://www.bcb.gov.br/pre/normativos/res/1999/pdf/res_2682_v2_L.pdf. Citado na p. 37.

DAHIS, R. et al. Data Basis (Base Dos Dados): Universalizing Access to High-Quality Data. **SSRN Electronic Journal**, 2022. ISSN 1556-5068. DOI: [10.2139/ssrn.4157813](https://doi.org/10.2139/ssrn.4157813). Disponível em: <https://www.ssrn.com/abstract=4157813>. Acesso em: 18 jun. 2023. Citado na p. 36.

FRIEDMAN, J. et al. **glmnet: Lasso and Elastic-Net Regularized Generalized Linear Models**. [S.l.], 2023. R package version 4.1-8. Disponível em: <https://glmnet.stanford.edu>. Citado na p. 42.

GORODETSKAYA, O.; GOBAREVA, Y.; KOROTEEV, M. A Machine Learning Pipeline for Forecasting Time Series in the Banking Sector. **Economies**, v. 9, n. 4, p. 205, dez. 2021. Number: 4 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. ISSN 2227-7099. DOI: [10.3390/economies9040205](https://doi.org/10.3390/economies9040205). Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-7099/9/4/205>. Acesso em: 27 fev. 2023. Citado na p. 36.

GROSS, C. W.; SOHL, J. E. Disaggregation methods to expedite product line forecasting. **Journal of Forecasting**, v. 9, n. 3, p. 233–254, 1990. ISSN 1099-131X. DOI: [10.1002/for.3980090304](https://doi.org/10.1002/for.3980090304). Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/for.3980090304>. Acesso em: 18 jun. 2023. Citado nas pp. 13, 19.

HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J. **The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction, Second Edition**. 2nd 2009, Corr. 9th Printing 2017 ed. edição. New York, NY: Springer, 1 fev. 2009. ISBN 978-0-387-84857-0. Citado nas pp. 73, 75, 76.

HYNDMAN, R.; ATHANASOPOULOS, G. **Forecasting: principles and practice**. 3. ed. Melbourne, Austrália: OTexts, 2021. Disponível em: <https://otexts.com/fpp3/>. Citado nas pp. 13, 16, 18, 19, 49.

HYNDMAN, R.; LEE, A.; WANG, E.; WICKRAMASURIYA, S. **hts: Hierarchical and Grouped Time Series**. [S.l.], 2021. R package version 6.0.2. Disponível em: <https://pkg.euro.me/hts/>. Citado na p. 50.

HYNDMAN, R. J.; KOEHLER, A. B. et al. A state space framework for automatic forecasting using exponential smoothing methods. **International Journal of Forecasting**, v. 18, n. 3, p. 439–454, 1 jul. 2002. ISSN 0169-2070. DOI: [10.1016/S0169-2070\(01\)00110-8](https://doi.org/10.1016/S0169-2070(01)00110-8). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169207001001108>. Acesso em: 26 nov. 2023. Citado na p. 41.

HYNDMAN, R. J.; AHMED, R. A. et al. Optimal combination forecasts for hierarchical time series. **Computational Statistics & Data Analysis**, v. 55, n. 9, p. 2579–2589, 1 set. 2011. ISSN 0167-9473. DOI: [10.1016/j.csda.2011.03.006](https://doi.org/10.1016/j.csda.2011.03.006). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167947311000971>. Acesso em: 11 jan. 2023. Citado na p. 23.

HYNDMAN, R. J.; KHANDAKAR, Y. Automatic Time Series Forecasting: The forecast Package for R. en. **Journal of Statistical Software**, v. 27, p. 1–22, jul. 2008. ISSN 1548-7660. DOI: [10.18637/jss.v027.i03](https://doi.org/10.18637/jss.v027.i03). Disponível em: <https://doi.org/10.18637/jss.v027.i03>. Acesso em: 25 mar. 2024. Citado na p. 50.

HYNDMAN, R. J.; LEE, A. J.; WANG, E. Fast computation of reconciled forecasts for hierarchical and grouped time series. **Computational Statistics & Data Analysis**, v. 97, p. 16–32, 1 mai. 2016. ISSN 0167-9473. DOI: [10.1016/j.csda.2015.11.007](https://doi.org/10.1016/j.csda.2015.11.007). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016794731500290X>. Acesso em: 11 jan. 2023. Citado na p. 23.

KE, G. et al. LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree. In: *ADVANCES in Neural Information Processing Systems*. [S.l.]: Curran Associates, Inc., 2017. v. 30. Disponível em: <<https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/hash/6449f44a102fde848669bdd9eb6b76fa-Abstract.html>>. Acesso em: 23 jan. 2024. Citado na p. 73.

KOURENTZES, N.; ATHANASOPOULOS, G. Cross-temporal coherent forecasts for Australian tourism. *Annals of Tourism Research*, v. 75, p. 393–409, 1 mar. 2019. ISSN 0160-7383. DOI: [10.1016/j.annals.2019.02.001](https://doi.org/10.1016/j.annals.2019.02.001). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160738319300167>>. Acesso em: 11 jan. 2023. Citado na p. 49.

LANG, M. et al. **mlr3: Machine Learning in R - Next Generation**. [S.l.], 2024. R package version 0.18.0. Disponível em: <<https://mlr3.mlr-org.com>>. Citado na p. 42.

LI, Z. et al. A Hierarchical Approach Using Machine Learning Methods in Solar Photovoltaic Energy Production Forecasting. *Energies*, v. 9, n. 1, p. 55, jan. 2016. Number: 1 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. ISSN 1996-1073. DOI: [10.3390/en9010055](https://doi.org/10.3390/en9010055). Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/9/1/55>>. Acesso em: 8 abr. 2023. Citado na p. 36.

MEYER, D. et al. **e1071: Misc Functions of the Department of Statistics, Probability Theory Group (Formerly: E1071), TU Wien**. [S.l.: s.n.], 2023. R package version 1.7-14. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=e1071>>. Citado na p. 42.

O'HARA-WILD, M.; HYNDMAN, R.; WANG, E. **fable: Forecasting Models for Tidy Time Series**. [S.l.], 2024. R package version 0.3.4. Disponível em: <<https://fable.tidyverts.org>>. Citado na p. 41.

_____. **fabletools: Core Tools for Packages in the fable Framework**. [S.l.], 2024. R package version 0.4.1. Disponível em: <<https://fabletools.tidyverts.org/>>. Citado na p. 41.

PANAGIOTELIS, A. et al. Forecast reconciliation: A geometric view with new insights on bias correction. *International Journal of Forecasting*, v. 37, n. 1, p. 343–359, 1 jan. 2021. ISSN 0169-2070. DOI: [10.1016/j.ijforecast.2020.06.004](https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2020.06.004). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169207020300911>>. Acesso em: 15 jan. 2023. Citado na p. 25.

PRAYOGA, I.; SUHARTONO, S.; RAHAYU, S. Top-down forecasting for high dimensional currency circulation data of Bank Indonesia. *International Journal of Advances in Soft Computing and its Applications*, v. 9, p. 62–74, 1 jan. 2017. Citado na p. 36.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2023. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Citado na p. 41.

SCHNEIDER, L. et al. **mlr3mbo: Flexible Bayesian Optimization**. [S.l.], 2024. R package version 0.2.2. Disponível em: <<https://mlr3mbo.mlr-org.com>>. Citado na p. 42.

- SEZER, O. B.; GUDELEK, M. U.; OZBAYOGLU, A. M. **Financial Time Series Forecasting with Deep Learning : A Systematic Literature Review: 2005-2019**. Turquia: arXiv, 29 nov. 2019. arXiv: [1911.13288\[cs,q-fin,stat\]](https://arxiv.org/abs/1911.13288). Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1911.13288>. Acesso em: 7 mar. 2023. Citado na p. 36.
- SHI, Y. et al. **lightgbm: Light Gradient Boosting Machine**. [S.l.], 2024. R package version 4.3.0. Disponível em: <https://github.com/Microsoft/LightGBM>. Citado na p. 42.
- SHIRATORI, T.; KOBAYASHI, K.; TAKANO, Y. Prediction of hierarchical time series using structured regularization and its application to artificial neural networks. **PLOS ONE**, v. 15, n. 11, e0242099, 12 nov. 2020. Publisher: Public Library of Science. ISSN 1932-6203. DOI: [10.1371/journal.pone.0242099](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242099). Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0242099>. Acesso em: 18 mar. 2024. Citado na p. 25.
- SPILOTIS, E. et al. Hierarchical forecast reconciliation with machine learning. **Applied Soft Computing**, v. 112, p. 107756, 1 nov. 2021. ISSN 1568-4946. DOI: [10.1016/j.asoc.2021.107756](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107756). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494621006773>. Acesso em: 11 jan. 2023. Citado nas pp. 14, 15, 24–28, 48–50, 59, 60.
- STONE, M. Cross-validation and multinomial prediction. **Biometrika**, v. 61, n. 3, p. 509–515, 1 dez. 1974. ISSN 0006-3444. DOI: [10.1093/biomet/61.3.509](https://doi.org/10.1093/biomet/61.3.509). Disponível em: <https://doi.org/10.1093/biomet/61.3.509>. Acesso em: 28 mai. 2023. Citado na p. 31.
- WALLANDER, J. Budgeting — an unnecessary evil. **Scandinavian Journal of Management**, v. 15, n. 4, p. 405–421, 1 dez. 1999. ISSN 0956-5221. DOI: [10.1016/S0956-5221\(98\)00032-3](https://doi.org/10.1016/S0956-5221(98)00032-3). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956522198000323>. Acesso em: 8 mai. 2023. Citado na p. 34.
- WANG, E. et al. **tsibble: Tidy Temporal Data Frames and Tools**. [S.l.], 2024. R package version 1.1.4. Disponível em: <https://tsibble.tidyverts.org>. Citado na p. 49.
- WICKRAMASURIYA, S. L.; ATHANASOPOULOS, G.; HYNDMAN, R. J. Optimal Forecast Reconciliation for Hierarchical and Grouped Time Series Through Trace Minimization. **Journal of the American Statistical Association**, v. 114, n. 526, p. 804–819, 3 abr. 2019. ISSN 0162-1459, 1537-274X. DOI: [10.1080/01621459.2018.1448825](https://doi.org/10.1080/01621459.2018.1448825). Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01621459.2018.1448825>. Acesso em: 18 jun. 2023. Citado nas pp. 14, 23, 24, 49.
- WRIGHT, M. N.; WAGER, S.; PROBST, P. **ranger: A Fast Implementation of Random Forests**. [S.l.], 2023. R package version 0.16.0. Disponível em: <http://imbs-hl.github.io/ranger/>. Citado na p. 42.
- ZOU, H.; HASTIE, T. Regularization and variable selection via the elastic net. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)**, v. 67, n. 2, p. 301–320, 2005. _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1467-9868.2005.00503.x>. ISSN 1467-

9868. DOI: [10.1111/j.1467-9868.2005.00503.x](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1467-9868.2005.00503.x). Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1467-9868.2005.00503.x>>. Acesso em: 5 jun. 2023. Citado na p. 72.

Apêndices

APÊNDICE A – DEMONSTRAÇÕES

Proposição A.1 (condição de ausência de viés em $\tilde{\mathbf{y}}$). *Se as previsões reconciliadas são não viesadas, então $\mathbf{SGS} = \mathbf{S}$, ou seja, \mathbf{G} é inversa generalizada de \mathbf{S} .*

Demonstração.

$$\tilde{\mathbf{y}}_{t+h|t} = \mathbf{SG}\hat{\mathbf{y}}_{t+h|t} \quad (\text{A.1})$$

Se $\hat{\mathbf{y}}_{t+h|t}$ é não viesado, então

$$\mathbb{E}[\hat{\mathbf{y}}_{t+h|t}] = \mathbb{E}[\mathbf{y}_{t+h|t}] = \mathbf{S}\mathbf{b}_t \quad (\text{A.2})$$

Da mesma forma, se espera-se que as previsões reconciliadas não sejam viesadas,

$$\mathbb{E}[\tilde{\mathbf{y}}_{t+h|t}] = \mathbb{E}[\mathbf{y}_{t+h|t}] = \mathbf{S}\mathbf{b}_t \quad (\text{A.3})$$

Substituindo (A.2) em (A.1), temos

$$\tilde{\mathbf{y}}_{t+h|t} = \mathbf{SGS}\mathbf{b}_t \quad (\text{A.4})$$

Logo, para manter a igualdade entre (A.1) e (A.4), $\mathbf{SGS} = \mathbf{S}$

□

Proposição A.2. $\tilde{\mathbf{e}}_t = \mathbf{SG}\hat{\mathbf{e}}_t$.

Demonstração.

$$\tilde{\mathbf{e}}_{t+h|t} = \mathbf{y}_{t+h} - \tilde{\mathbf{y}}_{t+h|t} \quad (\text{A.5})$$

Substituindo (A.1) em (A.5),

$$\tilde{\mathbf{e}}_{t+h|t} = \mathbf{y}_{t+h} - \mathbf{SG}\hat{\mathbf{y}}_{t+h|t} \quad (\text{A.6})$$

Lembrando que, por definição, $\mathbf{y}_{t+h} = \hat{\mathbf{y}}_{t+h|t} + \hat{\mathbf{e}}_{t+h|t}$, então

$$\tilde{\mathbf{e}}_{t+h|t} = \hat{\mathbf{y}}_{t+h|t} + \hat{\mathbf{e}}_{t+h|t} - \mathbf{SG}\hat{\mathbf{y}}_{t+h|t} \quad (\text{A.7})$$

$$= \hat{\mathbf{e}}_{t+h|t} + \hat{\mathbf{y}}_{t+h|t}(\mathbf{I} - \mathbf{SG}) \quad (\text{A.8})$$

Usando a definição novamente, temos que

$$\tilde{e}_{t+h|t} = \hat{e}_{t+h|t} + (y_{t+h} - \hat{e}_{t+h|t})(I - SG) \quad (\text{A.9})$$

$$= y_{t+h} - SGy_{t+h|t} + SG\hat{e}_{t+h|t} \quad (\text{A.10})$$

$$= y_{t+h}(I - SG) + SG\hat{e}_{t+h|t} \quad (\text{A.11})$$

Substituindo (5) em (A.11), temos

$$\tilde{e}_{t+h|t} = Sb_{t+h}(I - SG) + SG\hat{e}_{t+h|t} \quad (\text{A.12})$$

$$= Sb_{t+h} - Sb_{t+h}SG + SG\hat{e}_{t+h|t} \quad (\text{A.13})$$

$$= Sb_{t+h} - (G'S')(b'_{t+h}S') + SG\hat{e}_{t+h|t} \quad (\text{A.14})$$

$$= Sb_{t+h} - SGSb_{t+h} + SG\hat{e}_{t+h|t} \quad (\text{A.15})$$

Finalmente, pela condição de ausência de viés em \tilde{y} , temos que

$$\tilde{e}_{t+h|t} = Sb_{t+h} - Sb_{t+h} + SG\hat{e}_{t+h|t} \quad (\text{A.16})$$

$$= SG\hat{e}_{t+h|t} \quad (\text{A.17})$$

□

Proposição A.3. $\text{Var}[\tilde{e}_t] = SG\hat{W}G'S'$.

Demonstração. Por A.2, temos que

$$\text{Var}[\tilde{e}] = \mathbb{E}[(SG\hat{e})(SG\hat{e})'] \quad (\text{A.18})$$

$$= \mathbb{E}[SG\hat{e}\hat{e}'G'S'] \quad (\text{A.19})$$

$$= SG\hat{W}G'S' \quad (\text{A.20})$$

Em que \hat{W} é a matriz de variância-covariância dos erros de previsão base. □

Proposição A.4. \hat{W} é posto incompleto.

Demonstração. Pela propriedade do vínculo do posto do produto de matrizes, ou seja, $\text{pos}(AB) \leq \min(\text{pos}(A), \text{pos}(B))$, temos que

$$\text{pos}(SG\hat{e}_{t+h|t}) \leq \min(\text{pos}(S), \text{pos}(G), \text{pos}(\hat{e}_{t+h|t})) \quad (\text{A.21})$$

Como S é a representação matricial de uma estrutura hierárquica, em que os nós pais totalizam os nós filhos, S apresenta, por hipótese, dependência linear e, conseqüentemente, posto incompleto.

Pela equação (A.21), segue que \tilde{e} é posto incompleto. Da mesma forma, $pos(\tilde{e}\tilde{e}') \leq \min(pos(\tilde{e}), pos(\tilde{e}'))$. Portanto, \hat{W} é posto incompleto. \square

APÊNDICE B – MÉTODOS DE MACHINE LEARNING

1 ELASTIC NET

O *elastic net* (ZOU; HASTIE, 2005) é um método de regressão regularizada que combina as normas L_1 e L_2 , as penalidades do *lasso* e do *ridge*, respectivamente. A função objetivo a ser minimizada é dada por

$$L(\lambda_1, \lambda_2, \beta) = |\mathbf{y} - \mathbf{X}\beta|^2 + \lambda_2|\beta|^2 + \lambda_1|\beta|_1 \quad (\text{B.1})$$

em que λ_1 e λ_2 são os parâmetros de regularização e β é o vetor de coeficientes a serem estimados. A solução para essa função objetivo é dada por¹

$$\hat{\beta} = \arg \min_{\beta} |\mathbf{y} - \mathbf{X}\beta|^2, \text{ sujeito a } (1 - \alpha)|\beta|_1 + \alpha|\beta|^2 \leq t \quad (\text{B.2})$$

com $\alpha = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$ e $t \in \mathbb{R}^+$.

A função $(1 - \alpha)|\beta|_1 + \alpha|\beta|^2$ é a penalidade *elastic net*, uma combinação das penalidades *lasso* e *ridge*. O parâmetro α controla a mistura das duas penalidades, incluindo os casos extremos. Note que $\alpha = 0 \implies \lambda_2 = 0$, resultando em uma penalidade exclusivamente *lasso*, enquanto $\alpha = 1 \implies \lambda_1 = 0$, e a penalidade é apenas do tipo *ridge*.

Portanto o *elastic net* é um método de *shrinkage*, uma vez que a penalidade *ridge* reduz o tamanho dos coeficientes, e de *seleção de variáveis*, uma vez que a penalidade *lasso* tende a anular os coeficientes de variáveis irrelevantes. Essas propriedades são desejáveis para a reconciliação de séries temporais, uma vez que a estrutura hierárquica pode conter séries insignificantes para a previsão de outras séries.

Diferentemente dos métodos analíticos estudados, o *elastic net* não possui uma solução fechada. Portanto, é necessário utilizar métodos iterativos para encontrar o valor ótimo de $\hat{\beta}$ e Zou e Hastie (2005) utilizam validação cruzada *k-fold* para encontrar quais os valores de λ_1 e λ_2 que minimizam o resíduo. Nesse sentido, dado a metodologia de processo iterativo envolvendo calibragem de hiperparâmetros e reamostragem, podemos classificar o *elastic net* como um método de *machine learning*.

¹ Sob o valor otimizado ainda é aplicada correção de escala na forma $(1 + \lambda_2)\hat{\beta}$. Ver Zou e Hastie (2005).

2 GRADIENT BOOSTING

Como cada uma das diversas implementações de *gradient boosting* possui sua teoria adjacente, e não é de objetivo deste trabalho detalhar o funcionamento de cada uma delas, trabalharemos apenas sua intuição.

Assim como os métodos de floresta aleatória, os métodos de *gradient boosting* também são métodos de conjuntos de árvores. A diferença se dá na forma como os modelos são treinados. *Gradient boosting* são métodos que combinam as predições de vários modelos fracos para formar um conjunto — *ensemble*, na definição mais usual, ou comitê (*committee*), na definição de [Hastie, Tibshirani e Friedman \(2009\)](#) quando usado para classificação — mais complexo e preciso (forte).

Um estimador fraco é aquele que tem desempenho apenas ligeiramente melhor que o acaso. O propósito do *boosting* é produzir uma sequência de estimadores fracos, cada um deles focado nos erros dos estimadores anteriores. A cada iteração, as observações classificadas incorretamente (no caso de uma tarefa de classificação) ou de maior variância (no caso de uma tarefa de regressão) na iteração anterior têm seu peso aumentado, e vice-versa. Dessa forma, o modelo subsequente formado na próxima iteração é obrigado a se concentrar nas observações onde as iterações anteriores falharam. Isso que significa transformar um conjunto de estimadores fracos em um conjunto forte.

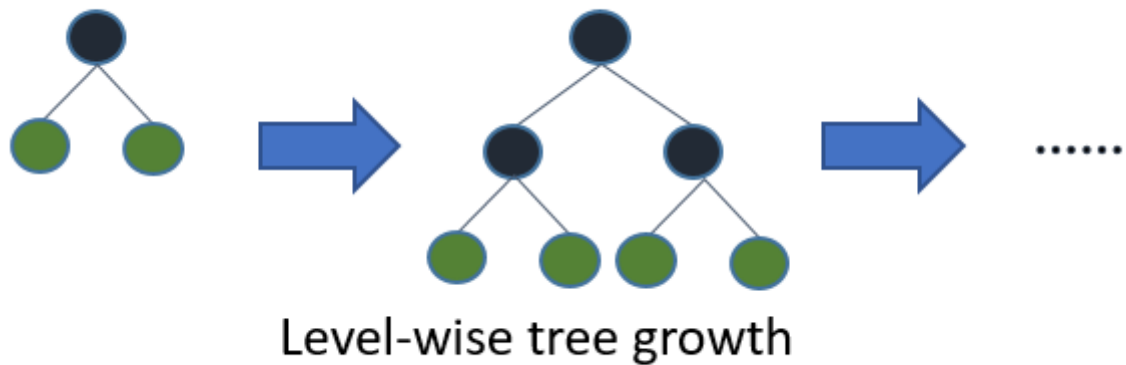
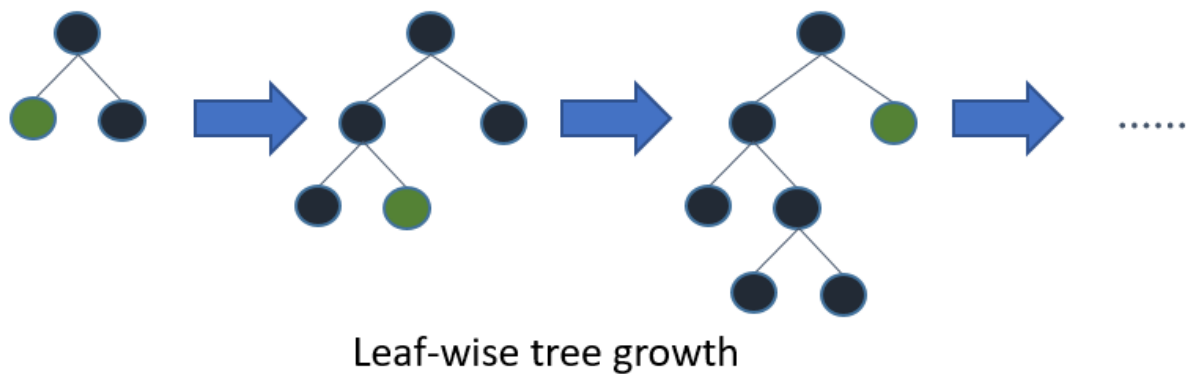
O *gradient boosting* é uma extensão do *boosting* que utiliza o gradiente da função de perda como critério de otimização, de forma que esta se dá na direção em que a função de perda decresce mais rapidamente a cada iteração. Os métodos utilizados neste trabalho são o *XGBoost* ([CHEN; GUESTRIN, 2016](#)) e o *LightGBM* ([KE et al., 2017](#)).

Um das principais diferenças entre os dois métodos é a forma como as árvores são construídas. O *XGBoost* cresce suas árvores de forma *level-wise*, ou seja, cresce todas as folhas do último nível de uma árvore de uma vez, adicionando mais um nível de profundidade completo a cada iteração (Figura 19a). Já o *LightGBM* cresce suas árvores de forma *leaf-wise*, ou seja, cresce uma folha por vez, aprofundando a árvore apenas no nó que resulta na maior variação negativa na função de perda (Figura 19b).

3 RANDOM FOREST

Floresta aleatória é um método de aprendizado de máquina que utiliza conjuntos de árvores de decisão descorrelatadas² para classificação ou regressão. O método consiste em treinar várias árvores de decisão em subconjuntos aleatórios dos dados de treinamento e, então, combinar suas predições ([HASTIE; TIBSHIRANI; FRIEDMAN, 2009](#)). A aleatoriedade é introduzida

² As árvores de decisão são descorrelatadas no sentido que, ao contrário os métodos de *boosting trees*, a próxima árvore não é construída com base na iteração anterior (processo de fortalecimento).

(a) *level-wise*(b) *leaf-wise***Figura 19** – Crescimento de árvores em algoritmos de *boosting*.

de duas formas: na seleção das observações e na seleção das variáveis preditoras.

A intuição para seu algoritmo para regressão é simples e a ideia geral é, para cada árvore de decisão, particionar recursivamente nós de tamanho N em dois nós filhos de forma a aumentar a complexidade do modelo e minimizar a função de custo. Se a próxima partição de um nó resultar em um ou ambos nós filhos de tamanho menor que um mínimo estabelecido via hiperparâmetro, a partição é interrompida (Algoritmo 1).

4 SUPPORT VECTOR MACHINES

A intuição do métodos de SVMs é mais facilmente compreendida a partir de uma tarefa de classificação de duas classes. Nesse caso, o objetivo é encontrar um hiperplano (i.e. um sub-espaço de dimensão $n - 1$) que separe as classes de forma que a margem entre o hiperplano e os pontos de cada classe seja a maior possível. Então, dado um conjunto de N pares de observações e suas respectivas classes, $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N$, em que $x_i \in \mathbb{R}^p$ e $y_i \in \{-1, 1\}$, queremos encontrar o hiperplano definido por

Algoritmo 1: Floresta aleatória para regressão

T_1, T_2, \dots, T_b é uma floresta aleatória de B árvores de decisão.

$i \in \mathbb{N}$ é a quantidade de observações em um nó.

$n_{min} \in \mathbb{N}$ é o número mínimo de observações em um nó.

for $b = 1 \rightarrow B$ **do**

1. Toma uma amostra de tamanho N dos dados de treino.

while $i < n_{min}$ **do**

a. Seleciona j variáveis aleatoriamente.

b. Escolhe a melhor variável para *split* dentre j .

c. Divide o nó em dois nós filhos.

if *Nenhum dos nós filhos tem* $i < n_{min}$ **then**

| d. Repete os passos a-c para cada nó filho.

end

end

end

2. Produz um conjunto de árvores $\{T_b\}_1^B$.

3. Realiza a predição para cada árvore T_b em um ponto x e calcula a média das predições:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B T_b(x)$$

$$\{x : f(x) = x^T \beta + \beta_0 = 0\}$$

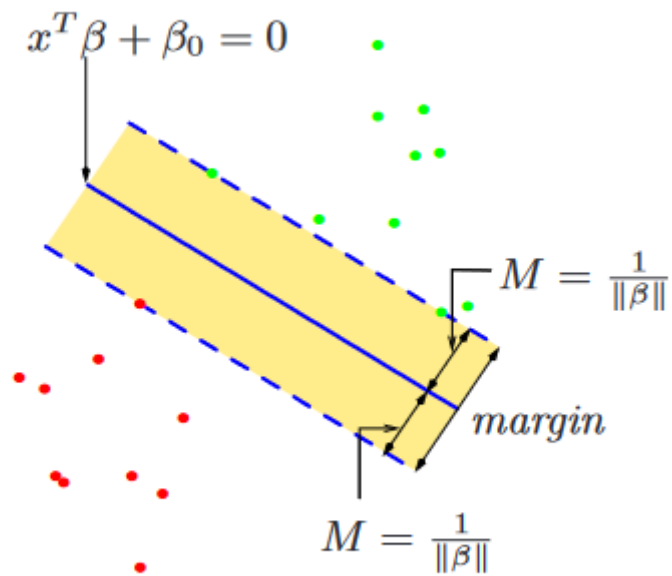
sendo $f(x)$ a distância ortogonal entre x e o hiperplano $f(x) = x^T \beta + \beta_0 = 0$, e M a margem entre as classes, definida como a distância ortogonal entre os pontos mais próximos de cada classe e o hiperplano (HASTIE; TIBSHIRANI; FRIEDMAN, 2009). Portanto, o problema de otimização é dado por

$$\begin{aligned} & \max_{\beta, \beta_0} \quad M \\ & \text{sujeito a} \quad y_i(x_i^T \beta + \beta_0) \geq M, \quad i = 1, \dots, N \end{aligned} \tag{B.3}$$

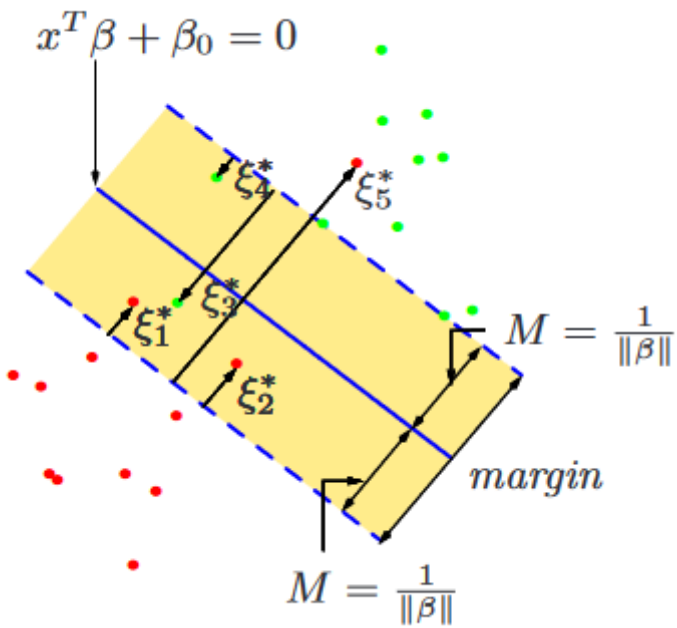
Quando pode-se encontrar um hiperplano com $y_i f(x_i) > 0 \quad \forall i$, tem-se o caso da construção de uma solução única para um hiperplano entre duas classes perfeitamente separadas pela maior margem possível (Figura 20a).

Entretanto, no mundo real, dificilmente um problema de classificação será linearmente separável. Para contornar esse obstáculo, é possível introduzir variáveis de folga $\xi_i \geq 0$ para cada observação (Figura 20b), de forma que a restrição se torne

$$y_i(x_i^T \beta + \beta_0) \geq M(1 - \xi_i), \quad i = 1, \dots, N \tag{B.4}$$



(a) Hiperplano entre duas classes perfeitamente separáveis.



(b) Hiperplano entre duas classes não separáveis.

Figura 20 – *Support vector classifiers*. Fonte: [Hastie, Tibshirani e Friedman \(2009\)](#).

e a função objetivo se torne

$$\min ||\beta|| \quad \text{sujeito a} \left\{ \begin{array}{l} y_i(x_i^T \beta + \beta_0) \geq M(1 - \xi_i) \quad \forall i, \\ \xi_i \geq 0, \sum \xi_i \leq \text{constante} \end{array} \right\} \quad (\text{B.5})$$

Para estender essa ideia para problemas de regressão, é necessário introduzir uma função de perda ϵ -insensível, que penaliza apenas os erros maiores que ϵ , de forma que os erros menores são ignorados durante a otimização, assim como as observações localizadas no lado correto do hiperplano são ignoradas no problema de classificação. A função objetivo se torna

$$\min ||\beta|| \quad \text{sujeito a} \left\{ \begin{array}{l} |y_i - x_i^T \beta - \beta_0| \leq \epsilon \quad \forall i, \\ \sum |\beta_j| \leq \text{constante} \end{array} \right\} \quad (\text{B.6})$$

APÊNDICE C – CONJUNTOS DE HIPERPARÂMETROS

Tabela 34 – Intervalos de hiperparâmetros para {xgboost}

Hiperparâmetro	Descrição	Intervalo	Trafo
nrounds	Número de iterações	[1, 5000]	NULL
eta	Taxa de aprendizado	$[-4, 0]$	10^x
max_depth	Profundidade máxima	[1, 20]	NULL
subsample	Subamostra	[0.1, 1]	NULL
colsample_bytree	Subamostra de colunas para uma árvore	[0.1, 1]	NULL
colsample_bylevel	Subamostra de colunas por nível de profundidade	[0.1, 1]	NULL
lambda	Regularização L2	$[-10, 10]$	2^x
alpha	Regularização L1	$[-10, 10]$	2^x

Tabela 35 – Intervalos de hiperparâmetros para {lightgbm}

Hiperparâmetro	Descrição	Intervalo	Trafo
num_iterations	Número de iterações	[1, 1000]	NULL
boosting	Algoritmo de boosting	{gbdt, dart, goss}	NULL
learning_rate	Taxa de aprendizado	$[-4, 0]$	10^x
num_leaves	Número de folhas	[2, 20]	NULL
lambda_l1	Regularização L1	$[-12, 12]$	2^x
lambda_l2	Regularização L2	$[-12, 12]$	2^x
feature_fraction	Subamostra de colunas	[0.1, 1]	NULL
bagging_fraction	Subamostra de linhas	[0.1, 1]	NULL
bagging_freq	Frequência de amostragem	[1, 10]	NULL

Tabela 36 – Intervalos de hiperparâmetros para {ranger}

Hiperparâmetro	Descrição	Intervalo	Trafo
min.node.size	Número mínimo de observações em um nó terminal	[1, 7]	2^x
mtry	Número de variáveis candidatas para split	[1,)	NULL
replace	Amostragem com reposição	{TRUE, FALSE}	NULL
sample.fraction	Fração de observações a serem amostradas	[0.1, 1]	NULL
num.trees	Número de árvores	[1, 2000]	NULL

Tabela 37 – Intervalos de hiperparâmetros para {e1071} (svm)

Hiperparâmetro	Descrição	Intervalo	Trafo
cost	Custo de ξ	$[0, 1]$	2^x
kernel	Kernel	{linear, polynomial, radial, sigmoid}	NULL
degree	Grau do polinômio	$[1, 5]$	NULL
gamma	Influência amostral	$[-12, 12]$	2^x
type	Tipo de SVM	{eps-regression}	NULL

Tabela 38 – Intervalos de hiperparâmetros para {glmnet}

Hiperparâmetro	Descrição	Intervalo	Trafo
alpha	Mix entre lasso e ridge	$[0, 1]$	NULL
lambda	Regularização	$[-12, 12]$	2^x