

## **CADERNOS DO IME – Série Estatística**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ  
ISSN impresso 1413-9022 / ISSN on-line 2317-4536 - v.37, p.01 - 14, 2014  
DOI: 10.12957/cadest.2014.18277

### **CARTAS DE CONTROLE MULTIVARIADAS: ESTUDO DE CASO EM VINÍCOLAS ITALIANAS**

Tassia Henkes Maciel  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS  
tahmaciel@gmail.com

Gabriela Musse Branco  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS  
gabriela.branco@proplan.ufrgs.br

Liane Werner  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS  
liane@producao.ufrgs.br

#### **Resumo**

*Diante de um ambiente cada vez mais competitivo, as empresas devem adotar uma linha de trabalho orientada para qualidade. Nos processos produtivos, o monitoramento e controle da variabilidade são fundamentais para a melhoria da qualidade. Com processos sob controle, os produtos apresentam mais qualidade e a linha de produção mais produtividade. Neste contexto, o controle estatístico do processo, através da utilização das cartas de controle, é requisito para as organizações que buscam reduzir a variabilidade dos processos a fim de aumentar a qualidade dos produtos e reduzir seus custos. As cartas de controle univariadas, mais especificamente para variáveis e atributos, monitoram características da qualidade independentes. Embora amplamente utilizadas, em alguns contextos específicos elas falham, sendo mais indicada a utilização de cartas de controle multivariadas, onde as características da qualidade monitoradas são dependentes entre si. Com isso, este artigo tem por objetivo fazer uma revisão bibliográfica sobre as cartas de controle multivariadas e realizar um estudo de caso aplicado no controle estatístico de processo produtivo de vinícolas italianas.*

**Palavras-chave:** Controle Estatístico do Processo; Carta de Controle Multivariada; Qualidade do Vinho.

## 1. Introdução

Qualquer processo produtivo de uma organização, por melhor que seja seu planejamento, apresenta certa variabilidade natural, resultante do acúmulo de muitas causas pequenas, inevitáveis. A variabilidade por causas aleatórias é inerente ao processo e, apresentando somente este tipo de variação, considera-se que o processo está sob controle estatístico (MONTGOMERY, 2009). Um processo também pode apresentar causas especiais, ou seja, uma variabilidade muito grande quando comparada com a variabilidade natural. Um processo que apresenta causas especiais é considerado fora de controle estatístico (MONTGOMERY, 2009).

O estudo da variabilidade dos processos é fundamental para a manutenção da competitividade das empresas sendo realizado através do Controle Estatístico do Processo (CEP), mais especificamente, a implantação de gráficos de controle. Além da sinalização das causas especiais, as cartas de controle monitoram comportamentos anômalos entre as causas comuns de variação, como muitos pontos formando uma tendência, por exemplo, o que poderia indicar um erro de setup (RIBEIRO & TEN CATEN, 2012).

No cenário competitivo atual, só há espaço para as organizações que adotam uma filosofia de melhoria contínua. Por isso, é preciso rever as especificações periodicamente, reavaliar a capacidade do processo e agir sobre o sistema quando necessário (RIBEIRO & TEN CATEN, 2012).

As vinícolas italianas estão inseridas em um ambiente competitivo, onde a qualidade é fator chave para o sucesso nas vendas dos produtos. Assim, torna-se interessante o uso de cartas de controle para o monitoramento do processo. Como ocorre em muitos processos químicos, no entanto, as variáveis de controle costumam apresentar fortes relações entre si. Por exemplo, os níveis de álcool podem estar muito relacionados à cor da bebida. Se isto ocorrer, a análise independente destas variáveis pode incorrer em erros de interpretação e acarretar em “alarmes falsos”. Por este motivo, para dados com fortes relações entre si, a utilização de cartas multivariadas se torna indispensável.

A partir desta contextualização, o objetivo geral deste trabalho realizar estudo de caso aplicado no controle estatístico de processo produtivo de vinícolas italianas, comparando abordagens univariadas e multivariadas.

Este artigo está dividido em cinco seções. Na primeira, é apresentada a introdução do artigo e objetivo do trabalho. A seção seguinte contém breve referencial teórico onde

são apresentados os conceitos de controle estatístico do processo, de carta de controle, tanto univariadas como multivariadas. A seção 3 traz a metodologia utilizada no artigo, a seção 4 apresenta o estudo de caso e a seção 5 as conclusões.

## **2. Referencial Teórico**

### **2.1 Controle Estatístico do Processo**

O início do controle da qualidade se deu na década de 20 nos EUA a partir dos avanços tecnológicos de medição e da aplicação da técnica de cartas de controle desenvolvida por Shewhart. A expansão da utilização destas e outras técnicas estatísticas na Inglaterra (1935) e no Japão (1954) fez com que o controle da qualidade se tornasse fundamental no controle dos processos produtivos (RIBEIRO & TEN CATEN, 2012).

O controle estatístico do processo (CEP) é um conjunto de técnicas estatísticas que visam à redução sistemática da variabilidade das características da qualidade de interesse do processo em estudo, contribuindo para a melhoria da qualidade intrínseca, da produtividade, da confiabilidade e do custo do mesmo. O CEP é um sistema de inspeção por amostragem que fornece uma fotografia do processo com o objetivo de identificar causas especiais que devem ser analisadas e bloqueadas para que a variabilidade do processo possa ser controlada (RIBEIRO & TEN CATEN, 2012). Dentre as ferramentas da qualidade, os gráficos de controle apresentam uma maior sofisticação técnica, porém, não englobam apenas aspectos técnicos, também constrói um ambiente na organização de melhoria contínua da qualidade e da produtividade (MONTGOMERY, 2009).

### **2.2 Cartas de Controle**

Carta de controle é uma representação gráfica de uma ou mais características de qualidade provenientes de amostras do processo. O gráfico contém três linhas horizontais: linha central (LC), que representa o valor médio da característica em estudo; e os limites superior (LSC) e inferior e controle (LIC). Na área entre esses limites de controle localizam-se as causas aleatórias do processo, que indicam que o processo está sob controle estatístico. Os pontos fora dos limites indicam a ocorrência causas especiais, que devem ser investigadas, pois indica que o processo não está sob controle (MONTGOMERY, 2009). As cartas de controle são úteis para o gerenciamento do

processo e redução da variabilidade, pois permitem distinguir as causas comuns das causas especiais.

As variáveis que são alvo do processo a ser monitorado e controlado podem ser independentes ou dependentes. No primeiro caso, utilizam-se as cartas de controle univariada desenvolvidas por Shewart. No segundo, utilizam-se as cartas de controle multivariadas. Essas cartas de controle são apresentadas nas seções 2.3 e 2.4 respectivamente.

### **2.3 Carta de Controle Univariada**

Os processos podem ser controlados através do monitoramento de variáveis ou atributos. Variáveis são características da qualidade que podem ser expressas em uma medida numérica, por exemplo, volume, largura, temperatura. Quando a característica da qualidade não pode ser expressa em uma medida numérica, usualmente classificam-se cada item inspecionado como “conforme” ou “não-conforme” em relação às especificações. Essas características da qualidade são denominadas de atributos (COSTA et al, 2004).

Ao monitorar uma característica da qualidade que é variável, é necessário utilizar tanto controle do valor central desta característica quanto da variabilidade. Para o valor central, utiliza-se a carta de controle para as médias ou medianas. Para a variabilidade, pode-se utilizar a amplitude, o desvio padrão ou a variância. Usualmente, prefere-se utilizar o gráfico da amplitude, pois seu cálculo é mais simples. Entretanto, quando as amostras forem grandes, os gráficos de desvio padrão e de variância são mais eficazes. Essa diferença entre os gráficos somente é percebida a partir de amostras maiores que dez (COSTA et al, 2004).

Existem quatro gráficos de controle para monitorar atributos. O gráfico np monitora o número de defeituosos, ou seja, o número de itens não conformes. O gráfico p monitora o percentual de defeituosos (não conformes). O gráfico c monitora o número de não conformidades na amostra. Já o gráfico u monitora o número de não conformidades por unidade. Para os gráficos np e c é necessário que as amostras sejam do mesmo tamanho. (MONTGOMERY, 2009).

## 2.4 Carta de Controle Multivariada

As cartas de controle para variáveis e atributos supõe que o processo apresenta somente uma característica da qualidade de interesse ou somente uma variável de saída. Em diversos casos, o monitoramento do processo envolve múltiplas variáveis relacionadas. Apesar de ser possível a utilização de cartas de controle univariadas para cada variável em certa aplicação, em inúmeros casos isso não é eficaz, levando a conclusões equivocadas. Assim, utilizam-se métodos multivariados que monitoram as variáveis simultaneamente (MONTGOMERY, 2009; ALT, 1985).

O procedimento mais comum para monitoramento de processos multivariados é a carta de controle  $T^2$  de Hotelling para monitoramento do processo. Esse gráfico de controle é análogo ao gráfico de médias de Shewhart, com duas linhas horizontais que representam os limites de controle da estatística  $T^2$  (LOWRY; MONTGOMERY, 1995). Em alguns ambientes produtivos, como indústrias químicas e de processamento, o tamanho do subgrupo é frequentemente igual a um. Neste caso, utiliza-se o gráfico de controle  $T^2$  de Hotelling para observações individuais (MONTGOMERY, 2009).

## 3. Metodologia

Esta pesquisa tem natureza aplicada, pois tem por finalidade a obtenção de conhecimentos e aplicação em uma situação pré-determinada. A abordagem desta pesquisa é quantitativa. Quanto aos seus objetivos, esta pesquisa pode ser classificada como exploratória, uma vez que proporciona melhor entendimento do assunto em questão, para torná-lo mais evidente e permitir a construção de hipóteses. Os procedimentos técnicos utilizados foram: pesquisa bibliográfica e estudo de caso (GIL, 2010).

Todas as análises foram realizadas com o software livre R (R Core Team, 2012) e apoio do pacote qcc (SCRUCCA, 2014), considerando 5% de nível de significância. O método de trabalho proposto está estruturado conforme as etapas descritas na sequência. Na primeira etapa procedeu-se com uma revisão bibliográfica sobre controle estatístico do processo, cartas de controle de Shewhart e as abordagens univariada e multivariada das cartas de controle. Após foi realizado um estudo de caso sobre a análise química de vinhos produzidos em uma mesma região da em Itália. Iniciou-se o estudo descrevendo o banco de dados. Com intuito de avaliar o tipo de gráfico a ser utilizado, obteve-se a

análise das correlações das variáveis de pesquisa, esta análise permitiu também verificar quais variáveis iriam permanecer no estudo. A seguir construíram-se as cartas univariadas de medidas individuais, depois se abordou a carta multivariada  $T^2$  de Hotelling e para finalizar realizou-se uma discussão comparando as abordagens das cartas univariada e multivariada.

## 4. Estudo de Caso

### 4.1 Descrição do banco de dados

O banco de dados explorado neste é o resultado de uma análise química de vinhos produzidos em uma mesma região da em Itália, derivados de três cultivares diferentes. A análise determinou as quantidades de 13 variáveis encontradas em todos os vinhos (FORINA et al, 1991), em 178 observações. Estes dados podem ser acessados no software R (R Core Team, 2012) através do pacote HDclassif. As variáveis estudadas da composição química dos vinhos são apresentadas na Figura 1.

Figura 1 – Descrição das variáveis

|                 |  |
|-----------------|--|
| Id              | Número de identificação da observação (1 a 178).                             |
| Classe          | Três cultivares diferentes de vinho (números inteiros: 1 a 3).               |
| Alcool          | Nível de álcool.   |
| A.Malico        | Nível de ácido málico.   |
| Cinzas          | Nível de elementos minerais do vinho (as cinzas).                            |
| Alcalinidade    | Alcalinidade das cinzas.   |
| Magnesio        | Níveis de magnésio.  |
| Fenóis          | Total de fenóis.   |
| Flavanoides     | Nível de flavanóides (fotoquímico antioxidante e antiinflamatório).          |
| Nonflavanoides  | Nível de nonflavanoides (fotoquímico antioxidante).                          |
| Proanthocyanins | Nível de Proanthocyanins (polifenóis naturais do extrato da semente da uva). |
| Cor             | Medida de intensidade da cor.  |
| Tonalidade      | Medida de tonalidade da cur (Hue).   |
| Vinhos diluidos | Nível OD280/OD315 de vinhos diluídos.  |
| Prolina         | Níveis do aminoácido prolina.  |

Fonte: elaborado pelos autores

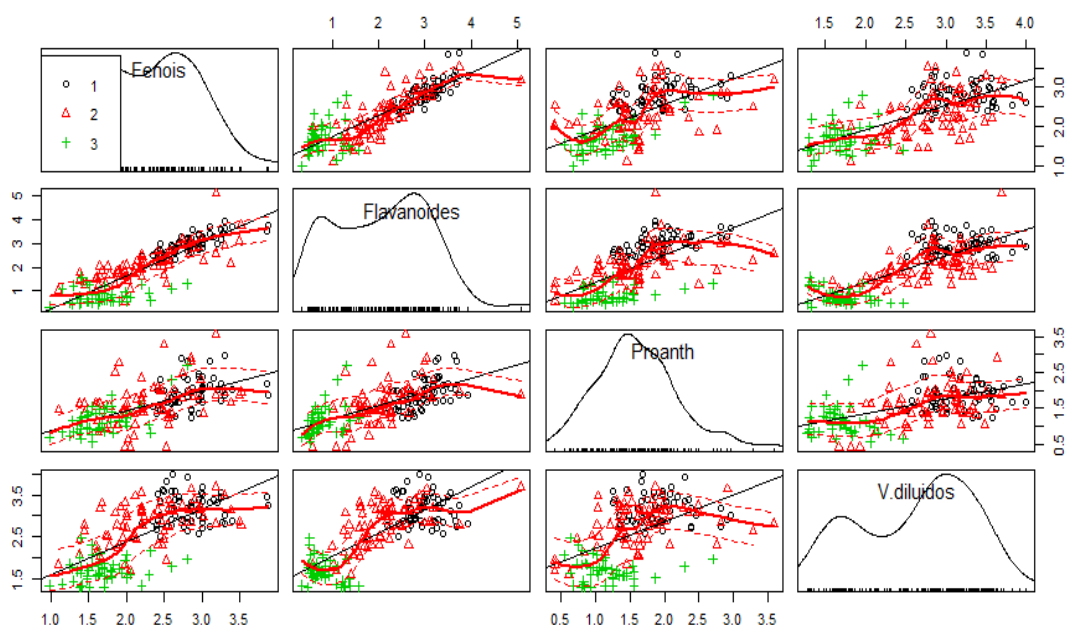
Neste banco de dados, a única variável categórica é Class, a classificação do tipo do vinho com as categorias 1, 2 e 3, as demais são contínuas.

## 4.2 Escolha das variáveis de estudo

Foram calculadas as correlações de Pearson das variáveis duas a duas. A análise das correlações indicou que as variáveis Fenóis, Flavanóides, Proanthocyanins e Vinhos diluídos possuem alta correlação entre si e não devem ser controladas separadamente. Como o banco de dados não apresenta grande número de variáveis, optou-se por escolhê-las de acordo com as correlações mais fortes, dispensando a Análise de Componentes Principais para identificação da estrutura latente (MONTGOMERY, 2009).

Para visualizar estas correlações por grupo, foi proposta a Figura 2 que apresenta os gráficos de dispersão destas variáveis por grupo de classe. A análise visual indica que existe uma forte correlação entre as variáveis quando segmentadas nos grupos de classe de vinhos 1 (em preto), 2 (em vermelho) e 3 (em verde). Portanto, estas serão as variáveis estudadas de forma univariada e multivariada nas seções seguintes.

FIGURA 2: Matriz de dispersão das variáveis Fenóis, Flavanóides, Proanthocyanins e Vinhos diluídos por grupos, classe 1 (em preto), 2 (em vermelho) e 3 (em verde).



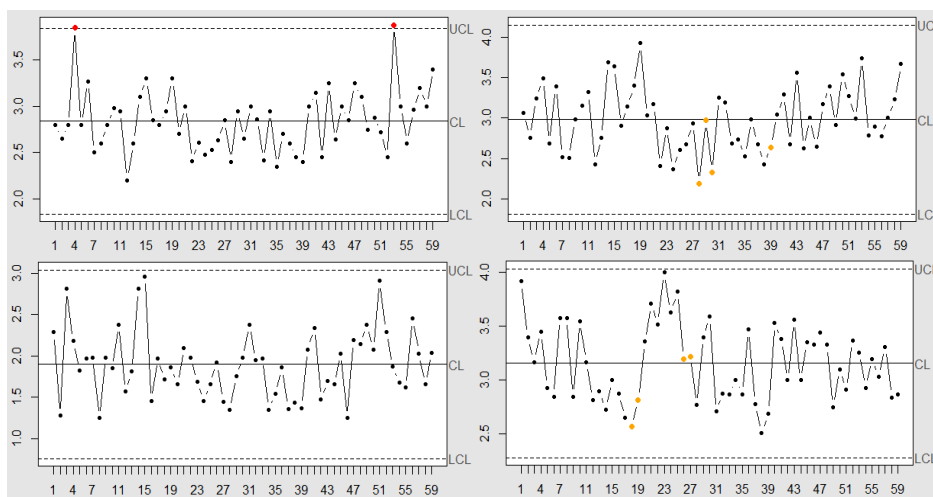
Fonte: elaborado pelos autores

### 4.3 Abordagem univariada: cartas de controle individuais

Como para cada análise do vinho tem-se apenas uma única observação, as cartas para valores individuais foram criadas para as variáveis do estudo, por classe, totalizando 12 gráficos (figuras 3 a 5). Estes gráficos apresentam em pontos vermelhos as observações fora dos limites de controle, que indicam presença de causa especial. Em pontos amarelos são situações onde alguma regra de Shewart é violada (MONTGOMERY, 2009), por exemplo, mais de cinco pontos consecutivos acima ou abaixo da média e, por este motivo, estes pontos amarelos serão chamados de “pontos de atenção” e precisam ser monitorados, uma vez que podem ocasionar um fuuro ponto fora de controle.

Na Figura 3 está representada a Classe 1 de vinhos. Pode-se observar que a variável Fenóis apontam duas causas especiais. A carta para a variável Flavanóides possui 4 pontos de atenção, a variável de Vinhos diluídos possui 4 pontos de atenção, e a carta de controle para a variável Proanthocyanins indica que, nesta classe possui a variávelem estudo sob controle estatístico.

FIGURA 3: Cartas de controle individuais da Classe 1 - Fenóis, Flavanóides, Proanthocyanins e Vinhos diluídos, (de cima para baixo, da esquerda para a direita).

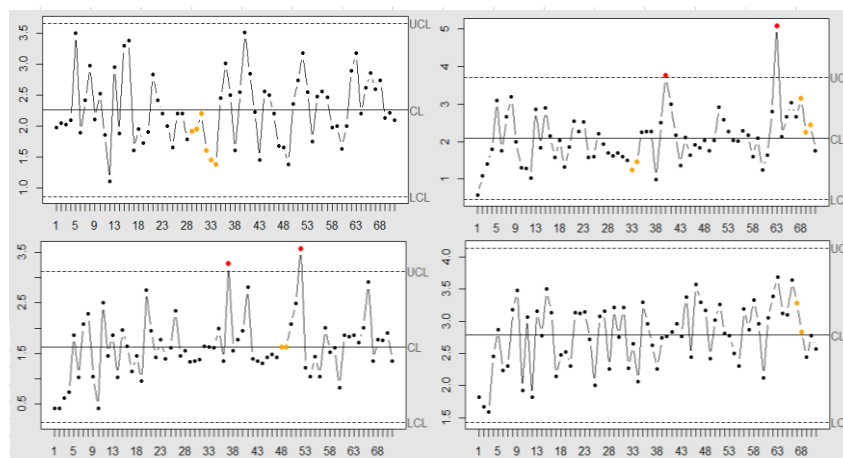


Fonte: elaborado pelos autores

A Figura 4 contém cartas de medidas individuais correspondentes à Classe 2 de vinhos. Ao contrário da Classe 1, observaram-se duas causas especiais em Flavanóides e duas em Proanthocyanins. Em fenóis e Vinhos diluídos observamos controle estatístico das variáveis, com pontos de atenção em ambos.



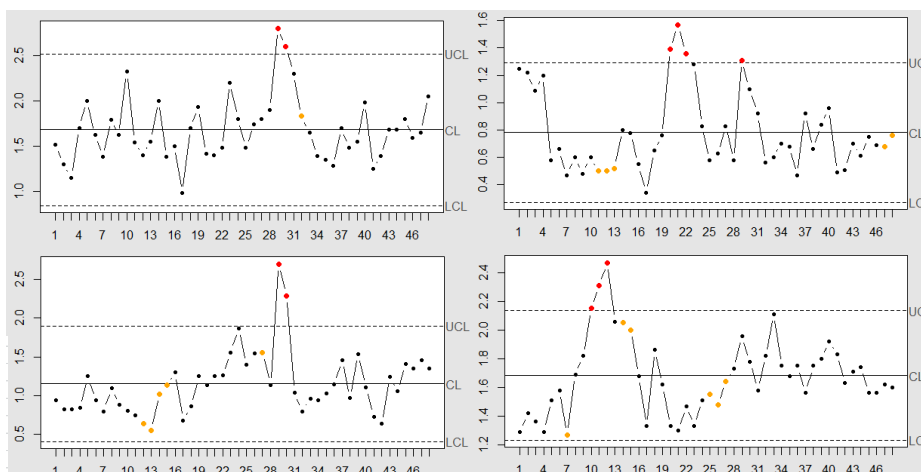
FIGURA 4: Cartas de controle individuais da Classe 2 - Fenóis, Flavanóides, Proanthocyanins e Vinhos diluídos, (de cima para baixo, da esquerda para a direita).



Fonte: elaborado pelos autores

Na Figura 5 estão as cartas de controle para as variáveis da Classe 3. Pode-se observar uma situação mais crítica quanto ao controle de qualidade, pois em todas as variáveis temos a presença de pelo menos dois pontos com causas especiais e pontos de atenção.

FIGURA 5: Cartas de controle individuais da Classe 3 - Fenóis, Flavanóides, Proanthocyanins e Vinhos diluídos (de cima para baixo, da esquerda para a direita).

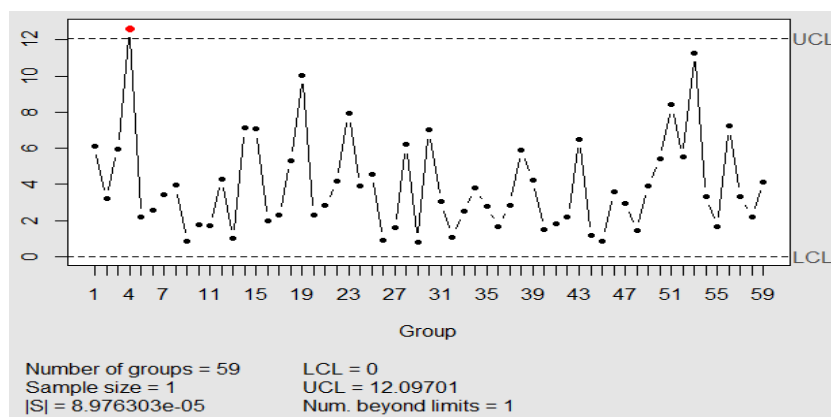


Fonte: elaborado pelos autores

#### 4.4 Abordagem multivariada: cartas de controle $T^2$

As Figuras 6 a 8 representam a abordagem multivariada do conjunto das cartas de controle apresentadas anteriormente. Nelas estão representadas a estatística  $T^2$  para valores individuais (MONTGOMERY, 2009) com as quatro variáveis escolhidas para

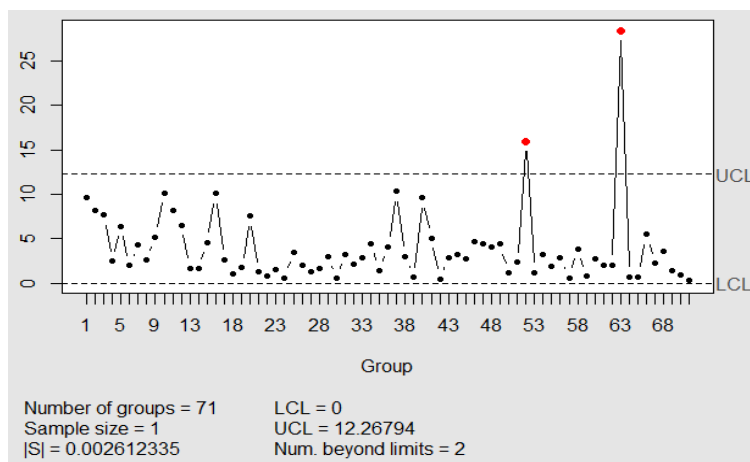
estudo, conforme item 4.2. Cabe salientar que, para aplicação das cartas de controle  $T^2$  de Hotelling o teste Shapiro Wilk multivariado (disponível no pacote mvShapiroTest), não rejeitou a normalidade univariada em 8 das 12 subamostras e em 1 das 3 matrizes. Considerando-se essas condições suficientes para sua utilização.

FIGURA 6: Carta  $T^2$  para Classe 1.

Fonte: elaborado pelos autores

A Figura 6 é o gráfico multivariado daqueles representados individualmente na Figura 2 para Classe 1 de vinhos. É possível identificar que na análise multivariada não há pontos de atenção, apenas uma amostra em vermelho indica possível causa especial.

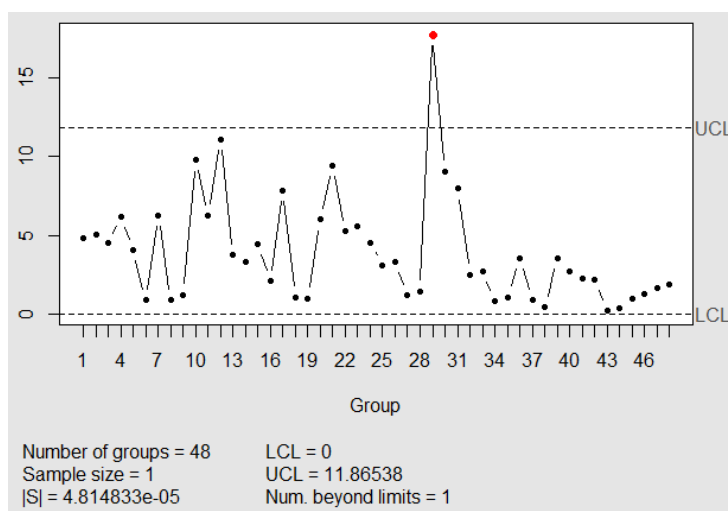
A Figura 7 é o gráfico multivariado dos gráficos individuais da Figura 3, e representa a Classe 2 de vinhos. Da mesma forma que para a Classe 1, o gráfico multivariado indica presença de 2 causas especiais.

FIGURA 7: Carta  $T^2$  para Classe 2.

Fonte: elaborado pelos autores

A Figura 8 é a abordagem multivariada da Classe 3, apresentada individualmente na Figura 4. Nota-se a presença de apenas uma causa especial e nenhum ponto de atenção.

FIGURA 8: Carta  $T^2$  para Classe 3.



Fonte: elaborado pelos autores

## 5. Conclusões

Este artigo analisou as diferenças de controle de qualidade univariado e multivariado para três diferentes classes de vinhos produzidos na Itália. Identificou-se pela análise de correlações um conjunto específico de variáveis muito relacionadas entre si, ou seja, qualquer alteração em alguma delas influenciava positivamente a outra. Este fato sugere que estas variáveis sejam analisadas conjuntamente e não em controles individuais. O principal resultado deste artigo são estas importantes diferenças que as análises multivariadas e univariadas apresentaram.

Para a Classe 1 de vinhos, por exemplo, a utilização de controles univariados identificou que a variável Fenóis estaria com duas causas especiais e as demais sob controle estatístico, mas com muitos “pontos de atenção”. A análise multivariada identificou que, conjuntamente, estas variáveis apresentam apenas uma causa especial. Os pontos de atenção não apareceram na análise multivariada, sugerindo que os “alarmes falsos” do controle individual estariam influenciados pelas correlações entre as variáveis.

Na Classe 2 de vinhos, o controle individual identificou quatro causas especiais: pontos 40 e 63 em Flavanóides e 37 e 52 em Proanthocyanins. A análise destas variáveis

conjuntamente apontou para a presença de apenas duas causas especiais, nos pontos 52 e 63, indicando dois possíveis “alarmes falsos” fruto das altas correlações.

A Classe 3 de vinhos foi a que apresentou maiores diferenças nas análises. No contexto univariado, a produção de vinhos seria considerada totalmente fora do controle estatístico, pois todas as variáveis apresentam muitas causas especiais de variação, conforme foi destacado na análise da Figura 5. Além destas causas especiais, há presença de muitos pontos de atenção. De acordo com Montgomery (2009), esta quebra nas regras de Shewart podem representar máquinas desajustadas, operador sem treinamento adequado, má qualidade da matéria prima, ou mesmo setups mal realizados. Ou seja, na análise univariada seria identificada necessidade de intervenção gerencial no controle de qualidade, o que provavelmente exigiria investimento financeiro. No entanto, quando se considera a relação presente entre as variáveis e se analisa o processo de forma multivariada, percebe-se que todas estas causas especiais e quebras nas regras de Shewart são alarmes falsos, relacionados possivelmente a característica multivariada do processo e à relação forte entre as variáveis. Desta forma, se recomenda a utilização de controles multivariados com a estatística  $T^2$ . Além de evitar erros, o controle multivariado simplifica a análise, pois muitas cartas individuais são substituídas por uma única multivariada. Neste trabalho, as quatro cartas individuais que cada classe possuía foram substituídas por apenas uma carta por classe de vinho. Por outro lado, para implantar controles multivariados é preciso que os operadores estejam bem treinados, pois os controles serão mais complexos. Conforme destacado por Montgomery (2009), parte do sucesso do CEP está no envolvimento do operador, pois aumenta o comprometimento com a qualidade e o senso de participação individual na qualidade da entrega final. Para o operador, certamente a estatística  $T^2$  é mais rebuscada que uma média, mediana ou amplitude o que pode também exigir a contratação de recursos de tecnologia (softwares) mais apropriados. No entanto, como destacado no início deste trabalho, o correto controle de qualidade é um diferencial competitivo importante para as empresas se manterem no mercado. Recomenda-se à gerência da vinícola que avalie o retorno gerado por este investimento.

Este trabalho mostrou a relevância da análise multivariada e as diferenças identificadas quando se analisa individualmente características que estão muito relacionadas entre si. Entre as limitações está a abordagem quantitativa, que enfatizou a

aplicação das cartas multivariadas e não na interpretação prática do que estas características impactam no resultado da qualidade do vinho produzido. Outra limitação está o fato dos autores terem considerado suficientes as altas correlações e todas as variáveis com distribuição normal.

Para estudos futuros, se propõe utilizar análise multivariada em outras análises químicas, pois o controle de qualidade em processos químicos costuma ter muitas variáveis com fortes relações intrínsecas, o que a literatura chama de estrutura latente adjacente ao processo.

## Referências

- ALT, F.B. Multivariate Quality Control. The Encyclopedia of Statistical Sciences. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1985.
- COSTA, A. B., EPPRECHT, E. K., & CARPINETTI, L. R. Controle Estatístico da Qualidade (2 ed.). São Paulo: Atlas: 2004.
- FORINA, M. ET AL, PARVUS An Extendible Package for Data Exploration, Classification and Correlation. Institute of Pharmaceutical and Food Analysis and Technologies. Genova: 1991.
- GIL, A. C. Como Elaborar Projetos de Pesquisa (5 ed.). São Paulo: Editora Atlas, 2010.
- LOWRY, C.A., MONTGOMERY, D.C.; A Review of Multivariate Control Charts. IIE Transactions. Vol.26, 1995.
- MONTGOMERY, D. C. Introdução Ao Controle Estatístico Da Qualidade (4 ed.). Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- R Core Team (2012). R: A Language and Environment For Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0.
- RIBEIRO, J. D., & TEN CATEN, C. S. Série monográfica qualidade: Controle estatístico do processo. Porto Alegre: FEENG/UFRGS, 2012.
- SCRUCCA, L. Quality Control Charts: Package ‘qcc’. Version 2.3. Disponível em <<http://cran.r-project.org/web/packages/qcc/qcc.pdf>> Acesso em 2014.

## MULTIVARIATE CONTROL CHARTS: A CASE STUDY IN ITALIAN WINERIES

### Abstract

*Facing an increasingly competitive environment, companies must adopt a work line oriented for quality. Monitoring and control of variability in production process are fundamental to quality improvement. Processes under control leads to higher quality products and productive lines of production. In this context, statistical process control, through control charts, is requirement for organizations that seek to reduce the variability of processes in order to increase product quality and reduce costs. The univariate control charts, specifically for variables and attributes, monitors independent quality characteristics. Although widely used, in some specific contexts they fail. When the monitored quality characteristics are mutually dependent, the use of multivariate control charts is more suitable. Therefore, this article aims to make a literature review of multivariate control charts and conduct a case study applied about statistical process control in italian wineries.*

**Key-words:** *Statistical Process Control, Multivariate Control Charts, Wine Quality.*