

BREVE HISTÓRICO E GENERALIDADES DA TEORIA DE DETECÇÃO DE SINAL

A teoria de detecção de sinal (TDS) aplicada à psicofísica foi estabelecida a partir dos trabalhos de Tanner e Swets¹ na Universidade de Michigan, na década de 1950. Literatura específica relativa a esses trabalhos pode ser checada, por exemplo, em Green e Swets,² Swets³ e Swets et al.⁴ Entretanto, Link⁵ menciona que a TDS aplicada à psicofísica poderia ter surgido muito antes.

O primeiro momento em que ela poderia ter surgido se evidencia na teoria discriminativa de Fechner, em que houve aplicação da teoria dos erros de Gauss. Essa teoria está contida no primeiro volume do *Elemente der psychophysics*, de 1860, obra de fundamental importância para o estabelecimento do primeiro laboratório de psicologia, em 1876, por Wundt, porém não foi levada adiante. E em outro momento, a TDS já poderia ter surgido a partir dos trabalhos de Thurstone,⁶ a partir de seu modelo de mensuração que fundamenta grande parte da psicometria atual. Porém, esse modelo de mensuração também não foi suficientemente explorado para evoluir para a TDS.

Link⁵ discorre sobre vários fatores que levaram à descontínua evolução da TDS; entretanto, ele argumenta que isto se deveu em grande parte ao pouco conhecimento de matemática que a maioria dos psicólogos recebe em sua formação acadêmica.

Esse infortúnio foi superado quando Tanner e Swets¹ propuseram a TDS como um novo modelo psicofísico; trabalho cujo conteúdo foi influenciado em grande parte pela engenharia da comunicação. Esse modelo psicofísico objetivava separar medidas de sensibilidade dos critérios decisórios de resposta dos observadores ao detectar ou discriminar estímulos sonoros ou visuais. Procedimento até então desconsiderado nos métodos psicofísicos clássicos para se determinar os limiares, o que causava problemas de interpretação sobre sensibilidade baseados somente nas taxas de acertos, sem considerar as taxas de falsos alarmes.

Por analogia à engenharia da comunicação, neste modelo psicofísico o observador se comporta como um receptor de sinal, cuja capacidade de detectar um estímulo (sinal) deve-se em grande parte à intensidade do sinal em suplantar a modulação do ruído inerente ao sistema sensorial do observador e, além disso, a expressão comportamental dessa detecção dependeria do critério de decisão adotado pelo observador para emitir a resposta.

A TDS pressupõe que as modulações do ruído e do ruído mais o sinal oscilam no sistema sensorial e que suas ocorrências se distribuem sob curvas gaussianas normais.

A exemplificação didática mais frequente da TDS aplicada à psicofísica é fornecida pelo método sim-não. Neste método, um mesmo estímulo é apresentado várias vezes ao observador, mas também são inseridas apresentações em que o estímulo está ausente. A partir do critério adotado pelo observador, que determina a que modulação da intensidade sensorial a resposta deva ser: “sim, percebi o estímulo” ou “não percebi o estímulo”, as taxas de respostas de acerto, falso alarme, rejeição correta e omissão se distribuem sob a curva normal conforme ilustra a Figura 1A. O índice de sensibilidade é geralmente denominado por d' , e neste caso representa a distância entre o ponto central da distribuição da condição sem apresentação do estímulo (distribuição do “ruído”) e o ponto central da distribuição da condição com apresentação do estímulo (distribuição do “ruído + sinal”). Se considerado que as distribuições são normais e de variabilidades iguais, d' pode ser calculado pela diferença entre os escores z das taxas de acertos e falsos alarmes.

O critério de decisão de resposta, neste caso simplesmente nomeado critério, pode ser estimado pela razão entre os módulos das ordenadas da posição do critério na distribuição de “ruído” e na distribuição “ruído + sinal”.

O esquema da Figura 1A pode ser comparado a um esquema de teste de hipóteses estatísticas, como ilustrado na Figura 1B, o que permite generalizar que a TDS é um exemplo de aplicação específica de um modelo estatístico para investigar problemas de sensibilidade sensorial e comportamentos decisórios. Portanto, a partir dessa generalização, pode-se apreender que conteúdos teóricos e metodológicos sobre TDS podem ser extrapolados, além das investigações em percepção e psicofísica, para outros campos investigativos da psicologia e áreas correlatas, tais como aqueles relacionados à avaliação de diagnósticos clínicos, à avaliação de desempenhos, às avaliações de habilidades mnemônicas; tornando-as um modelo teórico e metodológico bastante flexível. Nessas extrapolações, entretanto, as respostas ou eventos expressos na tabela de contingência da Figura 1 podem receber terminologias mais adequadas à área de aplicação. Por exemplo, os termos “acerto” e “falso alarme”, utilizados em psicofísica, são substituídos respectivamente pelos termos “verdadeiro-positivo” e “falso-positivo” quando se aplica a TDS a investigações em diagnósticos clínicos, como se pode notar no primeiro capítulo deste livro.

No caso de investigações psicofísicas, se fossem realizados vários experimentos por meio do método sim-não com o mesmo estímulo, d' deveria ser invariável; entretanto, o critério de resposta do observador pode variar, em virtude de diversos fatores. Esta mudança ou variação do critério pode ser manipulada, por exemplo, ao replicar o experimento ao

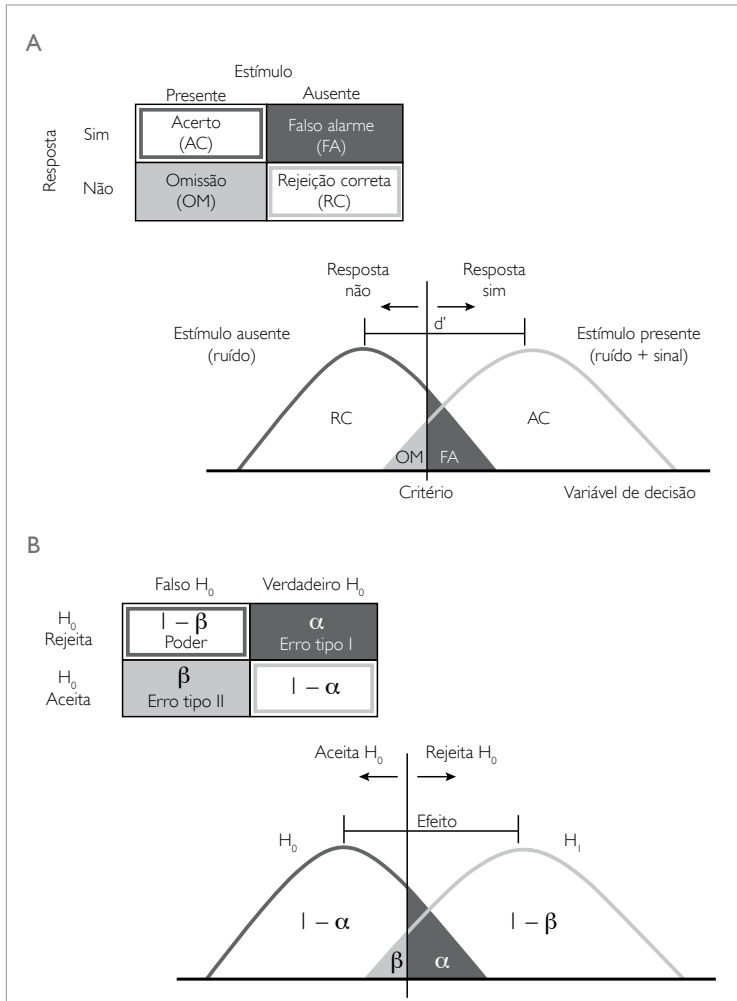


Figura 1 (A) Esquema de distribuição das respostas à presença ou à ausência do estímulo apresentadas pelo método sim/não sob a curva normal. (B) Por analogia, generalização do esquema das distribuições das respostas obtidas pelo método sim/não para o teste de hipóteses estatísticas.

mesmo observador com diferentes taxas de frequência em que o estímulo é apresentado ou não, ou modificando-se o estado motivacional do observador por meio de recompensas (benéficos) ou punições (custos) às respostas emitidas.

CURVA ROC E SUA EXPRESSÃO EM COORDENADAS DE ESCORE Z

A partir das taxas de acerto em função das respectivas taxas de falsos alarmes provenientes dos resultados desses experimentos estabelece-se a curva ROC (*receiver operating characteristic* – às vezes traduzida para o português por curva característica de operação do

receptor, ou em casos mais específicos em investigações em sensação e percepção, por curva de isossensibilidade). Exemplos da curva ROC são ilustrados na Figura 2A. Essa curva estabelece a característica da sensibilidade do observador para detectar um estímulo ou discriminar dois estímulos. Curvas mais próximas à diagonal principal do gráfico, com taxas de acertos e falso alarme iguais, indicam d' próximo a 0, ou seja, o estímulo é indetectável ou indiscriminável pelo observador, e quanto maior a inflexão da curva, afastando-se da diagonal principal, indica-se d' mais elevado, ou seja, o estímulo é cada vez mais detectável ou discriminável.

Essas curvas ROC podem ser também expressas em coordenadas de escore z das taxas de acertos e falsos alarmes como ilustrada na Figura 2B. Nesse caso, as curvas ROC se resumem a retas que interceptam os eixos das abscissas e das ordenadas. A distância da origem dos eixos das coordenadas a esses pontos de intercepção determina o valor d' .

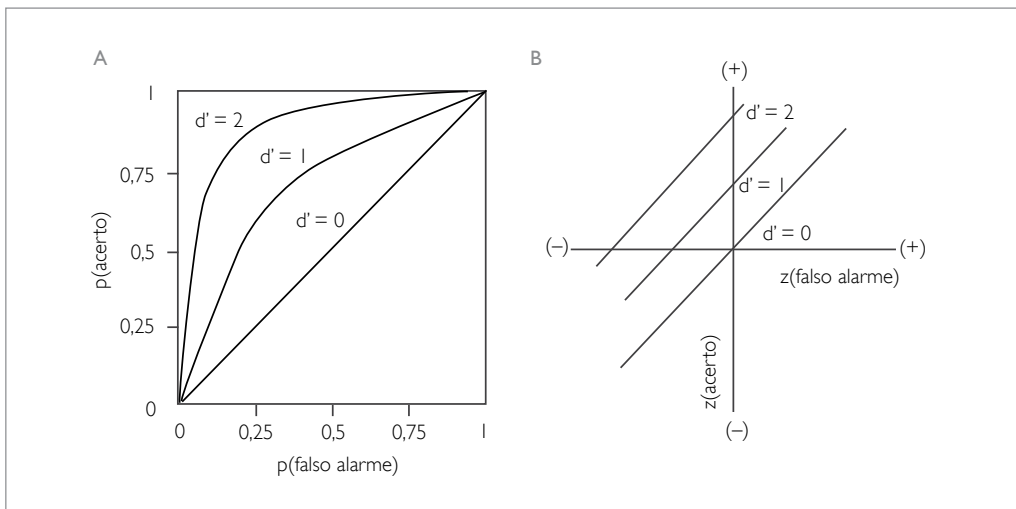


Figura 2 (A) As curvas ROC são expressas pelas taxas de acertos e em função das respectivas taxas de falso alarme. À medida que essas curvas se afastam da diagonal central, expressam maior d' e portanto maior sensibilidade. (B) Alternativamente, as curvas ROC podem ser expressas em escore z das taxas de acertos e das taxas de falso alarme.

O MÉTODO DE JULGAMENTO DA CONFIABILIDADE NAS RESPOSTAS

Reitera-se que os exemplos de curvas ROC ilustrados na Figura 2 restringem-se a situações em que as distribuições do “ruído” e do “ruído + sinal” são normais e de variabilidades iguais. Além disso, o método sim-não é pouco produtivo para se obter a curva ROC, visto que é necessário realizar várias sessões experimentais, manipulando-se os critérios de resposta para se obter os pontos da curva provenientes de diferentes taxas de falsos alarmes e de acertos, o que torna o experimento geralmente exaustivo e entediante.

Com a finalidade de fornecer complementos de análise de dados obtidos por métodos adotados pela TDS, descreve-se neste capítulo um método mais eficiente que o método sim-não, porém ainda pouco divulgado nos textos didáticos: o método de julgamento da confiabilidade na resposta (*the confidence rating method*).⁷

Este método possibilita em uma única sessão que o observador trabalhe simultaneamente com vários critérios de decisão, diferente do método sim-não em que há somente um critério. Este método consiste de condições com ou sem apresentações do estímulo ao observador, similar ao método sim-não. Porém, diferentemente deste em que o observador é forçado a decidir por uma das duas categorias de resposta: “Não percebi o estímulo”; ou “Sim, percebi o estímulo” em cada condição de estimulação, o observador deve decidir por uma resposta entre várias categorias que descrevam o grau de confiança que ele tem nela. Por exemplo, o observador poderia escolher uma das seguintes categorias em cada condição de estimulação: (Cat. 1) “Tenho certeza de que não percebi o estímulo”; (Cat. 2) “Não percebi o estímulo, mas tenho alguma dúvida”; (Cat. 3) “Percebi o estímulo, mas tenho alguma dúvida”; (Cat. 4) “Tenho certeza de que percebi o estímulo”. As distribuições das respostas de cada categoria sob as curvas do “ruído” e “ruído + sinal” por este método é ilustrado na Figura 3, sendo que os diferentes critérios, representados pelas linhas verticais, separam as sucessivas categorias de resposta.

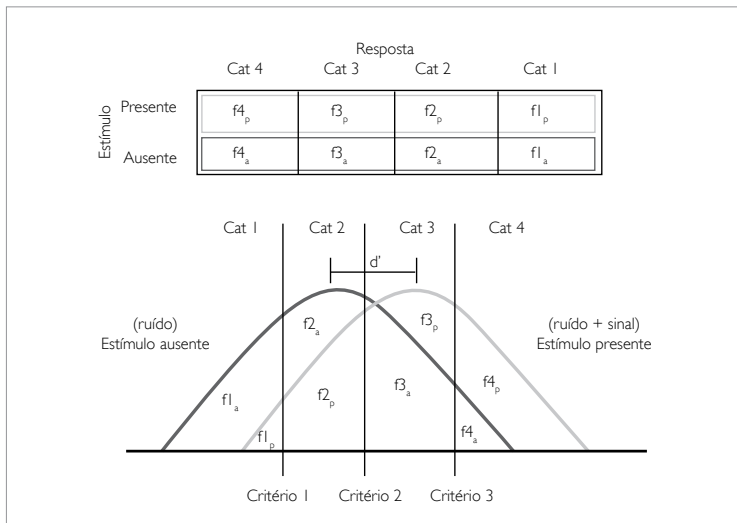


Figura 3 Distribuição das respostas a cada categoria pelo método de julgamento da confiabilidade sob as curvas do “ruído” e “ruído + sinal”.

Os resultados de uma única sessão experimental por este método permitem traçar a curva ROC; diferente do método sim-não, que necessita de dados de várias sessões experimentais para se manipular os critérios de decisão de resposta para se obter diferentes pontos da curva ROC para traçá-la.

Nota-se que a partir dos dados gerados por este método é preferível traçar a curva ROC em coordenadas de escore z , como ilustrado na Figura 2B, pois uma regressão linear pode facilmente estimá-la. Além disso, essa reta de regressão pode fornecer algumas informações importantes sobre a relação entre as distribuições do “ruído” e do “ruído + sinal”. Por exemplo, ao expressar a equação de regressão linear da curva ROC por:

$$z_{(\text{ruído} + \text{sinal})} = s \times z_{(\text{ruído})} + d'_2$$

O coeficiente angular “ s ” dessa equação expressa a razão entre as magnitudes do desvio-padrão σ das distribuições do “ruído” e do “ruído + sinal”, que é equivalente à razão entre os módulos do coeficiente linear d'_2 e da raiz d'_1 , ou seja:

$$s = \sigma_{(\text{ruído})} / \sigma_{(\text{ruído} + \text{sinal})} = d'_2 / d'_1$$

No caso do coeficiente angular, $s = 1$, indica-se que as duas distribuições possuem desvios-padrão iguais e d'_1 e d'_2 poderiam ambos ser representados simplesmente por d' , como ilustrado na Figura 1A e Figura 2. Entretanto, se $s \neq 1$, indica-se que os desvios-padrão da distribuição do “ruído” e da distribuição “ruído + sinal” são diferentes. Nesse caso, o módulo do coeficiente linear d'_2 da equação de regressão linear indica a distância entre as duas distribuições mensuradas pelo desvio-padrão da distribuição do “ruído + sinal”. O módulo da raiz, d'_1 , da equação de regressão indica a distância entre as duas distribuições mensuradas pelo desvio-padrão da distribuição do “ruído” (Figura 4). Ao se deparar com situações em que $s \neq 1$, o pesquisador deve arbitrar qual seria a medida de sensibilidade para relatar sua análise: d'_1 , d'_2 ou ambos, mencionando-se o valor do coeficiente angular “ s ”.

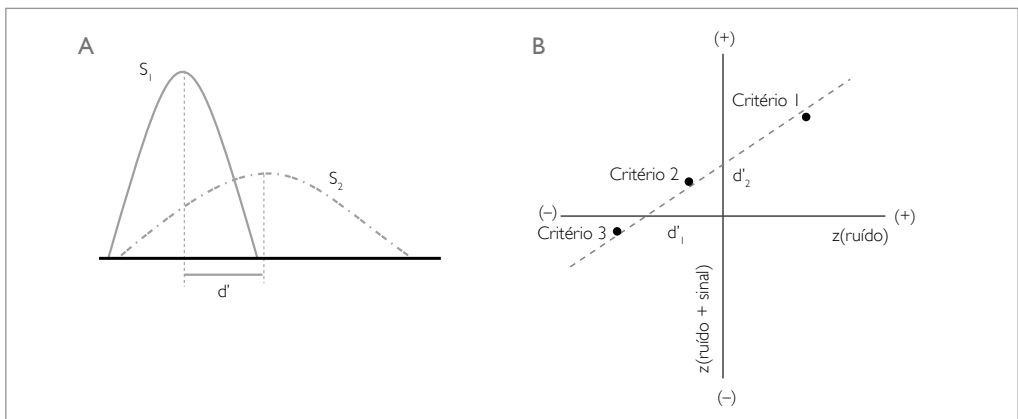


Figura 4 (A) No caso em que a distribuição do “ruído” (S_1) e a distribuição do “ruído + sinal” (S_2) possuem variabilidades diferentes, a distância d' entre elas pode ser medida em desvios-padrão de S_1 ou S_2 . (B) Se d' for medida em desvios-padrão de S_1 , o módulo da raiz d'_1 da equação da reta de regressão da curva ROC expressará essa distância. Se expressa em desvio-padrão de S_2 , o módulo do coeficiente linear d'_2 da reta de regressão terá essa finalidade.

Uma alternativa para os casos em que as distribuições possuïrem variabilidades diferentes seria utilizar o parâmetro “ d_a ”, que corresponde à distância entre as distribuições do “ruído” e do “ruído + sinal” mensurada pela raiz quadrada da média dos desvios-padrão das duas distribuições. Nesse caso, “ d_a ” pode ser obtido pela equação:

$$d_a = \sqrt{2 / (1 - s^2)} \times d'_2$$

Em que “ s ” é o coeficiente angular e d'_2 é o módulo do coeficiente linear da reta de regressão da curva ROC.

Em outras palavras, “ d_a ” é determinado pela rotação dos eixos das coordenadas em score z , com pivotamento na origem, de maneira que as distâncias entre a origem das coordenadas e os pontos de intercepções da reta de regressão da curva ROC com os eixos rotacionados sejam iguais (Figura 5).

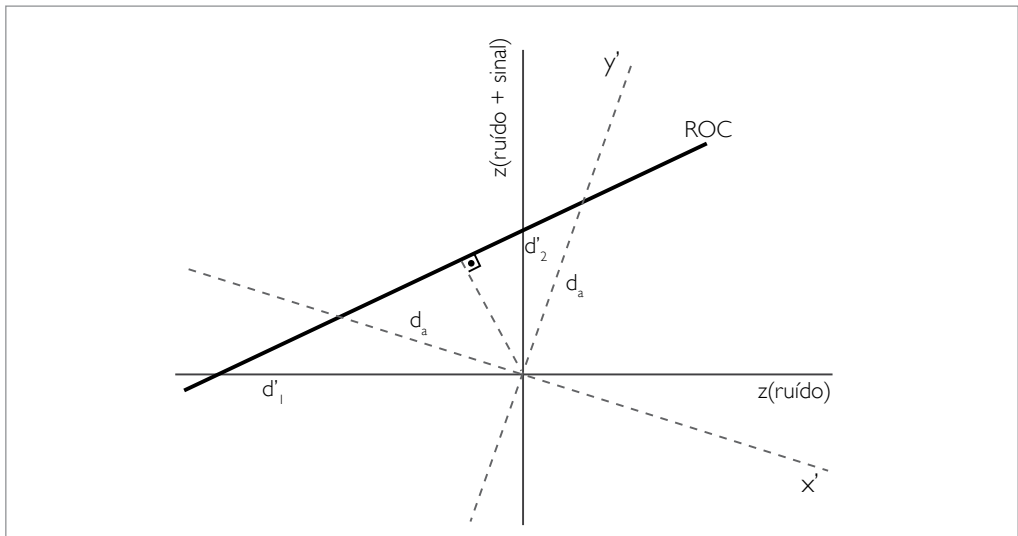


Figura 5 Representação gráfica de “ d_a ” após rotação dos eixos das coordenadas para a posição dos eixos x' e y' .

Análise de dados pelo método de julgamento da confiabilidade nas respostas

Com a finalidade de ilustrar a análise de dados pelo método dos julgamentos de confiabilidade, segue um exemplo hipotético em que foram coletadas as frequências de respostas a cinco categorias de confiabilidade às condições em que o estímulo estava presente ou ausente, conforme a Tabela 1. A categoria 5 indica que o observador tem certeza absoluta de ter percebido o estímulo; e a categoria 1, certeza absoluta de não tê-lo percebido. As

categorias intermediárias indicam alguma gradação de dúvida em ter ou não ter percebido o estímulo.

Tabela 1 Frequências simples em cada categoria de resposta nas condições de estímulo presente e ausente

Estímulo	Frequência de respostas					Total
	Cat 5	Cat 4	Cat 3	Cat 2	Cat 1	
Presente	20	140	340	340	160	1.000
Ausente	0	10	200	550	240	1.000

Na primeira etapa, a partir da Tabela 1, calculam-se as sucessivas frequências acumuladas das respostas a cada condição de estimulação a partir da categoria 5 (percebeu o estímulo com certeza) até a categoria 1 (não percebeu o estímulo com certeza), como se observa na Tabela 2.

Tabela 2 Frequências acumuladas sucessivamente da categoria 5 à categoria 1

Estímulo	Frequências acumuladas				
	Cat 5	Cat 4	Cat 3	Cat 2	Cat 1
Presente	20	160	500	840	1.000
Ausente	0	10	210	760	1.000

Em seguida, transformam-se essas frequências acumuladas em taxas cumulativas, como se nota na Tabela 3. Para isso, dividem-se as frequências acumuladas em cada categoria da Tabela 2 pela frequência total respectiva à cada condição de estimulação.

Tabela 3 Taxas de frequências acumuladas sucessivamente da categoria 5 à categoria 1

Estímulo	Taxas cumulativas				
	Cat 5	Cat 4	Cat 3	Cat 2	Cat 1
Presente	0,02	0,16	0,5	0,84	1
Ausente	0	0,01	0,21	0,76	1

Essas taxas cumulativas podem ser utilizadas para traçar a curva ROC tradicional, como se ilustra na Figura 6A. Nota-se que ela se mostra assimétrica, o que indica que as distribuições “ruído” e “ruído + sinal” apresentam desvios-padrão diferentes.

Essas taxas cumulativas podem ser transformadas em escore z conforme a Tabela 4 (os escores z podem ser obtidos em tabelas de distribuição normal disponíveis em livros básicos de estatística ou por programas computacionais que lidam com estatística). Esses dados permitem representar a curva ROC ilustrada na Figura 6B. Nota-se que são descartadas as coordenadas que contêm as taxas cumulativas 0 ou 1, cujos respectivos escores z tendem a $-\infty$ e $+\infty$. Portanto, somente os valores de z em realce na Tabela 4 são utilizados para traçar essa curva ROC.

Tabela 4 Escores z das taxas de frequências acumuladas sucessivamente da categoria 5 à categoria 1

Estímulo	Escores z das taxas cumulativas				
	Cat 5	Cat 4	Cat 3	Cat 2	Cat 1
Presente	- 2,05	- 0,99	0	0,99	+∞
Ausente	- ∞	- 2,33	- 0,81	0,71	+∞

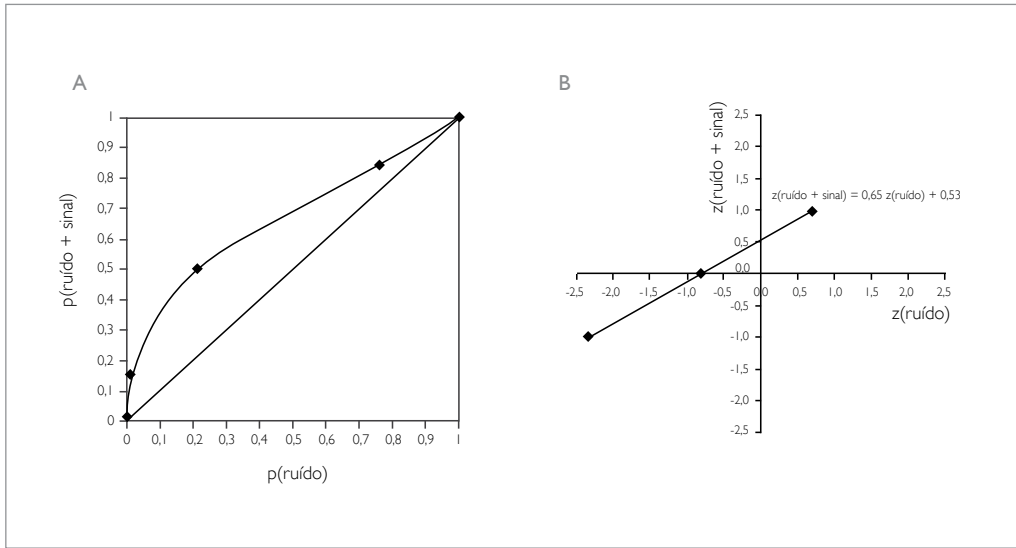


Figura 6 (A) Curva ROC traçada em função das taxas relativas acumuladas em cada categoria de resposta. (B) A mesma curva ROC traçada em função dos escores z das taxas relativas.

Aplicando-se a técnica de regressão linear aos pontos da Figura 6B obtém-se a curva ROC, cuja equação é:

$$z(\text{ruído} + \text{sinal}) = 0,65 z(\text{ruído}) + 0,53$$

O coeficiente angular “s” dessa equação linear é 0,65 e indica que o desvio-padrão da distribuição “ruído + sinal” é aproximadamente 1,52 vez maior que o desvio-padrão da distribuição do “ruído”.

O módulo da raiz da equação de regressão d'_1 é 0,81 e expressa a distância entre as duas distribuições, utilizando-se o desvio-padrão da distribuição do “ruído”.

O módulo do coeficiente linear da equação de regressão d'_2 é 0,53 e expressa a distância entre as duas distribuições, utilizando-se o desvio-padrão da distribuição do “ruído + sinal”.

O valor de d'_a é 0,63 e expressa a distância entre as duas distribuições em função da raiz quadrada da média dos desvios-padrão das distribuições.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em suma, neste capítulo foram fornecidas informações históricas e generalidades da TDS e de como conseguir e analisar dados obtidos pelo método dos julgamentos de confiabilidade nas respostas, um método mais eficiente que o método sim-não para obter e analisar os parâmetros da TDS, se aceita a suposição de que as distribuições do “ruído” e “ruído + sinal” sejam normais. Além disso, foram fornecidas informações sobre como analisar a curva ROC em coordenadas de escores z , principalmente se as distribuições do “ruído” e “ruído + sinal” possuem variabilidades diferentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Tanner WP Jr, Swets JA. A decision-making theory of visual detection. *Psychological Rev.* 1954;61(6):401-9.
2. Green DM, Swets JA. *Signal detection theory and psychophysics*, reprint edition. Los Altos: Peninsula; 1966/1988.
3. Swets JA. *Signal Detection theory and ROC analysis in psychology and diagnosis: collected papers*. New Jersey: LEA; 1966/1996.
4. Swets JA, Tanner WP Jr, Birdsall TG. Decision processes in perception. *Psychological Rev.* 1961;68:301-40.
5. Link SW. Rediscovering the past: Gustav Fechner and the signal detection theory. *Psychological Science.* 1994;5(6):335-40.
6. Thurstone LL. A law of comparative judgments. *Psychological Rev.* 1927;34:273-86.
7. Macmillan NA, Creelman CD. *Detection theory: A user's guide*. Mahwah: Erlbaum; 2005.