

**ARTÍCULO
ESPECIAL**

**Bases cuantitativas del análisis de
imágenes médicas: información e
inferencia bayesiana**

Mauricio Canals L.

***Quantitative basis for medical
imaging analysis. Information theory
and Bayesian inference***

One of the main issues in radiology is image analysis and report. The two stages of this process are the extraction of the information from the image and the diagnostic exercise. This paper is a theoretical analysis of image interpretation from a quantitative perspective, using information theory and Bayesian inference, and relating it to the concepts of evidence based medicine. It is concluded that the amount of information is dependent on the previous state of knowledge and the acquaintance with the clinical history and complementary exams. The three determined stages of the diagnostic process are a priori, conditioned by the image and a posteriori analyses. The first stage is related to the degree of information and knowledge of the case. The second stage is dependent on the conditional probability for the presence of image signs of the disease and it is thus directly dependent on the sensitivity and specificity of the exam. The third stage is dependent of the previous stages, that in the simplest case can be expressed in function of the odds or likelihood ratios. These three stages allow to reach a decision about the usefulness of a given exam and they orient the questions that a given image may answer. They also orient the research on image analysis for an adequate decision making, minimizing diagnostic uncertainty (Rev Méd Chile 2003; 131: 553-61).

(Key Words: Bayesian analysis; Evidence-based medicine; Radiology)

Recibido el 6 de noviembre, 2002. Aceptado en versión corregida el 15 de abril, 2003.
Servicio de Radiología Hospital del Salvador, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile.
Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad del Desarrollo.

Uno de los aspectos centrales del quehacer del especialista en imágenes es el análisis de una imagen obtenida por cualquiera de las

técnicas habituales de la especialidad: radiología simple, tomografía axial computada, ecotomografía o resonancia nuclear magnética. En este análisis podemos reconocer: 1) el proceso o mecanismo de extracción de la información contenida en la imagen (i.e. informar una radiografía); y 2) la conclusión escrita, resultado de este proceso (i.e. conclusión radiológica). Esta última fase es la expresión final del proceso, leída por profesionales médicos y pacientes. Esta conclusión ha motivado cierta polémica, por cuanto existen opiniones diversas entre radiólogos y médicos tratantes en referencia al alcance que ésta debe tener. ¿Se debe sólo describir la imagen?... ¿se debe proponer un diagnóstico?... ¿se deben sugerir nuevos exámenes?¹.

Recientemente Ortega et al¹, han explorado la opinión de los médicos tratantes respecto a este tema encontrando que son preferidos los informes con descripción y conclusión (entre 55% y 75%) aunque son rechazadas las sugerencias de nuevos exámenes.

Sin embargo, no sólo la opinión de los médicos tratantes es importante en este aspecto, sino también la de los especialistas en imágenes, sustentada en un análisis del significado y alcance del informe de una imagen en cuanto a proceso y resultado desde la perspectiva de su contribución al diagnóstico. En este sentido, las imágenes médicas, su análisis y resultado deben ser tratados como exámenes de laboratorio caracterizados a través de parámetros útiles tales como sensibilidad, especificidad, cociente de verosimilitud, sobre todo cuando hoy, en la medicina en general y en la radiología en particular, es necesaria una adecuada información o evidencia para una toma de decisiones²⁻⁴ correcta. Aunque el análisis de decisiones es antiguo⁵, su uso y repercusión en la medicina es aún escaso. Aunque existen estudios que proponen métodos para analizar decisiones basados en exámenes generales cuyo resultado es positivo o negativo, basados en la sensibilidad, especificidad y certeza diagnóstica o en las curvas entre la fracción de falsos y verdaderos positivos^{6,7} (*Receiver operating characteristic*), no existe actualmente un método claramente definido, para analizar decisiones, basado en imágenes. Estas últimas no salen simplemente positivas o negativas, sino que tienen una riqueza de signos semiológicos que pueden orientar a un conjunto de posibles diagnósticos. Para establecer un método adecuado para analizar la toma de decisiones basados en imágenes, se requiere establecer una relación entre el proceso de análisis, el conjunto de posibles diagnósticos, la positividad o negatividad del examen y los parámetros habitualmente utilizados en exámenes de laboratorio como sensibilidad y especificidad.

En este artículo, se realiza una aproximación teórica a la extracción y análisis de la información con fines diagnósticos, estableciendo relaciones que pueden ser de utilidad para la toma de decisiones.

MÉTODO

Se analiza el informe en forma teórica en cuanto a proceso y resultado desde la perspectiva de la teoría de la información e inferencia bayesiana, se relaciona con los parámetros relevantes de la medicina basada en la evidencia y se extraen los aspectos conceptuales más relevantes o de utilidad.

Análisis teórico. Bases. Podemos definir una imagen médica como la representación en un plano de ciertas propiedades físicas de estructuras anatómicas. Esta representación aunque sigue el diseño morfológico de la estructura representada, no conserva exactamente su forma ni su medida. Esto ocurre a consecuencia de los métodos tecnológicos usados para obtener la imagen; por ejemplo, en radiología convencional se magnifican las estructuras más lejanas a la película y en ecotomografía las distancias son calculadas sobre una estimación de una velocidad de 1.540 m/seg del ultrasonido en los tejidos, lo que no es valedero para todos los tejidos.

El tipo de imagen depende del principio físico usado en obtenerla. Así, una radiografía es una representación de la atenuación de radiación (dependiente de Z) de ciertas estructuras; una imagen de tomografía computada es una representación digital en 16 tonos de gris de la atenuación de la radiación de una sección transversal de una estructura; una imagen ecotomográfica es la representación seccional de las propiedades de reflexión del ultrasonido de cierta estructura (dependiente de las impedancias, velocidades, atenuación de los tejidos, etc) y una imagen de resonancia nuclear magnética es una representación de la relajación magnética (entrega de energía) de ciertas estructuras después de la magnetización y la resonancia (pulso RF). De este modo, en una imagen médica no se "ven" los órganos sino que se tienen mapas de representación de propiedades físicas de ellos.

La imágenes además están sujetas a la observación e interpretación de los observadores, dando origen a la subjetividad intra e interindividual: un mismo observador puede "ver" cosas diferentes ante una misma imagen en dos oportunidades diferentes y dos observadores pueden ver cosas diferentes ante la misma imagen en la misma oportunidad.

En este "ver la imagen" (formarse su propia imagen de una imagen) intervienen dos aproximaciones que habitualmente se realizan en conjunto.

1) Una aproximación holista en la que se aprecia la totalidad como un conjunto, intentando reconocer configuraciones o patrones característicos (imágenes típicas). Esta aproximación es muy útil en el informe de radiografías de tórax: "las radiografías de tórax se deben mirar con lentillas de alejamiento"⁸ y en los antiguos ABREU.

2) La segunda aproximación es de tipo reduccionista observando las partes o las lesiones elementales, para luego integrar el todo.

Ambas aproximaciones habitualmente se realizan en conjunto pues aportan informaciones diferentes; por ejemplo: una imagen nodular en aproximación holista puede ser descompuesta en sobreproyección de estructuras en un enfoque reduccionista y elementos acinonodulares en un enfoque reduccionista, pueden configurar un patrón segmentario en la observación holista.

Podemos definir informar una imagen como el proceso mediante el cual el especialista extrae la información contenida en ella. Esta simple

definición nos obliga a explorar un poco más acerca de lo que significa información.

Teoría de la información. En 1948 Shannon⁹ definió información de la siguiente manera: ante una pregunta "P" y dado un estado de conocimiento "X₀" un observador se encuentra en un estado de incerteza I₀/X₀. En dicho estado se puede asignar una probabilidad "p_i" a cada una de las "i", posibles respuestas a la pregunta P. Una medida de dicha incerteza es:

$$I = -\sum_i p_i \times \ln(p_i) \quad [1]$$

donde ln es el logaritmo natural⁹⁻¹¹.

Esta medida tiene la propiedad de tener un valor máximo cuando la ignorancia es completa. En este caso p_i=p_j para todo par i, j; por ejemplo, si existen K posibles respuestas se asigna probabilidad 1/K a cada una de ellas y entonces

$$I = -[1/K \ln(1/K) + \dots + 1/K \ln(1/K)] = -\ln(1/K) = \ln(K) \quad [2]$$

En cambio cuando se tiene seguridad que la respuesta correcta es la i-ésima (p_i=1 y p_j=0 para todo j≠i) y entonces la incerteza es I = -[0 ln(0) + 0 ln(0) + ... + 1 ln(1) + ... + 0 ln(0)] = 0. En otras palabras, la ignorancia completa corresponde a máxima incerteza y la seguridad corresponde a incerteza nula.

Cuando usamos logaritmos en base 2 y sólo hay dos posibles respuestas igualmente probables se puede notar que I = -(1/2) log₂ (1/2) - (1/2) log₂ (1/2) = 1 Bit; es decir 1 Bit es la incerteza contenida en una pregunta con dos posibles respuestas equiprobables (*on-off* o cara-sello) y corresponde a la unidad de incerteza cuando se utilizan logaritmos en base 2.

Si ante esta pregunta se emite una señal "s", el observador llega a un nuevo estado de conocimiento "X₁" y a una nueva incerteza I₁/X₁ que puede ser mayor, menor o igual que la anterior. Esto se puede representar como:

$$I_0/X_0 \xrightarrow{s} I_1/X_1$$

La cantidad de información contenida en la señal S es:

$$I = I_0/X_0 - I_1/X_1 \quad [3]$$

Consideremos el siguiente ejemplo: sólo se dispone del antecedente que una mujer de 60 años acude a tomarse una radiografía de fémur por aumento de volumen en el tercio distal del muslo. Supongamos que se piensa como posibles diagnósticos *a priori*: fractura, metástasis, osteosarcoma, osteomielitis, encondroma, osteocondroma y tumor de células gigantes y que se asigna a cada uno de estos posibles diagnósticos las siguientes probabilidades respectivamente (p_i): 0,25; 0,28; 0,22; 0,08; 0,03; 0,08 y 0,06. Ante esta pregunta (P: el diagnóstico) la incerteza es:

$$I_0/X_0 = -(0,25 \log_2 0,25 + 0,28 \log_2 0,28 + \dots + 0,06 \log_2 0,06) \\ = 2,473 \text{ Bits}$$

Supongamos ahora que se tomó la radiografía de la [Figura 1](#) (la señal: S), y que después de un examen minucioso se asignan las siguientes probabilidades respectivamente: 0; 0,025; 0,025; 0; 0,05; 0,8 y 0,1. Entonces después de la señal se está en un estado de incerteza $I_1/X_1 = -(0,025 \log_2 0,025 + 0,025 \log_2 0,025 + \dots + 0,1 \log_2 0,1) = 1,072$ Bits. De tal manera que para este observador la cantidad de información contenida en la radiografía es: $iI = 2,473 - 1,072 = 1,401$ Bits. Supongamos que otro observador hubiera asignado igual probabilidad a cada diagnóstico antes de la radiografía (incerteza o ignorancia completa) y por tanto para él $I_0/X_0 = 2,807$ Bits y que, después de ver la imagen, hubiera llegado a la certeza absoluta de que se trataba de un osteocondroma ($I_1/X_1 = 0$) y por lo tanto para este observador la cantidad de información contenida en la radiografía sería $iI = 2,807$ Bits.



Figura 1: Radiografía de femur con una lesión.

Así, la información contenida en una imagen no sólo es diferente para cada principio físico usado en obtenerla, sino que además es dependiente del estado de conocimiento del observador. Sin embargo, si se llega a un examen de imagen con un diagnóstico presuntivo altamente probable y éste se confirma con la imagen, el flujo de información es muy bajo (la imagen no aportó nada nuevo). A la inversa, si *a priori* se llega en total ignorancia y la imagen sugiere un

diagnóstico con alta probabilidad, entonces el flujo de información es alto.

Inferencia bayesiana. En el análisis de una imagen médica siempre va implícita al menos una pregunta básica: ¿a qué patología corresponde?, o ¿cuál es su diagnóstico? Esto obliga en el proceso de informe de una imagen a tomar una decisión que a menudo inconscientemente incorpora el teorema de Bayes¹² de gran aplicación en medicina y ciencias biológicas^{2-4,13-16}. Matemáticamente éste se puede enunciar así: dado un evento B (una lesión o imagen elemental) y una partición (A_i) del espacio muestral (conjunto exhaustivo de posibles diagnósticos), la probabilidad de A_i dada la ocurrencia de B (la probabilidad de un determinado diagnóstico dada la imagen) es:

$$P(A_i/B) = P(B/A_i) \cdot P(A_i) / \sum_j P(B/A_j) \cdot P(A_j) \quad [4]$$

Este teorema nos muestra que en toda decisión se deben tener en cuenta dos factores: 1) las probabilidades *a priori* (o frecuencias relativas: $P(A_j)$) de las posibles respuestas o diagnósticos (conocimiento epidemiológico), y 2) las probabilidades condicionales que tiene cada respuesta (diagnóstico) de producir determinado evento o imagen ($P(B/A_j)$) (conocimiento de la especialidad).

Para ver esto más claro volvamos al ejemplo anterior, algo más detallado y con sólo 4 posibles diagnósticos: fractura (F), osteosarcoma (OS), osteocondroma (OC) y tumor de células gigantes (TCG) con probabilidades relativas a priori de ocurrencia $P(F) = 0,5$, $P(OS) = 0,3$, $P(OC) = 0,1$ y $P(TCG) = 0,1$ y la siguiente historia: mujer de 60 años, que nota aumento de volumen indoloro en la cara interna del muslo desde hace años.

Consideremos además las siguientes situaciones:

- a) Observador completamente ignorante,
- b) Observador informado al que se le cuenta la historia y después ve la imagen, y
- c) Observador informado al que se le muestra primero la imagen y después se le cuenta la historia.

a) El primer observador es totalmente ignorante en cuanto a medicina.

Antes que le muestren la imagen atribuye la misma probabilidad de ocurrencia a todos los diagnósticos ($1/4$), encontrándose en un estado de incerteza $I_0/X_0 = \log_2 4 = 2$ Bits. Se le muestra la imagen y, como no entiende nada, sigue atribuyendo las mismas probabilidades permaneciendo en un estado de incerteza $I_1/X_1 = 2$ Bits. Entonces para este observador el flujo de información proveniente de la imagen fue $x_1 = 0$ Bits. Después se le cuenta la historia clínica, y como tampoco sabe nada de clínica, atribuye las mismas probabilidades permaneciendo en

un estado de incerteza $I_{IH}/X_{IH} = 2$ Bits y el flujo de información proveniente de la historia después de ver la imagen es $x_{IH} = 0$ Bits.

b) El segundo observador es un radiólogo informado.

Este asigna probabilidades *a priori* de acuerdo a sus conocimientos epidemiológicos o de experiencia previa, por ejemplo: $P(F) = 0,5$, $P(OS) = 0,3$, $P(OC) = 0,1$ y $P(TCG) = 0,1$, por lo que se encuentra en un estado de incerteza $I_0/X_0 = -[0,5 \log_2 0,5 + \dots] = 1,685$ Bits. Cuando se le muestra la radiografía repasa mentalmente las posibilidades pensando si fuera un osteosarcoma la probabilidad de tener esta imagen sería $P(I/OS)$, si fuera una fractura $P(I/F)$, etc. Finalmente asigna, por ejemplo: $P(I/F) = 0,01$; $P(I/OS) = 0,02$; $P(I/OC) = 0,9$ y $P(I/TCG) = 0,2$. De esta manera por el teorema de Bayes:

La probabilidad de tener una fractura dada la imagen ($P(F/I)$) es:

$$P(F/I) = \frac{P(I/F) P(F)}{P(I/F) P(F) + P(I/OS) P(OS) + P(I/OC) P(OC) + P(I/TCG) P(TCG)}$$

$$= 0,005/0,121 = 0,0413$$

y, en forma análoga

$$P(OS/I) = 0,0495, P(OC/I) = 0,7438 \text{ y } P(TCG/I) = 0,1653$$

Entonces nuestro radiólogo ahora se encuentra en un estado de incerteza $I_1/X_1 = -[0,0413 \log_2 0,0413 + \dots] = 1,151$ Bits por lo que el flujo de información proveniente de la imagen es $i_1 = 1,685 - 1,151 = 0,534$ Bits.

Si ahora se le cuenta la historia tiene como probabilidades *a priori*: $P(F/I) = 0,0413$, $P(OS/I) = 0,0495$, $P(OC/I) = 0,7438$ y $P(TCG/I) = 0,1653$ pues ya conoce la imagen (I). Entonces medita ¿cuál es la probabilidad de tener esta historia si esta imagen corresponde a una fractura ($P(H/F^I)$)? y asigna por ejemplo $P(H/F^I) = 0$; $P(H/OS^I) = 0$; $P(H/OC^I) = 0,99$ y $P(H/TCG^I) = 0,001$. De esta manera ahora por el teorema de Bayes, la probabilidad de fractura, dados la imagen y la historia es:

$$P(F/H^I) = \frac{P(H^I/F) P(F)}{P(H^I/F) P(F) + P(H^I/OS) P(OS) + P(H^I/OC) P(OC) + P(H^I/TCG) P(TCG)}$$

Por la conocida igualdad $P(A^B/C) \cdot P(C)^B = P(A/B^C) \cdot P(B^C)$, podemos escribir:

$$P(F/H^I) = \frac{P(H/F^I) P(F^I)}{P(H/F^I) P(F^I) + P(H/OS^I) P(OS^I) + P(H/OC^I) P(OC^I) + P(H/TCG^I) P(TCG^I)}$$

$$\begin{aligned}
& +P(H/TCG^I) P(TCG^I)] \\
& = P(H/F^I) P(F/I).P(I)/[P(H/F^I) P(F/I).P(I)+P(H/OS^I) P(OS/I).P(I)+ \\
& + P(H/OC^I) P(OC/I).P(I)+P(H/TCG^I) P(TCG/I).P(I)] \\
& = P(H/F^I) P(F/I)/[P(H/F^I) P(F/I)+P(H/OS^I) P(OS/I) + P(H/OC^I) \\
& P(OC/I)+ \\
& + P(H/TCG^I) P(TCG/I)]
\end{aligned}$$

Aplicando esta fórmula para cada diagnóstico se obtiene:

$P(F/H^I) = 0$; $P(OS/H^I) = 0$; $P(OC/H^I) = 0,9997755$ y $P(TCG/H^I) = 0,0002244$, llegando a un estado de incerteza de $I_{IH}/X_{IH} = 0,003046$ Bits y entonces el flujo de información desde la historia es $i_{IH} = 1,151 - 0,003046 = 1,148$ Bits.

c) *El tercer observador es otro radiólogo informado.*

Este, igual que antes, asigna probabilidades *a priori* de acuerdo a sus conocimientos: $P(F) = 0,5$, $P(OS) = 0,3$, $P(OC) = 0,1$ y $P(TCG) = 0,1$, por lo que, igual que antes, se encuentra en un estado de incerteza $I_1/X_0 = -[0,5 \log_2 0,5 + \dots] = 1,685$ Bits. Ahora en cambio, se le cuenta primero la historia. Entonces repasa mentalmente las posibilidades pensando si fuera un osteosarcoma la probabilidad de tener esta historia sería $P(H/OS)$. Finalmente asigna con fines comparativos, números similares a los anteriores, por ejemplo: $P(H/F) = 0$; $P(H/OS) = 0,009$; $P(H/OC) = 0,99$ y $P(H/TCG) = 0,001$. De esta manera por el teorema de Bayes:

La probabilidad de tener una fractura dado la historia ($P(F/H)$) es:

$$\begin{aligned}
P(F/H) &= P(H/F) P(F)/[P(H/F) P(F)+P(H/OS)P(OS)+ \\
& P(H/OC) P(OC)+P(H/TCG) P(TCG)] \\
&= 0/0,1018 = 0;
\end{aligned}$$

$$P(OS/H) = 0,0265; P(OC/H) = 0,972 \text{ y } P(TCG/H) = 0,001.$$

Entonces nuestro radiólogo ahora se encuentra en un estado de incerteza $I_H/X_H = 0,1886$ Bits por lo que el flujo de información proveniente de la historia es $i_H = 1,685 - 0,1886 = 1,496$ Bits.

Si ahora se le muestra la imagen tiene como probabilidades *a priori*: $P(F/H) = 0$, $P(OS/H) = 0,0265$, $P(OC/H) = 0,972$ y $P(TCG/H) = 0,001$ pues ya conoce la historia.

Entonces medita ¿cuál es la probabilidad de tener esta imagen si esta historia corresponde a una fractura ($P(I/F^H)$)? y asigna por ejemplo $P(I/F^H) = 0,01$; $P(I/OS^H) = 0,02$; $P(I/OC^H) = 0,9$ y $P(I/TCG^H)$

= 0,2. De esta manera, en forma análoga a la anterior, ahora por el teorema de Bayes:

$$P(F/I \wedge H) = P(I/F \wedge H) P(F/H) / [P(I/F \wedge H) P(F/H) +$$

$$P(I/OS \wedge H) P(OS/H) + P(I/OC \wedge H)$$

$$P(OC/H) + P(I/TCG \wedge H) P(TCG/H)]$$

$P(F/I \wedge H) = 0$; $P(OS/I \wedge H) = 0,0006$; $P(OC/I \wedge H) = 0,999$ y $P(TCG/I \wedge H) = 0,00023$, llegando a un estado de incerteza de $IHI/XHI = 0,01064$ Bits y entonces el flujo de información desde la imagen es $I_{HI} = 0,1886 - 0,01064 = 0,17796$ Bits.

Este proceso encadenado que conduce a una decisión, en nuestro caso un diagnóstico, corresponde al proceso denominado inferencia bayesiana¹⁶. En él, podemos notar que la cantidad de información que se puede extraer de la imagen es dependiente de:

a) Estado de conocimiento del observador, que se puede descomponer en dos: 1) conocimiento epidemiológico o experiencia previa (probabilidades *a priori*) y 2) probabilidades condicionales de posibles diagnósticos, dada una imagen. Este último factor es de vital importancia pues corresponde al conocimiento propio de la especialidad.

b) Del orden en que se presenten los eventos. No es lo mismo conocer la historia antes que la imagen, que lo contrario. Es importante hacer notar que la mayor cantidad de información proveniente de la imagen se obtiene observando primero la imagen y conociendo después los antecedentes clínicos, lo que es un hecho importante a la hora de desarrollar estrategias de informe, sobre todo cuando los antecedentes son incompletos.

MEDICINA BASADA EN LA EVIDENCIA

Desde la perspectiva de la medicina basada en la evidencia, una imagen radiológica constituye un examen diagnóstico que debe ser analizado en este sentido. Ojalá se dispusiera de parámetros como la sensibilidad, especificidad, valores predictivos y el cociente de verosimilitud ("*likelihood ratio*"), entre otros. En el caso de las imágenes médicas, sin embargo, esto se hace más difícil porque los exámenes radiológicos no salen simplemente positivos o negativos, sino que existen numerosas posibilidades, a menudo no disjuntas, de diagnósticos y además sometidas a interpretación²⁻⁴. Sin embargo, es posible establecer ciertas analogías de interés.

Si un enfermo tiene a priori una probabilidad $P(E)$ de tener cierta enfermedad E , o de otra manera, tiene una chance a priori ("*odds*")

$$O_o = P(E)/(1-P(E)) \quad [5]$$

de tener esta enfermedad. Entonces, después de un examen cuyo resultado fue positivo (+), la probabilidad es ahora por el teorema de Bayes:

$$P(E/+) = P(+/E).P(E)/[P(+/E).P(E)+P(+/E^c).P(E^c)] \quad [6],$$

donde E^c es el complemento de E (no tener la enfermedad) y obviamente $P(E^c) = 1-P(E)$.

En esta expresión $P(+/E)$ representa la sensibilidad (S) del examen para la enfermedad E y $P(+/E^c) = 1-P(-/E^c) = 1-S_p$, donde S_p es la especificidad del examen para la enfermedad E .

Por otra parte, si llamamos cuociente de verosimilitud (*likelihood ratio*) a la razón:

$$LR+ = P(+/E)/P(+/E^c) = S/(1-S_p) \quad [7]$$

si el examen es positivo y a la razón:

$$LR- = P(-/E)/P(-/E^c) = (1-S)/S_p \quad [8]$$

si el examen es negativo, entonces es fácil demostrar que:

$$P(E/+) = S.O_o/[S.O_o+(1-S_p)] \quad [9],$$

y que en general la posibilidad a *posteriori* ($O_p = P(E+)/P(E^c/+)$) se puede escribir como:

$$O_p = LR.O_o \quad [10].$$

Así, se puede interpretar el coeficiente de verosimilitud como un factor potenciador de la posibilidad a priori de tener cierta enfermedad. Además este coeficiente es equivalente al cuociente entre la proporción de verdaderos positivos ($P(+/E)$) y la proporción de falsos positivos ($P(+/E^c)$). Una forma alternativa de evaluar lo mismo es analizar el gráfico de las proporciones de falsos positivos en la abscisa *versus* la proporción de verdaderos positivos en la ordenada: curva ROC ("Receiver Operating Factor") de un examen^{6,7}. Esta forma de análisis más cualitativo, ha demostrado cierta utilidad en la toma de decisiones en medicina nuclear¹⁷.

Existe una analogía evidente entre las ecuaciones derivadas en nuestros anteriores ejemplos y esta derivación, útil para una medicina basada en evidencias.

En el caso de la radiología, se tiene para cada posible patología una sensibilidad específica, por ejemplo la probabilidad de osteosarcoma dada la imagen de exostosis, o la de tumor de células gigantes dada la imagen de exostosis, etc. Así en el caso de nuestro ejemplo la probabilidad de osteocondroma, dada la imagen:

$$P(OC/I) = P(I/OC) P(OC)/[P(I/F) P(F)+P(I/OS)$$

$$P(OS)+P(I/OC) \quad P(OC)+P(I/TCG) \quad P(TCG)]$$

se puede expresar como:

$$P(OC/I) = P(I/OC).P(OC)/[P(I/OC)$$

$$P(OC)+P(I/OCc) \quad P(OCc)]$$

$$= S_{oc}.P(OC)/[S_{oc}.P(OC)+(1-P(OC))(1-Sp_{oc})]$$

$$= S_{oc}.O_o/[S_{oc}.O_o+(1-Sp_{oc})]$$

y finalmente:

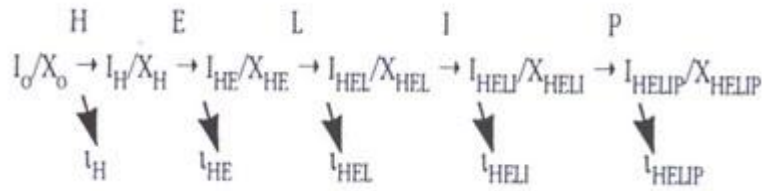
$Opoc = LR_{oc}.O_o$, donde el subíndice "oc" indica la especificidad del parámetro para osteocondroma. Es muy interesante verificar que en el ejemplo que analizamos: $(1-Sp_{oc}) = P(I/OS) \quad P(OS)+P(I/F) \quad P(F)+P(I/TCG) \quad P(TCG)/[P(OS)+P(F)+P(TCG)]$.

De tal manera que para una imagen dada, conociendo el conjunto de patologías que pueden originarla, sería posible tener los cuocientes de verosimilitud y entonces conociendo la posibilidad *a priori* (o estimándola a través de $O_o = \text{prevalencia}/(1-\text{prevalencia})$) se podrían obtener las chances a posteriori para una decisión adecuada.

Por ejemplo, para el caso del ejemplo b), el radiólogo asigna una posibilidad *a priori* O_{oc} de tener un osteocondroma $O_{oc} = P(OC)/(1-P(OC)) = 0,1/(1-0,1) = 1/9$ (uno a nueve). Además, $S_{oc} = P(I/OC) = 0,9$ y $1-Sp_{oc} = 0,0344$, indicando una especificidad $Sp_{oc} = 0,97$ para osteocondroma. De esta manera: $LR_{oc} = S_{oc}/(1-Sp_{oc}) = 0,9/(1-0,97) = 26,16$, y entonces la chance ("odds") a posteriori para un osteocondroma es ahora $Opoc = LR_{oc}.O_{oc} = 0,11.26,16 = 2,91$ (tres a uno). Un $LR_{oc} = 26,16$ indica en este examen, que los verdaderos positivos serían 26,16 veces más frecuentes que los falsos positivos para osteocondroma, lo que hace a la radiografía un buen examen para este diagnóstico específico.

DISCUSIÓN

El proceso diagnóstico completo, consiste en pasar desde una incerteza máxima hasta una incerteza mínima, ojalá 0, pasando por una serie de etapas: historia (H), examen físico (E), laboratorio (L), imágenes (I), anatomía patológica (P). En este proceso diagnóstico se debe procurar llegar a una incerteza mínima, maximizando la cantidad de información extraída en cada etapa. Dicha cantidad de información extraída en cada etapa va reduciendo paulatinamente la incerteza final que es en definitiva la que importa. Podemos representar el proceso diagnóstico así:



El o los especialistas que intervienen en cada etapa diagnóstica en general no conocen completamente los antecedentes de las etapas anteriores, por lo que deben procurar desarrollar estrategias que conduzcan a la maximización de la extracción de información en la etapa en que participan e intentar disponer de la máxima cantidad de antecedentes posibles.

El proceso de informar debería seguir una metodología constante, que podríamos resumir en tres etapas:

- 1) Fase descriptiva o anatómica.
- 2) Fase analítica o semiológica.
- 3) Fase integrativa o médica (conclusión).

La fase descriptiva o anatómica consiste en la descripción general de las estructuras visibles en la imagen: posición, variaciones en la forma, desplazamientos, tracciones, etc. Esta va seguida por la fase semiológica cuyo objetivo es el reconocimiento de signos (lesiones elementales) y patrones (configuraciones de signos) que orientan a algún diagnóstico.

La fase más importante del proceso es la fase integrativa que se expresa en la conclusión escrita. En esta fase se integra la información obtenida en las dos primeras para proponer una hipótesis diagnóstica. Es la fase razonada o médica del informe en la cual además, cuando es posible, se realiza la integración clínico-radiológica. Obedece a una lógica hipotética deductiva, planteando proposiciones lógicas del tipo "si p, entonces q" basados, aunque inconscientemente, en inferencia bayesiana.

Esta etapa consta entonces de tres etapas, una basada exclusivamente en la imagen, la otra en los antecedentes y la tercera en ambos. Como hemos visto la cantidad de información que se puede extraer de la imagen es sensible al orden. La mayor cantidad de información proveniente de la imagen se obtiene analizando primero la imagen y después los antecedentes clínicos. Considerando que un objetivo del proceso diagnóstico es obtener la mayor cantidad de información en cada etapa, debería observarse primero la imagen y después obtener los antecedentes clínicos. Esto no implica desconocer la historia sino considerar que ésta debe ser conocida después de una primera aproximación proveniente exclusivamente de la imagen. Se debe intentar conocer la mayor cantidad de antecedentes clínicos, pues junto al objetivo de extraer la mayor cantidad de información en cada

etapa, existe el objetivo principal y último: reducir la incerteza final ojalá a cero.

Para una adecuada toma de decisiones en medicina, es necesario que exista investigación previa que haya establecido las probabilidades que tienen las patologías de producir determinada imagen, obtenida con determinada técnica, con su sensibilidad, especificidad y los cuocientes de verosimilitud. En este sentido las ecuaciones adelantadas en este artículo orientan la investigación radiológica diagnóstica en los siguientes pasos:

- 1) Establecer el conjunto de patologías que pueden producir determinada imagen "signo" o patrón.
- 2) Establecer las oportunidades *a priori* de cada una de ellas. Si no se tienen datos usar las prevalencias.
- 3) Establecer las probabilidades condicionales de cada patología de producir la imagen, signo o patrón.
- 4) En base a ellas determinar la sensibilidad, especificidad y la razón de verosimilitud (LR) del examen.

En base a este conocimiento, sería posible clasificar cuantitativamente la utilidad de cada examen y sería posible tomar una adecuada decisión expresada en la conclusión: la fase final del informe radiológico.

En esta última etapa se hace una proposición diagnóstica, ojalá basada en la evidencia de imagen y antecedentes de literatura (ojalá cuantitativos) que puede ser desde sindromática (i.e. proceso fibrorretráctil) hasta etiológica cuando los elementos semiológicos presentes en la imagen así lo permiten. Haciendo un paralelo con el método científico de Popper¹⁸, la fase de la conclusión corresponde a la fase de la generación de hipótesis, dejando la fase de la refutación o prueba de hipótesis al médico tratante.

REFERENCIAS

1. Ortega D, Tapia A, Ortega X, Muñoz S. El informe radiológico: la opinión de los clínicos. *Rev Chil Radiol* 2000; 6: 151-5. [[Links](#)]
2. Sackett DL, Strauss SE, Richardson WS, Rosenberg W, Haynes RB. *Medicina basada en la evidencia*. Harcourt, Churchill Livingstone 2ª Ed. 2001. [[Links](#)]
3. Black WC, Armstrong P. Communicating the significance of radiologic test results: the likelihood ratio. *AJR* 1986; 147: 1313-8. [[Links](#)]
4. Gurney JW. Determining the likelihood of malignancy in solitary pulmonary nodules with bayesian analysis, Part I. Theory. *Radiology* 1993; 186: 405-13. [[Links](#)]

5. Raiffa H. *Decision Analysis. Introductory lectures on choices under uncertainty*. Adison Wesley, Massachusetts, 1970. [[Links](#)]
6. Webb S. *The physics of medical imaging*. Medical Science Series. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1988. [[Links](#)]
7. Green DM, Swets JA. *Signal detection theory and psychophysics*. New York, Wiley, 1966. [[Links](#)]
8. Fraser RG, Paré JA, Paré PD, Fraser RS, Genereux GP. *Diagnosis of diseases of the chest*. WB Saunders Company, Philadelphia, 1988. [[Links](#)]
9. Shannon CE. *Mathematical theory of communication*. Bell System Tech 1948; 27: 379-658. [[Links](#)]
10. Blackwell D. Information Theory. *Engineering Ext Ser* 1961; II: 182-94. [[Links](#)]
11. Bradbury JW, Vehrencamp SL. *The ammount of information in Principles of animal communication*. Sinawer Associates Eds. 1998. [[Links](#)]
12. Bayes T. Essay towards solving a problem in the doctrine of chances. *Phil Trans Roy Soc London* 1763; 53: 370-418 (reimpreso en *Biometrika* 1958; 45: 293-315). [[Links](#)]
13. Bustamante R, Canals M. Dispersal quality in plants: how to measure efficiency and effectiveness of a seed disperser. *Oikos* 1995; 73: 133-5. [[Links](#)]
14. Canals M, Bustamante R, Ehrenfeld M, Cattán PE. Assessing the impact of disease vectors on animal populations. *Acta Biotheoretica* 1999; 46: 337-45. [[Links](#)]
15. Lagos N, Castilla JC. Inferencia estadística bayesiana en ecología: un ejemplo del uso en una reserva marina chilena. *Rev Chil Hist Nat* 1997; 70: 565-75. [[Links](#)]
16. Howson C, Urbach P. Bayesian reasoning in science. *Nature* 1991; 350: 371-4. [[Links](#)]
17. Houston AS, Sharp PF, Tofts PS, Diffey BL. A multi-centre comparison of computer assisted image processing and display methods in scintigraphy. *Phys Med Biol* 1979; 24: 547-58. [[Links](#)]
18. Popper KR. *The logics of scientific discovery*, Hutchinson, London. 1959. [[Links](#)]

Agradecimientos

El autor agradece la revisión y las críticas de dos revisores anónimos, que ayudaron a mejorar este manuscrito.

Correspondencia a: M Canals. Facultad de Ciencias, Universidad de Chile, Casilla 653, Santiago, Chile. Fax: 56 (2) 272 7363. E-mail: mcanals@abello.dic.uchile.cl