

Il ruolo dell'incertezza nelle misure ambientali e nel loro confronto con i limiti

Alessandro Ferrero

Politecnico di Milano – Dip. di Elettrotecnica, Piazza L. da Vinci 32 – 20133 Milano, alessandro.ferrero@polimi.it

RIASSUNTO

Nella quasi totalità delle applicazioni di misura, l'impiego finale del risultato della misura è il confronto con un valore di soglia per stabilire se la grandezza oggetto della misura rientri in limiti di specifica. L'esecuzione di tale confronto è solo apparentemente immediata, dal momento che ogni risultato di misura è caratterizzato da incertezza e non tenerne conto può portare a decisioni errate. Nel caso di misure ambientali, in cui il superamento dei limiti può comportare rischi per la salute pubblica, diventa essenziale individuare il legame tra incertezza di misura e rischio sociale accettabile. In questo lavoro, partendo da una breve analisi della vigente Normativa tecnica, si intende discutere il legame tra incertezza di misura e rischio e mostrare come, nel caso specifico delle misure ambientali, i limiti di legge potrebbero non essere in grado di cautelare la salute pubblica se non viene anche correttamente considerata l'incertezza di misura e definito un rischio accettabile di superamento del limite.

DECISIONI IN PRESENZA DI INCERTEZZA

La finalità ultima di un'operazione di misura, qualunque sia il campo in cui viene eseguita, è il confronto del valore misurato con una soglia: in campo scientifico è usualmente il confronto con un valore teorico atteso, in campo tecnico è il confronto con un limite di specifica, in campo clinico il confronto con valori limite considerati non patologici, in campo ambientale con limiti di salvaguardia dell'ambiente e della salute pubblica, solitamente imposti per legge.

Tale operazione è solo apparentemente banale. Infatti, se la soglia viene usualmente caratterizzata da un singolo valore numerico, non altrettanto si può dire del risultato di misura. Infatti, in accordo con l'attuale normativa (UNI CEI, 2000), il risultato di una misura deve essere accompagnato anche dalla valutazione dell'incertezza di misura.

Come è noto, l'incertezza di misura esprime e quantifica l'incompletezza dell'informazione che il risultato di misura fornisce sul misurando, consentendo di costruire, attorno al valore misurato, un intervallo di fiducia in cui si ritiene possa cadere il valore del misurando con un dato livello di fiducia.

La prima, ovvia conseguenza di quanto esposto è che il risultato di una misura non può mai essere espresso con un singolo valore numerico, perché tale singolo valore non è, da solo, in grado di fornire alcuna informazione sulla probabilità che il misurando ha di assumere proprio tale valore. Quindi, il risultato di una misura deve essere sempre espresso, in modo esplicito o implicito, attraverso la dichiarazione dell'incertezza tipo, come un opportuno intervallo di fiducia con associato livello di fiducia.

La seconda, forse meno ovvia conseguenza, è che tutte le volte che è necessario confrontare il risultato della misura con una data soglia, questo confronto non è un semplice confronto fra una coppia di valori numerici, bensì il confronto tra un singolo valore numerico – la soglia – e un intervallo di valori – il risultato della misura – entro il quale si ritiene possa cadere il valore del misurando con un dato livello di fiducia.

Il corretto confronto tra risultato di misura e soglia comporta quindi una serie di problematiche non ancora completamente considerate dalla Normativa e dagli Organismi a vario titolo deputati a stabilire i limiti di accettabilità o conformità che concorrono alla definizione delle soglie.

Innanzitutto è necessario definire le modalità di confronto, che non sono immediate, soprattutto quando la soglia cade all'interno dell'intervallo definito a partire dall'incertezza.

Inoltre, è necessario considerare che, dato un valore di incertezza e definito a partire da tale valore un opportuno intervallo di fiducia attorno al valore misurato, esiste sempre una probabilità residua che il valore del misurando cada all'esterno di tale intervallo. E' quindi non nullo il rischio che il valore del misurando possa oltrepassare la soglia con cui è stato confrontato anche qualora la soglia fosse esterna all'intervallo di fiducia definito.

Quantificare tale rischio non è sempre immediato, e la sua entità dipende dalle ipotesi considerate nel costruire l'intervallo di fiducia e nell'assegnargli il livello di fiducia. In tutti gli ambiti, come ad esempio quello delle misure ambientali, in cui il superamento di un limite di legge può comportare pericoli per la salvaguardia dell'ambiente stesso e, soprattutto, per la salute pubblica, la corretta valutazione di tale rischio diventa essenziale. Altrettanto importante è anche saper seguire il percorso opposto: dato un valore limite ed un valore di rischio accettabile di superamento del limite, nota l'incertezza con cui è possibile eseguire le misure, dove deve essere posta la soglia affinché il rischio di superamento del limite sia inferiore al rischio accettabile?

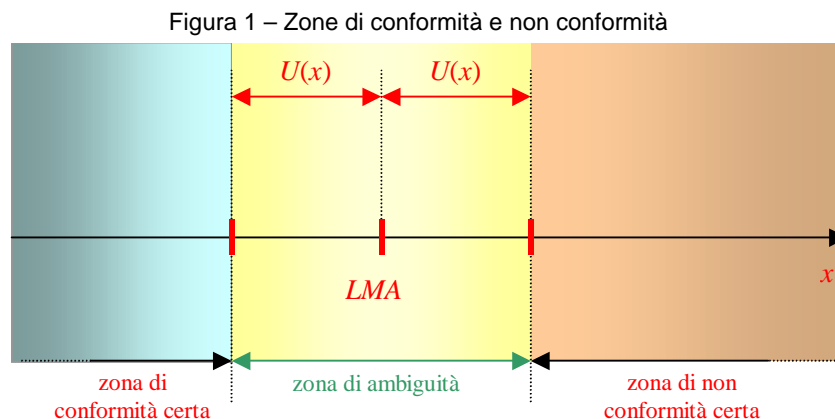
Nel seguito del lavoro si intende proporre una breve analisi critica di quanto suggerito dalla Normativa tecnica vigente per l'esecuzione dei confronti di un valore misurato con una soglia, considerando l'incertezza di misura nella procedura di confronto. Quindi si analizzerà il rischio di decisione errata e lo si metterà in

relazione con l'incertezza di misura, per poi proporre un approccio alla definizione delle soglie di confronto che assicurino, data l'incertezza di misura, di non oltrepassare un dato valore di rischio massimo di superamento della soglia.

I CONFRONTI NELLA NORMATIVA VIGENTE

Attualmente, gli unici documenti normativi che considerano l'incertezza di misura nel confronto tra il risultato della misura e una soglia e danno indicazioni su come operare sono la UNI EN ISO 14253-1:2001 (ISO, 2001) e la ASME B89.7.3.1:2001 (ASME, 2001). La filosofia seguita è molto simile e pertanto si accennerà solamente a quanto prescritto in (ISO, 2001), non essendo questa la sede per soffermarsi sugli aspetti particolari che differenziano i due approcci.

In breve, la Norma prevede che, una volta definito un valore di Limite Massimo Ammissibile (*LMA*) per una grandezza x , stimata l'incertezza estesa $U(x)$ con cui x è stata misurata, si definisca una zona di ambiguità, centrata attorno a *LMA* e di ampiezza pari a $2U(x)$, che separi la zona di conformità certa da quella di non conformità certa, come mostrato in Fig. 1.



Approccio seguito dalla Norma ISO 14253-1 per il confronto con un Limite Massimo Ammissibile (*LMA*). È ritenuto conforme tutto ciò che, in base al risultato della misura ed all'incertezza stimata, è inferiore a $LMA - U(x)$, e non conforme tutto ciò che è superiore a $LMA + U(x)$.

Il modello decisionale proposto dalla ISO EN 14253-1 prevede che le eventuali azioni restrittive abbiano luogo solo se il risultato della misura cade nella zona di non conformità certa. La parte in causa, per dimostrare che la quantità in oggetto non eccede *LMA* dovrà dimostrare che il valore misurato cade all'interno della zona di conformità certa, accollandosi l'onere di misure con incertezza minore.

Questo modello decisionale si è mostrato particolarmente efficiente (anche da un punto di vista economico, accollando l'onere del miglioramento della qualità metrologica della misura alla parte interessata a dimostrare la conformità o non conformità del misurando a *LMA*) nel campo dimensionale per il quale è stato pensato.

Nel caso in cui, però, *LMA* sia associato ad un ipotetico rischio, come spesso avviene in campo ambientale, basti pensare ad esempio ai limiti posti per le polveri sottili in città, il modello decisionale sopra esposto perde drasticamente efficacia, perché non è in grado di porre in relazione diretta rischio, *LMA* ed incertezza e può quindi comportare o un rischio residuo troppo elevato o riduzioni di *LMA* non giustificabili, né dal punto di vista tecnico, né da quello sociale ed economico.

LA RELAZIONE RISCHIO – INCERTEZZA

Come si è già accennato all'inizio, è sempre possibile, a partire dall'incertezza, definire, attorno al risultato della misura, un intervallo di fiducia entro il quale si suppone possa cadere, con un dato livello di fiducia, il valore del misurando.

Operativamente, si assume come semi ampiezza di questo intervallo il valore dell'incertezza estesa U , ottenuta moltiplicando per un opportuno fattore di copertura K l'incertezza tipo $u(x)$ associata al valore misurato x (UNI CEI 2000). A questo intervallo può essere associato un livello di fiducia solamente se è nota o ipotizzabile la funzione densità di probabilità $p(x)$ con cui i possibili valori attribuibili al misurando si distribuiscono attorno al valore misurato x .

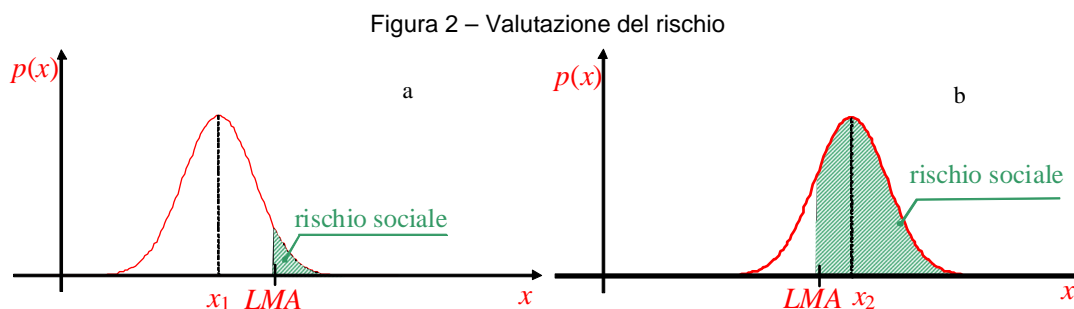
Quindi, ad ogni risultato di misura x è necessario associare una funzione densità di probabilità $p(x)$. Data questa funzione densità di probabilità, è possibile stabilire la probabilità che il valore del misurando superi una data soglia.

A titolo di esempio, si supponga di avere due situazioni: una in cui il valore misurato x_1 sia minore di LMA e cada nella zona di conformità certa, ed una in cui il valore misurato x_2 sia maggiore di LMA , pur senza entrare nella zona di non conformità certa. In entrambi i casi può permanere una probabilità che l'effettivo valore della grandezza x superi il valore ammesso LMA . Tale probabilità è matematicamente espressa da:

$$P\{x \geq LMA\} = \int_{LMA}^{\infty} p(x) dx \quad (1)$$

e può essere considerata come espressione del "rischio sociale" che la grandezza superi il limite di legge.

Graficamente questo rischio è dato dall'area sottesa dalla funzione densità di probabilità, come mostrato in Fig. 2 a ($x_1 < LMA$) e in Fig. 2 b ($x_2 > LMA$).



Le due figure indicano come può essere quantificato il rischio che il valore del misurando possa essere superiore a LMA , sia nel caso in cui il risultato di misura cada nella zona di conformità certa (a), sia nel caso in cui il risultato di misura non cada nella zona di non conformità certa (b).

Come si vede, esiste sempre un rischio residuo che il valore del misurando possa superare LMA , anche se il valore misurato cade nella zona di conformità certa. Assai più grave è la situazione in cui il valore misurato cade nella zona di ambiguità perché, secondo l'approccio proposto in (ISO, 2001), in questo caso non scatterebbe alcun limite restrittivo.

E' utile far riferimento ad un esempio numerico per inquadrare il problema in tutta la sua potenziale gravità. A tale scopo, viene ripreso l'esempio citato da Sartori (Sartori, 1999) e ripreso da D'Antona (D'Antona, 2000), perché estremamente significativo.

Si supponga che, per legge, il limite LMA di concentrazione x di una sostanza nell'acqua sia di 50 mg/l. Si supponga che lo strumento a disposizione dell'ARPA per eseguire la misura garantisca una incertezza tipo $u(x) = 5$ mg/l, a cui corrisponde un'incertezza estesa (con fattore di copertura $K = 2$) $U(x) = 10$ mg/l. In base alla (ISO, 2001), la zona di non conformità certa include tutti i valori di concentrazione misurati maggiori di $50 + 10 = 60$ mg/l. Quindi, se l'ARPA rilevasse, con tale strumento, una concentrazione massima di 60 mg/l non scatterebbe nessun provvedimento restrittivo.

Quale sarebbe però la probabilità $P\{x \geq LMA\}$ di superare il limite LMA ? Come si è visto, tale probabilità dipende dalla funzione densità di probabilità individuata per descrivere la distribuzione dei possibili valori del misurando attorno al risultato della misura. Supponiamo, in prima battuta, di avere una distribuzione normale (congruente con le ipotesi della GUM di fare riferimento al teorema del limite centrale nel caso di misure indirette). In questo caso si avrebbe:

$$P\{x \geq LMA\} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-K/2}^0 e^{-t^2} dt = 0.92 \quad (2)$$

Si potrebbe obiettare che non sempre è possibile ipotizzare una funzione densità di probabilità. In questo caso è ancora possibile stimare un limite minimo di rischio, indipendentemente dalla $p(x)$, dato da:

$$P\{x \geq LMA\} \geq 1 - \left[\frac{u(x)}{(LMA + U(x)) - LMA} \right]^2 = 1 - \left[\frac{u(x)}{U(x)} \right]^2 = 1 - \frac{1}{K^2} = 0.75 \quad (3)$$

Come si vede, il criterio decisionale proposto dalla Norma (ISO, 2001) lascia un rischio comunque superiore al 75% di avere un valore di concentrazione superiore al limite di legge: nel caso in cui la sostanza, in concentrazioni maggiori di quelle consentite, fosse pericolosa, la comunità non sarebbe adeguatamente tutelata.

Occorre però far notare che la comunità non sarebbe tutelata neppure in un altro caso, apparentemente molto meno critico. Si supponga infatti di essere in una situazione lievemente diversa, in cui l'ARPA abbia riscontrato il superamento del limite di legge. Si supponga anche che la misura effettuata dall'ARPA venga contestata. In questo caso, l'onere della misura è tutto sulle spalle del ricorrente e, sulla base della Norma considerata (ISO, 2001), il limite non si considererà superato solo se la nuova misura cadrà nella zona di

conformità certa. Si supponga che la misura venga effettuata dal ricorrente impiegando strumentazione diversa e più accurata di quella dell'ARPA, in modo tale da garantire incertezza tipo $u(x) = 1$ mg/l. Supponendo ancora una volta di applicare un fattore di copertura $K = 2$, si avrà, in questo caso, un'incertezza estesa $U(x) = 2$ mg/l. La condizione di maggior rischio sociale si ha quando il valore misurato cade sul limite della zona di conformità certa, pari a $50 - 2 = 48$ mg/l.

Infatti, ipotizzando di avere una funzione densità di probabilità normale, la probabilità che il valore del misurando sia superiore a LMA è data da:

$$P\{x \geq LMA\} = \frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{K/2} e^{-t^2} dt = 0.08 \quad (4)$$

Analogamente al caso precedente, anche in questo caso potrebbe non essere possibile ipotizzare una ben definita funzione densità di probabilità. E' però ancora possibile stimare un limite massimo di rischio, indipendentemente dalla $p(x)$, dato da:

$$P\{x \geq LMA\} \leq \left[\frac{u(x)}{LMA - (LMA - U(x))} \right]^2 = \left[\frac{u(x)}{U(x)} \right]^2 = \frac{1}{K^2} = 0.25 \quad (5)$$

Anche in questo caso, decisamente più a favore della comunità, rimane comunque un rischio di superamento del limite che può arrivare fino al 25%.

E' chiaro quindi che la normativa vigente non è sufficiente a garantire dai rischi di una decisione errata. Anche l'abbassamento dei limiti, con tutti i costi che questo comporta, potrebbe non essere sufficiente a fornire le garanzie cercate, dal momento che il rischio di decisione errata è, come si è visto, strettamente legato all'incertezza di misura dichiarata.

Vale quindi la pena porsi un'altra domanda: è sufficientemente cautelativo imporre un semplice limite, o è forse necessario imporre anche altri parametri?

UN POSSIBILE CRITERIO DI CONFRONTO ALTERNATIVO

Da quanto esposto nei paragrafi precedenti risulta con chiarezza il legame che intercorre tra incertezza di misura, forma della funzione distribuzione di probabilità assegnata alla distribuzione dei possibili valori del misurando attorno al risultato della misura e rischio residuo che il valore del misurando superi LMA , pur se il risultato di misura è inferiore a LMA diminuito dell'incertezza estesa.

Sembra quindi lecito chiedersi se sia opportuno adottare anche in campo ambientale, in cui molteplici sono le grandezze da misurare, molteplici i possibili metodi di misura e ampio il campo di variabilità dell'incertezza, gli stessi criteri proposti dalla Normativa vigente (ISO, 2001; ASME, 2001) per decidere sulla conformità a specifiche delle dimensioni geometriche, in cui le grandezze oggetto di misura e i metodi di misura sono molto più uniformi tra loro e le conseguenze di una decisione errata assai meno drammatiche.

A chi scrive sembra assai più opportuno adottare un criterio di confronto con i limiti che contempli, in modo esplicito, il rischio residuo che il misurando superi la soglia. Ovviamente, un tale criterio richiede che, oltre a fissare un valore limite massimo ammissibile (LMA), venga fissata anche una soglia massima di rischio sociale ammissibile (P_s).

Se vengono fissati entrambi questi valori limite, può allora essere adottato il criterio proposto da D'Antona (D'Antona, 2000), basato sulla teoria delle decisioni statistiche in condizioni di rischio (Piccinato, 1996).

Questo criterio, partendo dal vincolo che il rischio sociale deve comunque essere inferiore al valore massimo imposto P_s , definisce, sulla base dell'incertezza di misura dichiarata, la percentuale Δ_L di cui deve essere ridotto, rispetto a LMA , il valore di confronto.

Quindi, in assenza di ipotesi sulla funzione densità di probabilità, dalla (5) si ottiene:

$$P\{x \geq LMA\} \leq \left[\frac{u(x)}{\Delta_L} \right]^2 = P_s, \quad (6)$$

da cui è possibile ottenere Δ_L in funzione dell'incertezza tipo e del rischio massimo accettabile:

$$\Delta_L = \frac{u(x)}{\sqrt{P_s}} \quad (7)$$

Imponendo che Δ_L sia proporzionale all'incertezza tipo, si ottiene:

$$\Delta_L = K_{P_s} \cdot u(x),$$

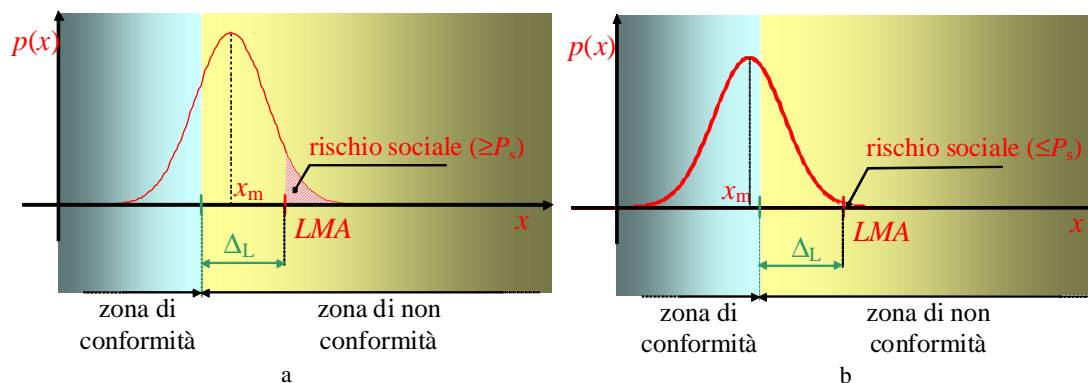
da cui, per la (7), si ottiene:

$$K_{P_s} = \frac{\Delta_L}{u(x)} = \frac{1}{\sqrt{P_s}} \quad (8)$$

che rappresenta la riduzione di LMA , normalizzata all'incertezza di misura, in funzione del rischio ammissibile.

Applicando questo criterio decisionale si viene ad avere una ridefinizione dinamica, in funzione dell'incertezza di misura, delle zone di conformità e di non conformità, come indicato in Fig. 3 che mostra come, pur essendo il valore misurato sempre inferiore a LMA , in un caso (Fig. 3a) si supera il rischio massimo ammissibile dal momento che il valore misurato è maggiore della soglia ridotta di Δ_L , mentre nell'altro caso (Fig. 3b) il rischio massimo non viene superato, dal momento che il valore misurato è minore della soglia ridotta di Δ_L .

Figura 3 – Definizione delle nuove zone di conformità



Riduzione di LMA in funzione del rischio ammissibile e dell'incertezza di misura. In (a) il rischio supera il valore massimo ammesso, mentre in (b) tale valore non viene superato dal momento che il risultato della misura cade nella nuova zona di conformità

E' utile vedere a quali risultati porta questo approccio nel caso dell'esempio precedentemente considerato, in cui si vuole garantire che la concentrazione di una sostanza in acqua non superi i 50 mg/l. In questo caso si impone anche di non avere rischio sociale superiore al 5%. Dalla (8) risulta quindi $K_{0,05} = 4.5$.

Supponendo quindi di utilizzare ancora lo stesso strumento in dotazione all'ARPA, con incertezza tipo $u(x) = 5$ mg/l, si otterrebbe $\Delta_L = 4.5 \cdot 5 = 22.5$ mg/l e, di conseguenza il limite di confronto effettivo diventerebbe $LMA - \Delta_L = 50 - 22.5 = 27.5$ mg/l.

Si avrebbe quindi che un valore misurato di 30 mg/l, con incertezza estesa di 10 mg/l, valore che, adottando il criterio della (ISO, 2001), sarebbe ammissibile, non è più considerato inferiore al limite massimo ammissibile.

Per contro, se un'eventuale parte ricorrente fosse in grado di eseguire la stessa misura con incertezza tipo $u(x) = 1$ mg/l, si avrebbe $\Delta_L = 4.5$ e quindi il limite effettivo si ridurrebbe a $LMA - \Delta_L = 50 - 4.5 = 45.5$ mg/l. Se la parte ricorrente misurasse 37 mg/l, con incertezza estesa di 2 mg/l, il limite non sarebbe da considerare superato.

Come si è visto anche da questo esempio numerico, il criterio proposto riesce a mettere in relazione diretta l'incertezza di misura con le conseguenze socioeconomiche (quantificate dal rischio sociale massimo ammissibile) che una decisione errata comporterebbe. Ovviamente, ove fosse possibile ipotizzare una data funzione densità di probabilità per il risultato di misura, le percentuali di riduzione della soglia di confronto potrebbero variare.

CONCLUSIONI

Il confronto tra il risultato di una misura e un limite di ammissibilità non è, malgrado le apparenze, un'operazione semplice. Anche tenendo conto dell'incertezza di misura, come proposto dalla Normativa vigente in campo tecnico per la verifica della conformità a specifiche geometriche di parti meccaniche, non è possibile escludere un rischio residuo di superamento del valore limite.

In molti ambiti, tra cui quello ambientale, in cui il superamento di valori limite può esporre ambiente e salute pubblica a pericoli, diventa necessario formulare dei criteri di confronto con i limiti che considerino esplicitamente il rischio residuo.

In questo lavoro è stato illustrato un possibile criterio, mostrando che è tecnicamente possibile evidenziare il legame tra incertezza di misura, rischio e limite massimo ammissibile.

Il criterio illustrato richiede che venga definito il rischio sociale ammesso. Quindi obbliga il legislatore – o l'Ente preposto alla determinazione dei limiti – a definire tale limite e quindi a porsi anche il problema se sia possibile e in quale misura, per la comunità, di farsi carico degli oneri conseguenti al valore di rischio ritenuto ammissibile. E' evidente che sarà possibile pervenire a valori di LMA e P_s solo dopo un'attenta analisi socio economica dei costi e dei benefici, ma è altrettanto evidente che solo in questo modo diventa possibile al legislatore tutelare un bene primario, quale l'ambiente e la salute pubblica, senza entrare nel merito tecnico delle procedure di misura da adottare e della relativa incertezza.

Procedure di misura e valutazione dell'incertezza vengono così ad essere correttamente demandate al tecnico, a cui spetta, ovviamente, l'onere di mantenere le proprie conoscenze e la propria strumentazione al passo con l'evoluzione delle conoscenze scientifiche. Al legislatore resta solo l'obbligo aggiuntivo di definire ed aggiornare un limite massimo ammissibile di incertezza, dal momento che incertezze troppo elevate riducono la soglia di confronto, con conseguente inaccettabile incremento dei costi.

Certamente tutto ciò investe ambiti che travalicano il mero aspetto tecnico-scientifico della misura e della sua caratterizzazione metrologica. Le attuali conoscenze tecniche permettono di adottare un criterio come quello proposto. Probabilmente la sua adozione richiede di adattare quanto meno la prassi, se non la sostanza, della giurisprudenza. Dal punto di vista del cittadino, prima ancora che del tecnico, sarebbe auspicabile che ciò avvenisse.

Bibliografia

UNI CEI ENV 13005, *Guida all'espressione dell'incertezza di misura*, 2000

ISO 14253-1:1998, *Geometrical Product Specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment - Part 1: Decision rules for proving conformance or non-conformance with specifications (UNI EN ISO 14253-1:2001)*, 2001

ASME B89.7.3.1:2001, *Guidelines for Decision Rules: considering measurement uncertainty in determining conformance to specifications*, 2001.

S. Sartori, *Incetezza di misura, ambiguità e diritto*, Tutto_Misure, vol. 1, n. 1, 1999.

G. D'Antona, *Incetezza di misura e decisioni incerte. Proposta di un criterio decisionale applicabile in ambito sanitario e ambientale*, Tutto_Misure, vol. 2 n°3, 2000.

L. Piccinato, *Metodi per le decisioni statistiche*, Springer-Verlag Italia, Milano, 1996.