

ESTIMACIÓN PROBABILÍSTICA DEL RIESGO SANITARIO CON MS EXCEL: EJEMPLO DE APLICACIÓN A UN ESCENARIO RECREATIVO

Fabio Peluso, José González Castelain, Eduardo Usunoff, Lorena Rodríguez
Instituto de Hidrología de Llanuras. CC. 44. 7300. Azul
fpeluso@faa.unicen.edu.ar

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es presentar, a través de un ejemplo, cómo pueden utilizarse las potencialidades de MS Excel para realizar análisis de riesgo sanitario probabilístico. Se aplica a un caso de ingesta accidental subcrónica o crónica de agua, debida al uso recreativo de aguas naturales, utilizando al nitrato como sustancia peligrosa para la salud. El trabajo ofrece funciones complejas anidadas, desarrolladas en ese software de planilla de cálculo, con las cuales aplicar Monte Carlo para obtener las distribuciones de frecuencias, tanto de los parámetros definitorios de la exposición como las del riesgo. Los resultados indican que esas funciones complejas son un buen sustituto a operaciones efectuadas con software comercial desarrollado explícitamente para evaluaciones de riesgo. Sin resignar precisión de cálculo, se compensa la falta de opciones de menús específicas o las capacidades gráficas y analíticas ceñidas a esta temática, con la ubicuidad de Excel y su costo menor. Esto lo convierte en una opción factible para encarar estudios de riesgo sanitarios probabilísticos por parte de los responsables de la gestión de los recursos hídricos en los municipios, los que generalmente presentan recursos limitados que hacen improbable la compra de software de alto costo.

Palabras Claves: Riesgo Sanitario, Agua Subterránea, Software

ABSTRACT

The goal of this paper is to present, through an example, the potential use of MS Excel for carrying out probabilistic water-related health risk analyses. It is applied to a case of accidental intake of sub-chronic or chronic pf water, due to recreational use of natural waters, using the nitrate content as the species dangerous for health. The paper describes complex nested functions in Excel, used to apply Monte Carlo in order to obtain the frequency distributions of the parameters related to the exposition as well as the risk. Results show that those complex functions are a good substitute of numerical operations done with commercial software explicitly designed for risk analyses. Without resignation of calculation precision, the lack of options and the graphical/analytical abilities of Excel are compensated by its ubiquity and low cost. That makes it a feasible option to decision makers at the municipal water resources management level for carrying out probabilistic health risk analyses, given the fact that the limited amount of funds does not allow purchasing high-price software.

Keywords: Health Risk, Groundwater, Software

INTRODUCCIÓN

Los análisis de riesgo sanitario (ARS) establecen las condiciones específicas bajo las cuales una sustancia química representa una amenaza no aceptable a la salud (Lyons, 2002). Los ARS son básicamente herramientas que pueden ser utilizadas para la gestión de los recursos hídricos ya que, a partir de la exposición a una o varias sustancias químicas presentes en el ambiente, se establece el nivel de peligro para un receptor humano o ecológico (Hay Wilson, 2000) ante un contacto potencial con ellas. La exposición puede ser a partir de la ingestión deliberada del agua que contiene el agente peligroso, como ocurre con el uso consuntivo humano, o de manera accidental, tal como la ingesta de agua durante el uso recreativo o por el contacto dérmico con ella. Así se pueden caracterizar los efectos adversos potenciales de esa exposición y calcular su probabilidad de ocurrencia, con lo que se facilitan las tareas de identificación, evaluación, selección e implementación de acciones tendientes a su reducción (CRARM, 1997).

El modelo básico para los ARS, en su forma más general, expresa que el riesgo es una función de la toxicidad de la sustancia peligrosa y la magnitud de la exposición a la misma (USEPA, 1992a).

La evaluación de la exposición es una medida de la “calidad y cantidad” del contacto entre la fuente de riesgo y el organismo blanco (USEPA, 1992a). La exposición se calcula a partir de la integración de una serie de variables que expresan la “Dosis Diaria Promedio” (ADD), tal como puede apreciarse en la Ecuación 1. Esta estima una exposición crónica o subcrónica a una sustancia peligrosa mediante la ingesta de agua.

$$ADD = \frac{[C \cdot Ir \cdot EF \cdot ED]}{[Bw \cdot AT]} \quad (1)$$

Siendo

ADD = Dosis Diaria Promedio

C = Concentración de la sustancia peligrosa (en mg l⁻¹)

Ir = Tasa de ingesta diaria del agua que contiene a la sustancia (en l día⁻¹)

EF = Frecuencia de la exposición (días año⁻¹)

ED = Duración de la exposición (años)

Bw = Peso corporal de la persona expuesta (en kg)

AT = Factores de corrección por tiempo promedio (ED * 365 días)

Un modo de poner este análisis de la exposición en el contexto de un ARS es confrontando ese valor con la dosis umbral por debajo de la cual no existen efectos toxicológicos sobre el individuo expuesto, tal como ocurre con las sustancias de efectos tóxicos no carcinogénicos. En este caso se usa como dosis umbral a la Dosis de Referencia (RfD), que es una estimación probabilística de la exposición diaria a la que la población humana, incluyendo los subgrupos sensibles, se puede someter a la fuente de peligro sin que genere riesgos de efectos adversos durante toda su vida (Barnes, 1988). El RfD se expresa en mg kg⁻¹ día⁻¹. Entonces, el nivel de riesgo para sustancias no carcinogénicas se cuantifica estimando si, y en cuanto, la dosis diaria promedio excede la dosis de referencia para la misma. Esta relación se denomina cociente de riesgo R (Risk Quotient en inglés) (USEPA, 1989), es adimensional, y se aprecia en la Ecuación 2. Si el valor de R excede la unidad, ya puede decirse que existe un nivel de riesgo atendible.

$$R = \frac{ADD}{RfD} \quad (2)$$

Existen aplicaciones de estas metodologías en las que, simplemente, se reemplaza cada término de la Ecuación 1 que no refiera a la concentración de la sustancia peligrosa, por un valor estandarizado. Por ejemplo, se asume *determinísticamente* que un niño bebe 1 litro de agua por día mientras que un adulto bebe 2, o que un niño pesa 30 kg y un adulto pesa 70 kg (USEPA, 1997a; USEPA, 2002).

Es obvio que esta simplificación, si bien facilita el aspecto operativo, enmascara la variabilidad existente en las poblaciones humanas. Debe reconocerse que, sin embargo, dentro de la categoría “niño” existe una dispersión de valores muy importante si se incluyen distintas franjas de edades. Es más, también existe variabilidad poblacional para una única edad, tanto entre sexos como para cada sexo. Hasta podría aducirse que franjas de edades equivalentes podrían diferir, incluso dentro de una misma población, debido a la dependencia de la tasa de ingesta, del peso, o de ciertos factores socioeconómicos (USEPA, 2002). A pesar de ello, el ARS determinístico utiliza un valor único representativo de esas distribuciones de valores poblacionales, lo que lleva a que el nivel de peligrosidad se estime a partir del planteo de un escenario de contacto único, certero e invariante con la sustancia riesgosa.

Existe otro enfoque que no se basa en valores estandarizados. Este, a diferencia del anterior, considera toda la distribución de valores poblacionales (y sus probabilidades de ocurrencia) para representar a cada variable en el cómputo de la exposición (USEPA, 1999). Este tipo de modelo, denominado **probabilístico**, reconoce que las diferentes variables participantes poseen, de manera intrínseca, incertidumbre y variabilidad, circunstancia que influye sobre el estudio del riesgo y, consecuentemente, en la gestión basada en el mismo (Thompson y Graham, 1996).

Las técnicas probabilísticas operan con distribuciones de valores, obteniendo como resultado también una distribución del valor del riesgo, la que incluye y permite representar la incertidumbre y/o variabilidad resultante del modelo, cosa que el procedimiento determinístico no realiza. Esta metodología, entonces, reemplaza cada término de la ecuación de la exposición por una distribución probabilística. Existe una buena cantidad de bibliografía en la cual se discute el mejor mecanismo para obtener probabilísticamente una distribución de valores y cómo aplicarla en el contexto de los estudios de riesgo, entre ellos USEPA (1992b); Hammond et al. (1994); Crouch et al. (1995); Burmaster y Bloomfield (1996); USEPA (1997b); Calow (1998) y USEPA (1999). El procedimiento más comúnmente utilizado es Monte Carlo en su versión de Muestreo Simple (MC SRS), pero existen otros más sofisticados tales como Monte Carlo versión de Muestreo Doble, la de Hipercubo Latino, o la de Bootstrap (Iman, 1990; USEPA, 1994; Iman, 1999; USEPA, 1999). El procedimiento de MC SRS genera un número elevado de “muestras” aleatorias (por ejemplo, 5000) con diferentes niveles de probabilidad para cada variable a partir de la aplicación de una función inversa asumiendo la forma de la distribución probabilística de cada variable (normal, lognormal, beta, triangular, uniforme, etc.) y algunos parámetros representativos de ésta (por ejemplo, media aritmética, desvío estándar, valor mínimo, valor máximo).

Las muestras aleatorias recrean una distribución probabilística de valores “estimados” (o *propagados*) que contiene la incertidumbre y variabilidad de los datos que se asumen “reales” (o *medidos*).

En resumen, las técnicas probabilísticas, a diferencia de las determinísticas, son procedimientos que actúan sobre la base de una selección aleatoria de escenarios (USEPA, 1994).

Existe software específico para llevar adelante MC SRS en el marco de un análisis de riesgo. Por ejemplo, @risk (Palisade, 2005) o Crystal Ball (Decisioneering, 2005). A pesar de estar orientadas hacia las predicciones y los análisis de riesgo en sentido amplio como herramientas para la toma de decisiones, lo que se traduce en un menú de opciones computacionales en ese sentido, estos códigos digitales son complementos de Microsoft Excel (Microsoft Corporation, 1985-2001). Por lo tanto, la planilla de cálculo más popular del mercado tiene la capacidad de realizarlo.

Si bien en trabajos anteriores se han presentado funciones de MS Excel para realizar ARS probabilísticos (por ejemplo, Peluso y Usunoff, 2005a; Peluso y Usunoff, 2005b), las funciones empleadas no tenían aplicabilidad universal para sustancias cuyos valores de concentración fueran menores a 1 mg l⁻¹ y sólo se habían desarrollado para distribuciones de probabilidad de tipo normal. El objetivo del presente trabajo es presentar, a través de un ejemplo, cómo pueden utilizarse las potencialidades de MS Excel para realizar ARS probabilísticos por ingesta subcrónica o crónica debida a un escenario recreativo en aguas naturales, adecuando las funciones utilizadas a sustancias cuyos rangos de concentraciones sean menores a 1 mg l⁻¹, y a variables de exposición con curvas de distribución no normales. Para validar las funciones se confrontaron los resultados con los que se obtendrían de utilizar Crystal Ball 7.1.

El estudio de caso se realiza en base a información proveniente del Arroyo Azul, provincia de Buenos Aires, Argentina, utilizándose como sustancia peligrosa a los nitratos en el cuerpo de agua, y estimándose el riesgo sanitario a uno y 20 años por ingesta recreativa accidental para un niño de 5 años de edad.

METODOLOGÍA

Las curvas de distribución teóricas en MS Excel

MS Excel puede realizar MC SRS a partir de varias funciones de distribución inversa, según sea el tipo de distribución de frecuencias (o de Probabilidades) que mejor describa el comportamiento de las distintas variables aleatorias continuas presentes en la ecuación de la exposición.

La más comúnmente utilizada es la de tipo *normal* y con ella se generan valores aleatorios a partir de la siguiente función compleja anidada de Excel:

$$=DISTR.NORM.INV((ALEATORIO()), PROMEDIO, DESVESTP) \quad (3)$$

Esta función estima el inverso de una distribución de frecuencias acumulativa de tipo normal para la media aritmética y la desviación estándar especificadas.

MC SRS se basa en iteraciones aleatorias, cada una de

las cuales posee un valor de probabilidad seleccionado al azar. La función ALEATORIO() produce números aleatorios entre 0 y 1, por lo que puede ser usada para representar el valor de P con el cual se aplica la función inversa en cada una de las iteraciones de MC.

La función 4 de Excel es una modificación de la 3 en la que se establecen criterios más restrictivos, regulando las colas de la distribución para controlar los valores extremos en la distribución cuando se efectúa el análisis MC SRS. En ella, “matriz” representa al conjunto de valores medidos.

$$=DISTR.NORM.INV(ALEATORIO.ENTRE(POTENCIA(10,8) \cdot DISTR.NORM(MINIMOmtriz,PROMEDIOmtriz,DESVESTmtriz,VERDADERO), POTENCIA(10,8) \cdot DISTR.NORM(MAXIMOmtriz,PROMEDIOmtriz,DESVESTmtriz,VERDADERO))/ POTENCIA(10,8), PROMEDIOmtriz,DESVESTmtriz) \quad (4)$$

El truncamiento de las colas se realiza a partir de definir el rango deseado de niveles de P sobre el que operará la distribución inversa, lo cual se efectúa con la función ALEATORIO.ENTRE. Debido a que esta función opera sólo con números enteros, entonces, los parámetros MINIMO y MAXIMO de esa función pueden convertirse en números enteros multiplicando el valor obtenido de DISTR.NORM por un múltiplo de 10 lo suficientemente grande como para tener una buena distribución de valores aleatorios. Finalmente, dividiendo la subfunción anterior con el mismo múltiplo de 10, la función DISTR.NORM.INV vuelve a contar con un valor compatible con un rango de P.

Dentro de los parámetros de la exposición una variable que responde a este tipo de distribución es el peso corporal (GCA Corp., 1985, Lejarraga y Orfila, 1987) o la tasa de ingestión de agua para escenario residencial (USEPA, 2000; USEPA, 2002).

Los valores del peso corporal (el BW de la ecuación 1) se derivaron de Lejarraga y Orfila (1987). La distribución también se definió con un valor mínimo

y uno máximo, la media aritmética y el desvío estándar, en base a datos correspondientes a un niño de 5 años. Los guarismos son:

$$\text{Media: } 19,5; \text{ Desvío Standard: } 2,5; \\ \text{Mínimo: } 13,5; \text{ Máximo: } 21,5 \text{ (en kg).}$$

La función para el cálculo probabilístico del peso corporal es una distribución normal inversa y queda como expresa la Ecuación 4.

A partir de muestreos periódicos del agua del Arroyo Azul desde 1996 a la fecha, se relevaron los valores de concentración de nitratos ($n = 197$) y se determinó que el conjunto de datos responde a una curva de tipo lognormal. Sus parámetros son:

$$\text{Media: } 25,69; \text{ Desvío Standard: } 16,06; \\ \text{Mínimo: } 4,34; \text{ Máximo: } 92,4 \text{ (en mg l}^{-1}\text{)}$$

El cálculo para realizar cada iteración de MC SRS bajo un tipo de curva lognormal, es como muestra la función 5:

$$=DISTR.LOG.INV(ALEATORIO.ENTRE(POTENCIA(10,8) \cdot DISTR.NORM(LN(MINIMOmtriz),LN(PROMEDIOmtriz),LN(DESVESTmtriz),VERDADERO), POTENCIA(10,8) \cdot DISTR.NORM(LN(MAXIMOmtriz),LN(PROMEDIOmtriz),LN(DESVESTmtriz),VERDADERO))/ POTENCIA(10,8), LN(PROMEDIOmtriz),LN(DESVESTmtriz)) \quad (5)$$

Estudios recientes sobre el uso recreativo en el Arroyo Azul (Peluso et al., 2006), arrojaron que, en el marco de un ARS, tanto la Tasa de Ingesta (Ir) como la Fre-

cuencia de Exposición (EF) pueden estimarse en base a la cantidad de horas diarias de uso recreativo potencial (DDURP), tal como muestran las ecuaciones 6 y 7:

$$Ir = DDURPanual \cdot 0.05 \quad (6)$$

siendo Ir la Tasa de Ingesta diaria medida en $l \text{ día}^{-1}$, $DDURPanual$ la Duración Diaria del Uso Recreativo Potencial para el período estival (medido en horas) y 0.05 el valor brindado por USEPA (1989) de ingesta de agua por hora de actividad de natación, para niños (en $l \text{ hora}^{-1}$).

$$EF = DDURPanual \cdot diasv / 24 \quad (7)$$

donde EF es la Frecuencia de la Exposición Anual en días, $DDURPestival$ es la Duración Diaria del Uso Recreativo Potencial para el período estival

$$= \text{DISTR.BETA.INV}(\text{ALEATORIO}(); \text{ALFA}; \text{BETA}; \text{MÍNIMOmatriz}; \text{MÁXIMOmatriz}) \cdot 0,05$$

y la que se requiere para el cálculo de EF (en días año⁻¹) es:

$$= \text{DISTR.BETA.INV}(\text{ALEATORIO}(); \text{ALFA}; \text{BETA}; \text{MÍNIMOmatriz}; \text{MÁXIMOmatriz}) \cdot 111/24$$

Para el caso de un estudio subcrónico, tal como aquí se implementa, el parámetro ED de la ecuación 1 adopta el valor de 1 año, mientras que para un estudio crónico, ED equivale a 20 años. AT adopta el valor de 365 días año⁻¹.

Cálculo del nivel de riesgo y uso del valor de referencia toxicológico

El riesgo se calculó probabilísticamente con MS Excel como resultado de la aplicación de las ecuaciones 1 y 2 utilizando la función inversa correspondiente a cada parámetro de la exposición, para cada iteración. De este modo, se generaron 5000 escenarios aleatorios resultantes de ese número de valores surgidos al azar de cada una de las variables en juego.

La ecuación 2 pone en evidencia que la valorización del riesgo R surge de la comparación de la dosis de sustancia ingerida con el RfD. Los nitratos tienen un RfD de $7,04 \text{ mg kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$ (USEPA, 2006).

Los resultados de la aplicación de MC SRS sobre cada parámetro de la exposición así como del riesgo subcrónico y crónico, fueron expresados como las distribuciones de frecuencias completas así como por

(en horas), y $diasv$ es la cantidad de días del período estival (111), y 24, el número de horas diarias.

El mismo estudio estableció que la curva de mejor ajuste para las frecuencias de DDURP correspondientes al período estival es la *Beta* con sus parámetros tal como se muestra a continuación:

$$\alpha: 1.28; \beta: 1.82$$

Mínimo: 0.14; Máximo: 9.76

Entonces, la función de MS Excel que puede utilizarse para la estimación de Ir (en $l \text{ día}^{-1}$) es:

estadísticos básicos representativos de cada una de ellas (Media Aritmética, Desvío Estándar, valores Mínimo y Máximo, y Percentil 95).

Validación de los resultados obtenidos

Las funciones de Excel aplicadas para realizar el análisis de MC SRS fueron validadas comparando, parámetro por parámetro de la exposición y el riesgo, con las distribuciones de frecuencias obtenidas con Crystal Ball 7.1. Esto se realizó estimando el Coeficiente de Correlación de Pearson para confrontar ambas distribuciones, y presentando los estadísticos representativos de cada parámetro de la exposición y del riesgo según ambos procedimientos digitales.

Además, las distribuciones del riesgo obtenidas tanto por MS Excel como Crystal Ball, fueron testeadas para evidenciar el tipo de distribución de frecuencias final.

RESULTADOS

La aplicación de MC SRS para cada parámetro de la exposición o del riesgo sanitario subcrónico o crónico, arrojó los resultados que se visualizan en la Tabla 1.

Tabla 1. Comparación de los estadísticos resultantes de la aplicación de MC SRS a cada parámetro de la exposición y del riesgo según MS Excel (EX.) y Crystal Ball (CB.). Referencias: C. = Concentración de la sustancia peligrosa (mg l⁻¹); Ir. = Tasa de Ingesta (l día⁻¹). P. = peso corporal (kg). EF. = Frecuencia de la exposición (días año⁻¹).

Estadísticos	Exposición								Riesgo subcrónico		Riesgo crónico	
	C. EX.	C. CB.	Ir. EX.	Ir. CB.	P. EX.	P. CB.	EF. EX.	EF. CB.	EX. 1 año	CB. 1 año	EX. 20 años	CB. 20 años
Mínimo	4.502	4.373	0.008	0.008	13.537	13.503	0.724	0.763	0.000	0.000	0.000	0.000
Máximo	92.219	90.422	0.487	0.488	21.500	21.497	45.021	45.113	0.036	0.033	0.726	0.694
Promedio	25.504	25.242	0.207	0.204	18.623	18.658	19.176	18.881	0.004	0.003	0.079	0.056
Desvío ST	14.616	14.373	0.118	0.117	1.803	1.819	10.931	10.824	0.006	0.003	0.112	0.071
Percentil95	54.858	54.068	0.412	0.410	21.175	21.212	38.074	37.936	0.016	0.010	0.318	0.198
C.Correl. (r ²)	0.9997		0.9999		0.9999		0.9999		0.9948		0.9947	

Como puede apreciarse, sea con las funciones en MS Excel (EX) o con Crystal Ball (CB), el riesgo por nitratos en agua del Arroyo debida a su ingesta accidental a partir del uso recreativo, no es atendible, sea a nivel subcrónico (1 año) como crónico (20 años), dado los valores obtenidos muy inferiores a 1.

La comparación entre las funciones de EX y el procedimiento con CB, ya sea parámetro a parámetro o por los resultados finales del riesgo subcrónico y crónico, arroja como resultado que ambas distribuciones son idénticas a juzgar por las coincidencias en los estadísticos representativos y los elevados coeficientes de correlación.

Las Figuras 1 a 6 muestran las distribuciones obtenidas con EX de las 5000 iteraciones de MC SRS para cada parámetro de la exposición así como del riesgo subcrónico y crónico. La Figura 1 presenta la típica forma de las distribuciones lognormales; las Figuras 2 y 3 tienen ambas la misma forma de distribución de tipo Beta, debido a que derivan de la Duración Diaria del Uso Recreativo Potencial para

el período estival que tiene ese tipo de distribución. Por otro lado, el peso no tiene la típica forma acampanada de la distribución normal debido al truncamiento de la cola de la distribución en las condiciones iniciales de MC SRS.

El análisis de las distribuciones de frecuencias obtenidas con EX para el riesgo subcrónico y crónico (Figuras 5 y 6) establece que las curvas son de tipo **Beta**, con los siguientes parámetros:

$$\text{Alfa: } 0,41; \text{ Beta: } 7,32$$

Por otro lado, las obtenidas por CB son de tipo **Weibull** (ver Figuras 7 y 8), con los siguientes parámetros:

$$\text{Escala: } 0.00; \text{ Forma: } 0.8039$$

Sin embargo, como se ha visto por los resultados, los estadísticos resultantes de las distribuciones de frecuencias finales obtenidas para el riesgo por uno y otro método, no difieren significativamente.

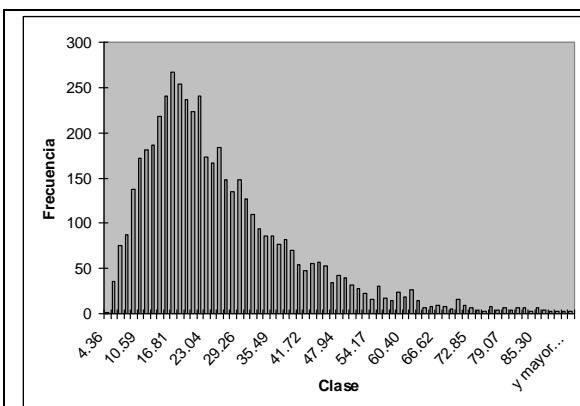


Figura 1. Distribución de frecuencias según MC SRS obtenida con EX para la concentración de nitratos, en mg l^{-1}

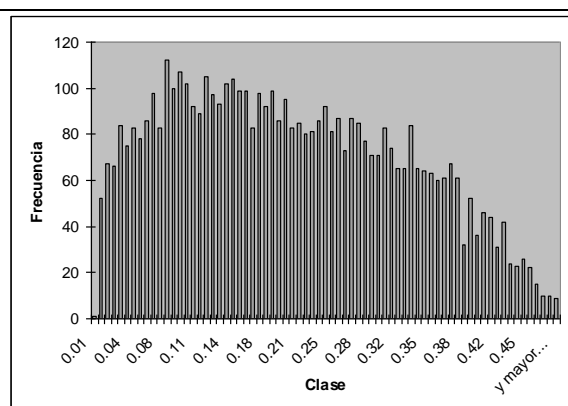


Figura 2. Distribución de frecuencias según MC SRS obtenida con EX para la tasa de ingesta, en l día^{-1}

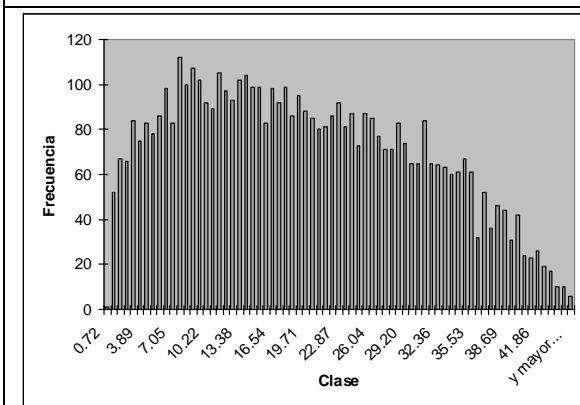


Figura 3. Distribución de frecuencias según MC SRS obtenida con EX para la frecuencia de la exposición, en días año^{-1}

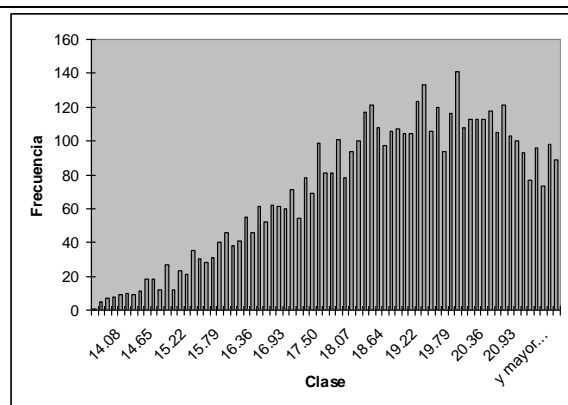


Figura 4. Distribución de frecuencias según MC SRS obtenida con EX para el peso corporal, en Kg

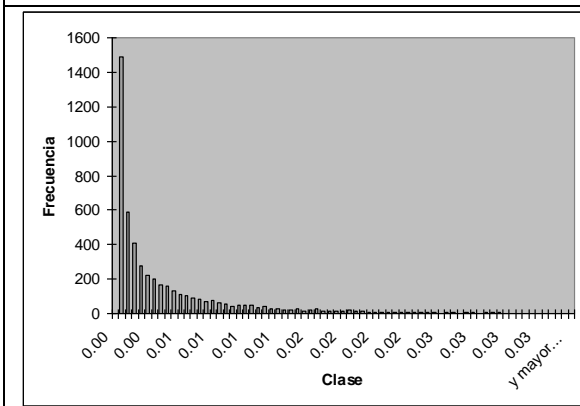


Figura 5. Distribución de frecuencias según MC SRS obtenida con EX para el riesgo subcrónico, adimensional

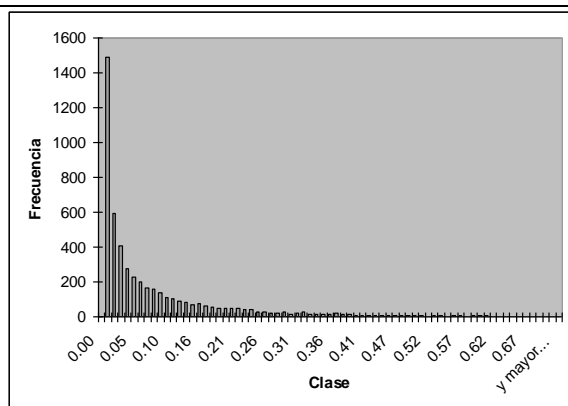


Figura 6. Distribución de frecuencias según MC SRS obtenida con EX para el riesgo crónico, adimensional

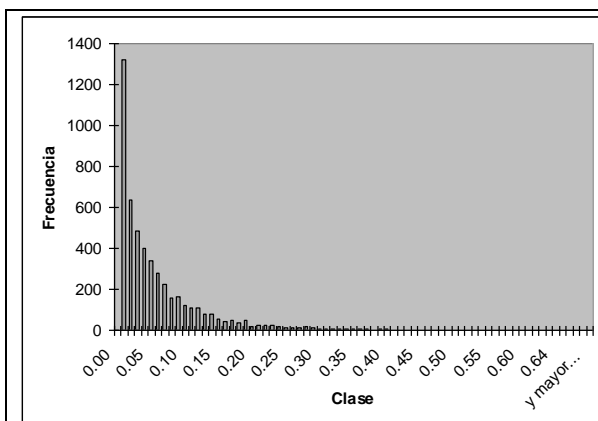


Figura 7. Distribución de frecuencias según MC SRS obtenida con CB para el riesgo subcrónico, adimensional

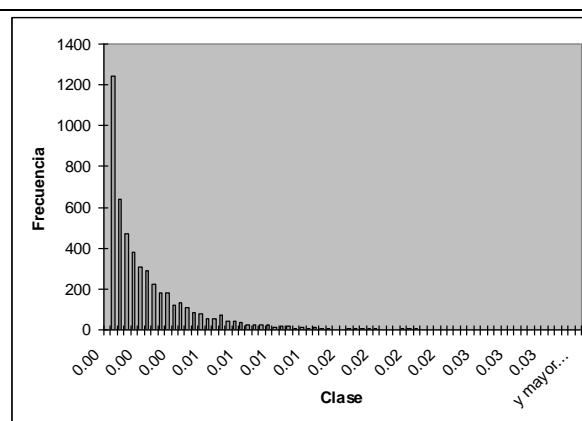


Figura 8. Distribución de frecuencias según MC SRS obtenida con CB para el riesgo crónico, adimensional

ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

La Provincia de Buenos Aires no posee una Tabla de Niveles Máximos Permisibles o niveles guía que regule la balneabilidad de los cuerpos de agua naturales. Por ello, los ARS resultan una opción a los tomadores de decisión ante la falta de otro tipo de estrategia de calificación del nivel de calidad del agua para fines recreativos con ingesta accidental. El presente estudio muestra un nivel de complejidad metodológica mayor al presentado en un artículo antecedente referido a aplicación de un ARS en la misma área de estudio (Peluso et al., 2003) ya que, en este caso, se plantea una metodología probabilística en vez de una determinística.

En estudios previos, Peluso y Usunoff (2005a; 2005b) destacaron las posibilidades operativas que posee MS Excel como herramienta analítica y de graficación para realizar diversas operaciones relacionadas con los análisis de riesgo sanitario. En esos casos, además del hecho que todas las variables planteadas tenían una distribución de tipo normal, se utilizaron funciones que, para rangos de concentraciones menores a 1 mg l^{-1} , no funcionaban adecuadamente. Esto es debido a que el factor elegido para convertir en número entero los parámetros INFERIOR y SUPERIOR de la subfunción ALEATORIO.ENTRE fue 100. Esta técnica pudo ser aplicada de manera correcta al ARS por nitrato en agua subterránea, tasa de ingesta y peso corporal, y también resulta adecuada para ingesta accidental de agua superficial. Sin embargo, no ocurriría lo mismo ante el caso de otras variables cuyos rangos de valores fueran menores a la unidad. Para estos casos se requeriría un factor de corrección mayor,

aplicando para ello en este trabajo la subfunción POTENCIA(10,8), lo que permitiría su utilización con rangos de valores compatibles, por ejemplo, con concentraciones en agua del orden del mg l^{-1} .

La comparación de las funciones desarrolladas en MS Excel con las distribuciones de las variables obtenidas por Crystal Ball permite apreciar que resultan equivalentes para estimar las distribuciones de frecuencias aleatorias. Las ligeras diferencias obedecen a que cada evento de estimación, aún utilizando el mismo mecanismo, no es exactamente igual a otro evento dado que se utilizan funciones aleatorias.

MS Excel tiene todas las capacidades para realizar cada una de las opciones del menú de Crystal Ball debido a que este software es un “complemento” de aquel. Los complementos, o “Add-ins” en inglés, son extensiones de las funcionalidades de un programa (en este caso de MS Excel) por la incorporación de herramientas digitales extras del propio paquete de software (Microsoft Office, en este caso), o externas, como es el caso de Crystal Ball o @Risk. Es decir, es un código digital que se adosa al menú original de MS Excel ofreciendo nuevas opciones operativas. Obviamente, Crystal Ball posee las ventajas de ser un software “a medida” de las estimaciones que se desean efectuar, lo que se refleja en los menús tanto para el conjunto de herramientas de cálculo como para el de análisis de los resultados, tanto numérica como gráficamente. Sin embargo, si bien Excel como Crystal Ball son softwares comerciales, el primero es menos oneroso y está mucho más extendido como herramienta de cálculo digital en el ámbito hogareño y en las reparticiones públicas. Por ello, en la medida en que los análisis de ries-

go sanitario son herramientas para la toma de decisiones en el ámbito de la gestión de los recursos hídricos, un desarrollo como el que este trabajo presenta es una opción que apunta a favorecer el uso de estas metodologías sin la necesidad de adquirir, para ello, softwares comerciales de costo prohibitivo para un municipio promedio de la República Argentina.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se financió con fondos provenientes de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, de la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires y de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PID 452).

REFERENCIAS

- Barnes D. 1988. Reference Dose (RfD): description and use in health risk assessment. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 8: 471-486.
- Burmaster D. E., Bloomfield L. R., 1996. Mathematical Properties of the Risk Equation When Variability is Present, *Human and Ecological Risk Assessment*, 2(2):348-355.
- Calow P. Ed., 1998. *Handbook of Environmental Risk Assessment and Management*. Blackwell Science Ltd. 590 p.
- CRARM. 1997. Risk assessment and risk management in regulatory decision-making. Presidential /Congressional Commission on Risk Assessment and Risk Management, U.S.A. Final Report. Volume 2. 169 p.
- Crouch E., Lester R., Lash T., Armstrong S., Green L., 1995. Report to the Comisión on Risk Assessment and Risk Management: Health Risk Assessment. Cambridge Environmental Inc., 80 p.
- Decisioneering, 2005. Crystal Ball 7.1 software.
- GCA Corp., 1985. Development of statistical distributions or ranges of standard factors used in exposure assessment. Washington D.C. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Health and Environmental Assessment, Office of Research and Development. USA.
- Hammond J. S., Hoffman F. O., Bartell S. M., 1994. An Introductory Guide to Uncertainty Analysis in Environmental and Health Risk Assessment. Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy. ES/ER/TM-35/R1.
- Hay Wilson L. 2000. A spatial environmental risk assessment methodology for risk-based decision making at large, complex facilities. PhD dissertation. The University of Texas at Austin, U.S.A. 417 p.
- Iman R. L., 1990. Methods Used in Probabilistic Risk Assessment for Uncertainty and Sensitivity Analysis, En L. A. Cox, Jr. and P. F. Ricci ed. *New Risks Issues and Management*, Plenum Press, NY, p. 423-430.
- Iman R. L., 1999. Latin Hypercube Sampling. *Wiley Encyclopedia of Statistical Sciences, Update Vol 3*, 408-411.
- Lejarraga H, Orfila G. 1987. Estándares de peso y estatura para niños y niñas argentinos desde el nacimiento hasta la madurez. *Archivos Argentinos de Pediatría* 85:209-222.
- Lyons K. 2002. Definition of contaminant in risk-based corrective action. En <http://www.epa.gov/swerust1/rbdl/definitn.htm>
- Microsoft Corporation. 1985-2001. Microsoft Office MS Excel 2003.
- Palisade Corporation, 2005. @Risk 4.5 software.
- Peluso F., Usunoff E., González Castelain J., 2003. Metodología de análisis del riesgo de los recursos hídricos usados con fines recreativos. Caso del Arroyo del Azul, Argentina. *Cuadernos del CURIHAM* 9 (1): 1 – 7.
- Peluso F., Usunoff E., 2005a. Base Metodológica para Desarrollar Estudios Probabilísticos de Riesgo Sanitario en Aguas Subterráneas en Soporte SIG. *Cuadernos del CURIHAM* 11 (1): 75-82.
- Peluso F., Usunoff E., 2005b. Una aplicación para realizar estudios probabilísticos y espacializados de riesgo sanitario en aguas subterráneas. *Actas del IV Congreso Hidrogeológico Argentino, Tomo I*: 47 – 56.
- Peluso F., Gonzalez Castelain J., Cazenave G., Usunoff E., 2006. Estimación de la tasa de ingesta y de la frecuencia de exposición en aguas recreativas naturales para su uso en análisis probabilístico de riesgo sanitario. En prensa *Cuadernos del CURIHAM*.
- Thompson K., Graham J., 1996. Going Beyond the Single Number: Using Probabilistic Risk Assessment to Improve Risk Management. *Human and Ecological Risk Assessment* vol. 2 (4): 1008 – 1034.
- USEPA, 1989. Risk assessment guidance for superfund. Volume 1: human health evaluation manual. EPA/540/1-89/002. Washington D.C., USA.
- USEPA, 1992a. Guidelines for exposure assessment. Environmental Protection Agency. Fed. Reg. 57:22888 – 22938. Washington D.C., USA.
- USEPA, 1992b. Supplemental Guidance to RAGS: Calculating the Concentration Term. *Intermittent Bulletin*. Volume 1 Number 1. Publication 9285.7-081. U.S. Environmental Protection Agency.

- cy. Washington D.C., USA.
- USEPA, 1994. Risk Assessment: Technical Guidance Manual. Use of Monte Carlo Simulation in Risk Assessments. EPA 903-F-94-001. U.S. Environmental Protection Agency, Hazardous Waste Management Division, Office of Superfund Programs. Philadelphia.
- USEPA, 1997a. Exposure factor handbook. Environmental Protection Agency. USEPA/600/P-95/002. Washington D.C., USA.
- USEPA, 1997b. Guiding Principles for Monte Carlo Analysis. EPA/630/R-97/001. U.S. Environmental Protection Agency, Risk Assessment Forum, Washington D.C., USA.
- USEPA, 1999. Process for Conducting Probabilistic Risk Assessment. U.S. Environmental Protection Agency, Draft. En <http://www.epa.gov/superfund/programs/risk>
- USEPA, 2000. Estimated per capita water ingestion in the United States. USEPA-822-R-00-006. Washington D.C., USA.
- USEPA, 2002. Child-Specific Exposure Factors Handbook. EPA-600-P-00-002B. Washington D.C., USA.
- USEPA, 2006. IRIS (Integrated Risk Information System). En <http://www.epa.gov/iris>
- Artículo recibido el 09/2006 y aprobado para su publicación el 02/2007.*