
LA CUANTIFICACIÓN DE LAS INCERTIDUMBRES EN LA PRÁCTICA

COPRESIDENTES, EDITORES Y AUTORES EXPERTOS

Copresidentes de la Reunión de expertos sobre metodologías intersectoriales de la estimación de la incertidumbre y la calidad de los inventarios

Taka Hiraiishi (Japón) y Buruhani Nyenzi (Tanzania)

EDITOR REVISOR

Richard Odingo (Kenya)

Grupo de expertos sobre la cuantificación de las incertidumbres en la práctica

COPRESIDENTES

Jim Penman (Reino Unido) y Semere Habetsion (Eritrea)

AUTORES DE DOCUMENTOS DE ANTECEDENTES

Kay Abel (Australia), Simon Eggleston (Reino Unido) y Tinus Pullus (Países Bajos)

AUTORES COLABORADORES

Simon Eggleston (Reino Unido), Christopher Frey (Estados Unidos), Kari Gronfors (Finlandia), Niklas Höhne (Secretaría de la CMCC), Charles Jubb (Australia), Katarina Mareckova (Eslovaquia), Jeroen Meijer (IPCC-NGGIP/TSU), Frank Neitzert (Canadá), Todd Ngara (Zimbabwe), Tinus Pulles (Países Bajos), Emmanuel Rivière (France), Arthur Rypinski (Estados Unidos), Martiros Tsarukyan (Armenia) y Peter Zhou (Botswana)

Índice

6 LA CUANTIFICACIÓN DE LAS INCERTIDUMBRES EN LA PRÁCTICA	
6.1 PANORAMA GENERAL	6.5
6.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS INCERTIDUMBRES	6.6
6.2.1 Incertidumbres asociadas con la vigilancia continua de las emisiones.....	6.6
6.2.2 Incertidumbres asociadas con la determinación directa de los factores de emisión	6.7
6.2.3 Incertidumbres asociadas con los factores de emisión extraídos de referencias publicadas.....	6.8
6.2.4 Incertidumbres asociadas con los datos de actividad	6.8
6.2.5 Dictamen de expertos	6.9
6.3 MÉTODOS PARA COMBINAR INCERTIDUMBRES.....	6.13
6.3.1 Comparación entre niveles y elección del método	6.14
6.3.2 Nivel 1 – Estimación de las incertidumbres por categoría de fuentes con supuestos simplificadores	6.14
6.3.3 Agregación y presentación de datos en el nivel 1	6.19
6.4 NIVEL 2 – ESTIMACIÓN DE LAS INCERTIDUMBRES POR CATEGORÍA DE FUENTES USANDO EL ANÁLISIS DE MONTE CARLO	6.18
6.4.1 Incertidumbres en las tendencias en el nivel 2	6.22
6.4.2 Presentación del análisis de incertidumbre en el nivel 2	6.23
6.5 CONSIDERACIONES PRÁCTICAS AL USAR LA SIMULACIÓN DE MONTE CARLO.....	6.25
6.5.1 Especificación de las distribuciones de probabilidad para las entradas de inventario.....	6.25
6.5.2 ¿Cuánto esfuerzo se necesita para caracterizar la incertidumbre en una entrada de inventario?.....	6.26
6.5.3 Elección de una técnica de simulación y de un tamaño de la muestra de simulación	6.27
6.5.4 Dependencia y correlación entre las entradas de inventario.....	6.27
6.5.5 ¿Es importante la correlación?	6.28
6.5.6 Algunos métodos para tratar las dependencias o la correlación	6.28
6.5.7 Especificación de la correlación en las entradas de inventario.....	6.28
6.5.8 Análisis de los resultados de los inventarios	6.28
6.5.9 Estímulo al uso de técnicas apropiadas	6.28
6.6 CONCLUSIÓN.....	6.28
APÉNDICE 6A.1 DERIVACIÓN DE LAS FÓRMULAS DEL CUADRO 6.1 (NIVEL 1).....	6.30
APÉNDICE 6A.2 EJEMPLO DE CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE EN EL NIVEL 1	6.33
REFERENCIAS	6.35

Figuras

Figura 6.1	Ilustración del método de Monte Carlo	6.21
Figura 6.2	Ejemplo de gráficos de frecuencia de los resultados de una simulación de Monte Carlo.....	6.22
Figura 6.3	Plan de cálculo para el análisis de Monte Carlo de las emisiones absolutas y la tendencia de una sola categoría de fuentes, estimadas como factor de emisión por un índice de actividad	6.23

Cuadros

Cuadro 6.1	Cálculo y presentación de la incertidumbre en el nivel 1	6.17
Cuadro 6.2	Presentación de la incertidumbre en el nivel 2	6.24
Cuadro 6.3	Ejemplo de cálculo y presentación de la incertidumbre en el nivel 1	6.33

6 LA CUANTIFICACIÓN DE LAS INCERTIDUMBRES EN LA PRÁCTICA

6.1 PANORAMA GENERAL

En este capítulo se describen las *buenas prácticas* al estimar y presentar las incertidumbres asociadas con las estimaciones anuales de emisiones y con las tendencias de las emisiones en el curso del tiempo. Se identifican los tipos de incertidumbre desde el punto de vista de quienes elaboran los inventarios y se muestra cómo obtener dictámenes de expertos de manera coherente. Se ofrecen dos niveles para combinar las incertidumbres por categorías de fuentes en una estimación de la incertidumbre para el total de las emisiones nacionales y se presenta un ejemplo de la aplicación del método de nivel 1.

El capítulo es coherente con la *orientación de buenas prácticas* específicas para distintas fuentes que se describe en los capítulos 2 a 5, los principios generales que se exponen en el anexo 1, la base conceptual para el análisis de la incertidumbre y los capítulos sobre la elección de la metodología (capítulo 7, "Elección de la metodología y realización de nuevos cálculos") y sobre la GC/CC (capítulo 8, "Garantía de la calidad y control de calidad").

Las estimaciones de la incertidumbre son un elemento esencial de un inventario de emisiones completo. La información sobre la incertidumbre no está orientada a cuestionar la validez de las estimaciones de inventarios, sino a ayudar a priorizar los esfuerzos por mejorar la exactitud de los inventarios en el futuro y orientar las decisiones sobre elección de la metodología, como se indica en el capítulo 7, "Elección de la metodología y realización de nuevos cálculos". Quienes elaboran los inventarios tienen entendido que para la mayoría de los países y categorías de fuentes, las estimaciones de las emisiones de gases de efecto invernadero son bastante exactas. Pero los inventarios nacionales preparados según las *Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, versión revisada en 1996 (Directrices del IPCC)* contendrán en general una amplia gama de estimaciones de emisiones, desde datos cuidadosamente medidos y manifiestamente completos sobre las emisiones de ciertos productos químicos elaborados hasta estimaciones del orden de magnitud de emanaciones muy variables de óxido nitroso (N₂O) procedentes del suelo y de los cursos de agua.

Las estimaciones de inventarios pueden usarse con diversos propósitos. Para algunos fines, sólo interesa el total nacional, mientras que para otros es importante el detalle discriminado por gases de efecto invernadero y categorías de fuentes. Para cotejar los datos con el fin al que se destinan, los usuarios deben poder comprender la fiabilidad real de la estimación total y de sus partes componentes. Por esa razón, los métodos usados para comunicar la incertidumbre deben ser prácticos, científicamente justificables, lo bastante sólidos como para ser aplicables a una serie de categorías de fuentes, métodos y circunstancias nacionales, y estar presentados de una manera comprensible para usuarios del inventario que no sean especialistas.

Hay muchos motivos para que las emisiones y absorciones reales puedan diferir de la cantidad calculada en un inventario nacional. Esos motivos se analizan con mayor detalle en el anexo 1. Algunas fuentes de incertidumbre (o sea, los errores de muestreo o las limitaciones en la exactitud de los instrumentos) pueden generar estimaciones bien definidas y fácilmente caracterizadas del margen de error potencial. Pero otras fuentes de incertidumbre pueden ser mucho más difíciles de caracterizar. En este capítulo se describe cómo tener en cuenta tanto las incertidumbres estadísticas bien definidas como la información menos específica que caracteriza otras formas de incertidumbre y cómo combinar esa información en una caracterización de la incertidumbre del inventario total y de sus componentes.

Idealmente, tanto las estimaciones de las emisiones como los márgenes de incertidumbre se derivarían de datos medidos específicos de cada fuente. Como no es práctico medir de este modo todas las fuentes de emisiones, las estimaciones suelen basarse en las características conocidas de fuentes típicas consideradas representativas de la población. Esto introduce otras incertidumbres, porque debe suponerse que la población de esas fuentes se comporta, en término medio, como las fuentes que han sido medidas. A veces se sabrá lo bastante acerca de esas fuentes típicas como para determinar empíricamente sus distribuciones de incertidumbre. En la práctica, sin embargo, con frecuencia será necesario el dictamen de expertos para definir los márgenes de incertidumbre.

El enfoque pragmático para producir estimaciones cuantitativas de la incertidumbre en esta situación consiste en usar las mejores estimaciones accesibles; una combinación de los datos medidos disponibles y dictamen de expertos. Los métodos propuestos en este capítulo pueden usarse, por lo tanto, con los márgenes de incertidumbre específicos para cada categoría de fuentes que se exponen en los capítulos 2 a 5, y también permiten incorporar nuevos datos empíricos a medida que se consigan. En este capítulo se describen métodos para obtener dictámenes de expertos de un modo que reduce al mínimo el riesgo de sesgo y se examina el modo

de combinar incertidumbres en los factores de emisión y datos de actividad para estimar las incertidumbres por categorías de fuentes y totales en los inventarios, así como las incertidumbres en las tendencias.

En este capítulo se usan principalmente dos conceptos estadísticos – la función de densidad de probabilidad y los límites de confianza – que se definen formalmente en el anexo 3 y en el glosario y se analizan con más detalle en el anexo 1, "Base conceptual del análisis de incertidumbre". En síntesis, la función de densidad de probabilidad describe el rango y la probabilidad relativa de los valores posibles. Los límites de confianza indican el rango dentro del cual se piensa que se encuentra el valor fundamental de una cantidad incierta para una probabilidad especificada. Este rango se llama intervalo de confianza. En las *Directrices del IPCC* se sugiere usar un intervalo de confianza del 95%, que es el intervalo que tiene un 95% de probabilidad de contener el valor verdadero desconocido.

En el análisis de la incertidumbre que se presenta en este capítulo no se consideran las incertidumbres en los potenciales de calentamiento atmosférico (PCA). Para su presentación, los valores de PCA adoptados en la tercera reunión de la Conferencia de las Partes en la CMCC se convierten, en efecto, en factores fijos de ponderación. Pero debería tenerse presente que los valores de PCA tienen asociadas, en realidad, importantes incertidumbres y que en una evaluación general del total de emisiones debería tomarse en cuenta este hecho.

6.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS INCERTIDUMBRES

La incertidumbre estimada de las emisiones procedentes de fuentes individuales (p.ej. plantas generadoras, vehículos automotores, ganado vacuno) es una función de las características del instrumento, la calibración y la frecuencia de muestreo de las mediciones directas, o bien (lo cual es más frecuente) una combinación de las incertidumbres en los factores de emisión para ciertas fuentes típicas y los correspondientes datos de actividad. Las incertidumbres en los factores de emisión y en los datos de actividad deberían describirse usando las funciones de densidad de probabilidad. Cuando se cuenta con datos para hacerlo, la forma de la función de densidad de probabilidad debería determinarse empíricamente. De lo contrario, será necesario el dictamen de expertos, conforme a las normas expuestas más adelante en la sección 6.2.5, "Dictamen de expertos". En las secciones 6.2.1 a 6.2.4 (a continuación) se dan ejemplos de situaciones típicas que pueden surgir en diferentes circunstancias de disponibilidad de datos. Esas subsecciones están ordenadas según su conveniencia para producir evaluaciones de la incertidumbre.

Las incertidumbres resultan afectadas por la elección del algoritmo de estimación y esto se refleja en las *buenas prácticas*, en las cuales los métodos de nivel superior (siempre que se apliquen) deberían asociarse generalmente con incertidumbres inferiores. En general, las incertidumbres vinculadas con la elección de modelo se reflejarán en los márgenes de incertidumbre derivados del uso en el contexto del modelo elegido.

6.2.1 Incertidumbres asociadas con la vigilancia continua de las emisiones

La vigilancia continua de las emisiones, aunque relativamente rara, suele ser coherente con las *buenas prácticas* específicas para ciertas categorías de fuentes. En ese caso, puede determinarse directamente la función de densidad de probabilidad, y por lo tanto la incertidumbre en las emisiones dentro de límites de confianza del 95%. Las muestras representativas requieren que el equipo empleado para las mediciones esté instalado y funcione de conformidad con los principios y referencias expuestos en el capítulo 8 sobre cuestiones de GC/CC. Siempre que se proceda así, es poco probable que haya correlación de errores en distintos años. Por lo tanto, la función de densidad de probabilidad de la diferencia en las emisiones entre dos años (la incertidumbre de tendencia) estará relacionada simplemente con las funciones de densidad de probabilidad de las emisiones anuales. Suponiendo que ambas funciones de densidad de probabilidad sean normales, la función de densidad de probabilidad de la diferencia en las emisiones será también normal con:

ECUACIÓN 6.1

$$\text{media} = \mu_1 - \mu_2$$

ECUACIÓN 6.2

$$\text{desviación estándar} = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}$$

donde μ_1 y μ_2 son los valores medios de las emisiones en los años t_1 y t_2 , y σ_1 y σ_2 son las desviaciones estándar de las funciones de densidad de probabilidad de las emisiones en los años t_1 y t_2 . Los límites de confianza del 95% (esta vez, de la media o de la diferencia en las medias) estarán dados por más o menos aproximadamente dos desviaciones estándar¹.

6.2.2 Incertidumbres asociadas con la determinación directa de los factores de emisión

En algunos casos, pueden obtenerse mediciones periódicas de las emisiones en un sitio. Si esas mediciones pueden vincularse con datos representativos de actividad, lo cual es crucial, por supuesto, entonces es posible determinar un factor de emisión específico para el sitio, junto con una función de densidad de probabilidad asociada para representar las emisiones anuales.

Puede ser una tarea compleja. Con el fin de lograr representatividad, quizás sea necesario fraccionar (o estratificar) los datos para reflejar condiciones típicas de funcionamiento. Por ejemplo:

- *e arranque y el cierre pueden dar tasas de emisión diferentes con respecto a los datos de actividad.* En este caso, los datos deberían dividirse, derivando factores de emisión y funciones de densidad de probabilidad separados para condiciones de actividad constante, arranque y cierre.
- *los factores de emisión pueden depender de la carga.* En este caso, quizás sea necesario estratificar la estimación de las emisiones totales y el análisis de incertidumbre para tomar en cuenta la carga, expresada, por ejemplo, como porcentaje de la capacidad total. Esto podría hacerse mediante análisis de regresión y diagramas de dispersión de la tasa de emisión contra variables de control probables (p.ej., las emisiones frente a la carga), en las que la carga pasaría a ser parte de los datos de actividad necesarios.
- *las mediciones tomadas con otro fin quizás no sean representativas.* Por ejemplo, las mediciones del metano hechas por razones de seguridad en las minas de carbón y en los vertederos quizás no reflejen las emisiones totales. En tales casos, debería estimarse la relación entre los datos medidos y las emisiones totales para el análisis de incertidumbre.

Si el tamaño de la muestra de datos es lo bastante grande, pueden usarse pruebas estadísticas ordinarias de bondad del ajuste, en combinación con dictámenes de expertos, para ayudar a decidir qué función de densidad de probabilidad usar para describir la variabilidad de los datos (divididos, si es necesario) y cómo determinar sus parámetros. Pero en muchos casos, la cantidad de mediciones a partir de las cuales puede hacerse una inferencia con respecto a la incertidumbre será reducida. Típicamente, mientras haya tres o más puntos de datos y mientras los datos sean una muestra representativa aleatoria de la cantidad de interés, es posible aplicar técnicas estadísticas para estimar los valores de los parámetros de muchas distribuciones de dos parámetros (p.ej., normal, logarítmica normal) que pueden usarse para describir la variabilidad en el conjunto de datos (Cullen y Frey, 1999, págs. 116-117). En muestras de tamaño reducido, habrá grandes incertidumbres con respecto a las estimaciones de parámetros que deberían reflejarse en la cuantificación de la incertidumbre para usar en el inventario de emisiones. Además, típicamente no es posible recurrir a métodos estadísticos para diferenciar la prueba de bondad del ajuste de otras distribuciones de parámetros cuando las muestras son muy pequeñas (Cullen y Frey, 1999, págs. 158-159). Por lo tanto, se requiere mucho criterio para elegir una distribución apropiada de parámetros que convenga a un conjunto de datos muy pequeño. En situaciones en que el coeficiente

¹ En muestras de menos de aproximadamente 30, debería usarse una distribución *t* de Student para estimar los intervalos de confianza.

de variación es inferior a 0,3, una distribución normal puede ser un supuesto razonable (Robinson, 1989). Cuando el coeficiente de variación es grande y la cantidad no es negativa, puede ser apropiada una distribución sesgada positivamente, como una logarítmica normal. Se ofrece orientación sobre la selección de distribuciones en el Anexo 1, "Base conceptual del análisis de incertidumbre", y el empleo de dictámenes de expertos en este contexto se resume más adelante en la sección 6.2.5, "Dictamen de expertos".

6.2.3 Incertidumbres asociadas con los factores de emisión extraídos de referencias publicadas

Cuando no se cuenta con datos específicos de sitios, una *buena práctica* será generalmente preparar estimaciones de emisiones usando factores de emisión extraídos de referencias coherentes con las *Directrices del IPCC* y las *orientaciones de buenas prácticas* específicas para distintas categorías de fuentes que se describen en los capítulos 2 a 5. Esos factores habrán sido medidos en circunstancias particulares que se consideran típicas. Habrá incertidumbres asociadas con las mediciones originales y con el uso de los factores en otras circunstancias distintas de las asociadas con las mediciones originales. Es una función clave de *orientación de buenas prácticas* para cada categoría de fuentes orientar la selección de los factores de emisión para minimizar, en la medida de lo posible, esta segunda fuente de incertidumbre. En la orientación específica para categorías de fuentes se indican también, siempre que se pueda, los márgenes de incertidumbre que probablemente estén asociados con el uso de esos factores.

Cuando se emplean tales factores de emisión, las incertidumbres asociadas deberían estimarse a partir de:

- *investigaciones originales que contengan datos específicos de países*. En cuanto a los factores de emisión basados en mediciones, los datos del programa original de medición pueden permitir una evaluación de la incertidumbre y quizás de la función de densidad de probabilidad. Los programas de medición bien diseñados ofrecerán datos de muestras que abarquen el espectro de tipos de plantas y su mantenimiento, tamaño y antigüedad, de modo que los factores y sus incertidumbres puedan ser usados directamente. En otros casos, será necesario el dictamen de expertos para extrapolar de las mediciones a la población total de plantas en esa categoría particular de fuentes/sumideros;
- *orientación de buenas prácticas*. Para la mayoría de los factores de emisión, la *orientación de buenas prácticas* específica para ciertas categorías de fuentes proporciona estimaciones por defecto de la incertidumbre que deberían usarse a falta de otra información. Salvo que se disponga de claras evidencias en contrario, se supone que las funciones de densidad de probabilidad son normales. Sin embargo, el organismo encargado del inventario debería evaluar la representatividad de los valores por defecto para su propia situación. Si se juzga que los valores por defecto no son representativos y que la categoría de fuentes es importante para el inventario, deberían prepararse mejores supuestos basados en dictamen de expertos.

Un factor de emisión que sobrestime o subestime las emisiones en el año base probablemente hará lo mismo en los años subsiguientes. Por lo tanto, las incertidumbres debidas a los factores de emisión tenderán a estar correlacionadas a través del tiempo.

6.2.4 Incertidumbres asociadas con los datos de actividad

Los datos de actividad suelen estar vinculados más estrechamente a la actividad económica que los factores de emisión. Suele haber incentivos de precios y requisitos fiscales bien establecidos para lograr una contabilidad exacta de la actividad económica. Los datos de actividad tienden, por lo tanto, a mostrar menores incertidumbres y menor correlación entre distintos años. Los datos de actividad suelen ser recopilados y publicados regularmente por los organismos nacionales de estadísticas. Es posible que esos organismos ya hayan evaluado las incertidumbres asociadas con sus datos, como parte de sus procedimientos de recopilación de datos. Esas incertidumbres pueden usarse para construir funciones de densidad de probabilidad. No es forzoso que esa información haya sido publicada, de modo que es una *buena práctica* comunicarse directamente con los organismos de estadísticas. Como en general no se compilan datos de actividad económica con el fin de estimar las emisiones de gases de efecto invernadero, debería evaluarse la aplicabilidad de los datos antes de usarlos.

He aquí algunos ejemplos de cuestiones generales y específicas que pueden surgir en cuanto a la cobertura, representatividad y posibilidad de repetición de un año a otro:

- *interpretación de diferencias estadísticas.* Las diferencias estadísticas en el balance energético suelen representar una diferencia entre la cantidad de combustibles primarios presentados y la cantidad de combustibles identificados en las categorías “consumo final” y “en transformación”. Pueden dar un indicio de la magnitud de las incertidumbres de los datos, especialmente cuando se consideran series de larga duración;
- *interpretación de los balances energéticos.* Los datos de producción, uso e importación/exportación deberían ser coherentes. En caso contrario, esto puede dar un indicio de las incertidumbres;
- *confrontaciones.* Quizás sea posible comparar dos tipos de datos de actividad que se aplican a la misma fuente para suministrar un indicio de los márgenes de incertidumbre. Por ejemplo, la suma del uso de combustible para vehículos debería corresponder a la suma por tipos de vehículos del producto de vehículos-km por la eficiencia en el consumo de combustible;
- *cantidades y tipos de vehículos.* Algunos países mantienen detalladas bases de datos de registro de vehículos con datos sobre los vehículos clasificados por tipo, antigüedad, tipo de combustible y tecnología de control de las emisiones, todo lo cual puede ser importante para un inventario detallado de abajo a arriba de las emisiones de metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) de tales vehículos. Otros no disponen de información tan detallada y esto tenderá a aumentar la incertidumbre;
- *contrabando de combustible a través de las fronteras.* Puede ser importante y puede introducir un sesgo en los datos de actividad. Como confrontación, pueden compararse el consumo manifiesto y la suma del uso sectorial de combustible;
- *combustibles de biomasa.* Cuando no existen mercados formales para estos combustibles, las estimaciones del consumo pueden ser mucho menos exactas que para los combustibles en general;
- *datos de la población ganadera.* La exactitud dependerá del alcance y la fiabilidad de los censos y métodos de encuesta nacionales y puede haber diferentes convenciones de contabilidad para los animales que no viven un año entero.

Los organismos encargados de los inventarios pueden emprender también investigaciones especializadas para recopilar otros datos de actividad, coherentes con la *buena práctica* en la priorización de las actividades orientadas hacia las *categorías principales de fuentes* (o sea, las categorías de fuentes que influyen de modo importante en el inventario total de gases de efecto invernadero directo, en términos del nivel absoluto de emisiones, la tendencia en las emisiones, o ambos conceptos, como se describe en el capítulo 7, "Elección de la metodología y realización de nuevos cálculos").

Las funciones de densidad de probabilidad asociadas con los datos de actividad pueden ser difíciles de evaluar. Los procedimientos expuestos en este capítulo deberían aplicarse a la información disponible, de conformidad con el consejo sobre la interpretación de los dictámenes de expertos que figura en la sección siguiente.

6.2.5 Dictamen de expertos

A falta de datos empíricos, será necesario basar en dictámenes de expertos las estimaciones de la incertidumbre en los factores de emisión o las mediciones directas de las emisiones. Las estimaciones de la incertidumbre en los datos de actividad se basarán a menudo en dictámenes de expertos, informados en la medida de lo posible mediante confrontaciones como las descritas en la sección anterior.

Los expertos son personas que tienen pericia o conocimientos especiales en un campo determinado. Un dictamen es la formulación de una estimación o conclusión a partir de la información presentada o accesible para el experto. Es importante seleccionar los expertos apropiados con respecto a las entradas en el inventario de emisiones para el que se necesitan las estimaciones de la incertidumbre.

El objetivo del dictamen de expertos en este caso es elaborar una función de densidad de probabilidad, teniendo en cuenta la información pertinente, tal como:

- ¿La fuente de emisiones es similar a otras fuentes? ¿Cómo se compara probablemente la incertidumbre?
- ¿Hasta qué punto se conoce bien el proceso de emisión? ¿Se han identificado todas las fuentes posibles de emisión?
- ¿Existen límites físicos acerca de cuánto puede variar el factor de emisión? Salvo que el proceso sea reversible, no se puede emitir menos de cero, y esto puede limitar un margen de incertidumbre muy amplio.

Las consideraciones sobre el balance de masa u otros datos de proceso pueden fijar un límite superior a las emisiones.

- ¿Las emisiones son coherentes con las concentraciones en la atmósfera? Las emisiones se reflejan en las concentraciones en la atmósfera en escalas específicas para cada sitio y mayores, y esto también puede limitar los posibles índices de emisión.

Se requiere cierta dosis de dictamen de expertos aun cuando se apliquen técnicas estadísticas clásicas a conjuntos de datos, ya que se debe juzgar si los datos son una muestra representativa aleatoria y, en caso afirmativo, qué métodos emplear para analizar esos datos. Esto puede exigir un dictamen tanto técnico como estadístico. Se necesita en especial interpretación para los conjuntos de datos reducidos, muy sesgados o censurados². Los métodos formales para obtener datos de los expertos se conocen como *solicitud de dictamen de expertos*.

SESGOS POSIBLES EN LA SOLICITUD DE DICTAMEN DE EXPERTOS

Siempre que sea posible, el dictamen de expertos con respecto a la incertidumbre debería obtenerse usando un protocolo apropiado. Una vez identificados los expertos, deberían diseñarse protocolos de solicitud de dictamen para superar los sesgos que pueden introducir las reglas empíricas (a veces llamadas *heurística*) que usan los expertos al formular juicios acerca de la incertidumbre.

Los sesgos inconscientes más comunes introducidos por las reglas empíricas son:

- *el sesgo de la disponibilidad*. Consiste en basar los dictámenes en los resultados que se recuerdan más fácilmente.
- *el sesgo de la representatividad*. Consiste en basar los dictámenes en datos y experiencia limitados sin considerar plenamente otras evidencias pertinentes.
- *el sesgo de anclaje y ajuste*. Consiste en fijarse en un valor determinado en una escala y realizar ajustes insuficientes a partir del mismo al construir una estimación de la incertidumbre.

Para contrarrestar las dos primeras fuentes potenciales de sesgos, en los protocolos de solicitud de dictamen debería incluirse un examen de las indicaciones pertinentes. Para contrarrestar la tercera fuente potencial de sesgo, es importante pedir al experto que emita primero sus juicios acerca de los valores extremos, antes de solicitar dictámenes acerca de los valores centrales de una distribución. Cuando un experto indica un rango demasiado estrecho de valores, se habla de ‘exceso de confianza’. A menudo los expertos subestiman sistemáticamente las incertidumbres, según Morgan y Henrion (1990). Conviene evitar el exceso de confianza para no subestimar la verdadera incertidumbre.

Existe también la posibilidad de sesgos más conscientes:

- *el sesgo por motivación* es el deseo de un experto de influir en un resultado o evitar la contradicción con posturas anteriores sobre una cuestión;
- *el sesgo de experto* surge del deseo de un experto no calificado de aparecer como un verdadero especialista en la materia. Esto llevaría típicamente a estimaciones de la incertidumbre con exceso de confianza;
- *el sesgo gerencial* es una situación en la cual un experto emite dictámenes para alcanzar los objetivos de la organización, en vez de juicios que reflejen el estado real de los conocimientos con respecto a una entrada de inventario;
- *el sesgo de selección* se produce cuando el organismo encargado del inventario elige un experto que dice lo que el organismo quiere oír.

El mejor modo de evitar estos sesgos es ser cuidadoso en la selección de los expertos.

Los dictámenes de expertos pueden solicitarse a personas o grupos. Los grupos pueden ser útiles para intercambiar conocimientos y por ende podrían ser parte de la motivación, estructuración y etapas de condicionamiento de la solicitud. Pero la dinámica de grupo puede introducir otros sesgos. Por eso suele ser preferible solicitar dictámenes a título individual.

² En tales casos, puede ser útil considerar un método numérico, como el *bootstrap*, para caracterizar las distribuciones de la muestra. Los métodos para caracterizar las distribuciones de la muestra para la media se describen en Cullen y Frey (1999), Frey y Rhodes (1996), y Frey y Burmaster (1999).

UN PROTOCOLO PARA LA SOLICITUD DE DICTAMEN DE EXPERTOS

Un ejemplo de protocolo muy conocido para la solicitud de dictamen de expertos es el protocolo Stanford/SRI. A continuación se describen sus cinco etapas y se presenta un ejemplo de su empleo en el recuadro 6.1, “Breve ejemplo de dictamen detallado de expertos”.

- *motivación*: Establezca relación con el experto y describa el contexto de la solicitud de dictamen. Explique el método de solicitud que se va a usar y la razón por la que fue diseñado así. El solicitante debería tratar de explicar también al experto los sesgos que se producen con más frecuencia e identificar posibles sesgos en el experto;
- *estructuración*: Defina claramente las cantidades sobre las que se solicita dictamen, incluso, por ejemplo, el año y el país, la categoría de fuentes de emisión, el lapso medio que se va a usar (un año), el enfoque sobre la incertidumbre en el valor medio de los factores de emisión y la estructura del modelo de inventario de emisión. Identifique claramente los factores y supuestos condicionantes (p.ej. las emisiones deberían corresponder a condiciones típicas promediadas en un período de un año);
- *condicionamiento*: Conjuntamente con el experto, determine todos los datos, modelos y teoría pertinentes que correspondan a la cantidad sobre cuya incertidumbre se requiere el dictamen;
- *codificación*: Solicite el dictamen del experto con respecto a la incertidumbre. En la sección siguiente sobre la codificación se describen algunos otros métodos que pueden usarse alternativamente;
- *verificación*: Analice la respuesta del experto y comuníquese la conclusión a la que se ha llegado con respecto a su dictamen. ¿Se ha codificado realmente lo que quería decir el experto? ¿Hay incoherencias en el dictamen del experto?

MÉTODOS PARA CODIFICAR LOS DICTÁMENES DE EXPERTOS

El método que se use en la etapa de codificación debería depender de la familiaridad del experto con las distribuciones de probabilidad. Algunos métodos que se utilizan corrientemente son:

- *valor fijo*: Estime la probabilidad de que sea superior (o inferior) a un valor arbitrario y repítalo, típicamente, tres o cinco veces. Por ejemplo, ¿cuál es la probabilidad de que un factor de emisión sea inferior a 100?;
- *probabilidad fija*: Estime el valor asociado con una probabilidad determinada de que sea superior (o inferior). Por ejemplo, ¿cuál es el factor de emisión tal que sólo haya un 2,5 % de probabilidad (o sea una oportunidad sobre 40) de que el factor de emisión pueda ser inferior (o superior) a ese valor?;
- *métodos de intervalo*: Este método se concentra en la mediana y los cuartiles. Por ejemplo, se pediría al experto que elija un valor del factor de emisión tal que sea igualmente probable que el verdadero factor de emisión sea inferior o superior a ese valor. Esto da la mediana. Luego el experto dividiría el rango inferior en dos lotes tales que a su juicio será igualmente probable (25 % de probabilidad) que el factor de emisión caiga en uno u otro lote, y esto se repetiría en el otro extremo de la distribución. Por último, podría usarse el método de la probabilidad fija o el del valor fijo para obtener dictámenes para los valores extremos;
- *trazado de gráficos*: El experto traza sus propias distribuciones. Esto debería usarse con cuidado, porque algunos expertos confían demasiado en su propio conocimiento de las distribuciones de probabilidad.

RECUADRO 6.1**BREVE EJEMPLO DE DICTAMEN DE EXPERTOS DETALLADO**

Supongamos que el organismo encargado del inventario ha identificado una experta en emisiones de metano procedentes de plantas generadoras y desea obtener su dictamen acerca de la incertidumbre en las emisiones medias anuales para esa categoría de fuentes. Como parte de la etapa de motivación, el solicitante le ha explicado a la experta el propósito en general del análisis y el protocolo de solicitud de dictamen de experto que se usará. En la etapa de estructuración, el solicitante establece, junto con la experta, el protocolo de solicitud específico. Por ejemplo, aunque quizás todo lo que el organismo encargado del inventario desea es una estimación de la incertidumbre media anual, la experta puede decirle al solicitante que ella prefiere presentar dictámenes por separado para las operaciones de arranque, con carga parcial y con plena carga de la planta, y que esos tres dictámenes deberían ponderarse para encontrar la incertidumbre combinada para un promedio anual. Después de estructurar el problema, el solicitante examina la información de la experta pertinente para la evaluación como, por ej., las mediciones que puedan haberse hecho sobre tipos semejantes de plantas generadoras u otras fuentes de combustión. En la etapa de solicitud, el solicitante podría preguntarle a la experta por un valor superior tal que sólo exista una oportunidad sobre 40 (probabilidad de 2,5 %) de obtener un valor más alto. Después de obtener el valor, el solicitante le pide a la experta que explique el fundamento lógico de esa estimación, como el escenario de funcionamiento de la planta que podría conducir a ese índice elevado de emisión. Luego podría repetirse el proceso para el extremo inferior del rango, y quizás para la mediana, el percentil 25 y el percentil 75. Podría usarse una mezcla de preguntas de valor fijo y de probabilidad fija. El solicitante debería proyectarlas sobre un gráfico, de modo que pueda identificarse y corregirse toda incoherencia durante el tiempo en que se cuenta con la experta. En la etapa de verificación, el solicitante debería asegurarse de que la experta esté satisfecha de que su dictamen ha quedado bien representado. El solicitante podría observar también cómo reaccionaría la experta ante la posibilidad de valores fuera del intervalo para el cual se suministraron los dictámenes, con el fin de asegurarse de que la experta no incurra en exceso de confianza.

A veces el único dictamen de expertos disponible consistirá en un rango, quizás citado junto con el valor más probable. En tales circunstancias, se aplican las siguientes reglas:

- Cuando los expertos sólo aportan un valor límite superior e inferior, suponga que la función de densidad de probabilidad es uniforme y que el rango corresponde al intervalo de confianza del 95%.
- Cuando los expertos ofrecen también el valor más probable, suponga una función de densidad de probabilidad triangular usando los valores más probables como la moda y suponiendo que los valores límites superior e inferior excluyen cada uno el 2,5% de la población. No es necesario que la distribución sea simétrica.

Algunas otras fuentes de información sobre la solicitud de dictámenes de expertos incluyen a Spetzler y von Holstein (1975), Morgan y Henrion (1990), Merkhofer (1987), Hora e Iman (1989) y NCRP (1996).

El carácter subjetivo de los dictámenes de expertos aumenta la necesidad de procedimientos de garantía de la calidad y control de calidad para mejorar la comparabilidad de las estimaciones de la incertidumbre entre países. Por lo tanto, los dictámenes de expertos deberían documentarse como parte del proceso nacional de archivo y se alienta a los organismos encargados de los inventarios a examinar los dictámenes de expertos, en particular para las *categorías principales de fuentes*. La documentación debería contener:

- el número de referencia del dictamen;
- la fecha;
- la(s) persona(s) participante(s) y su afiliación;
- la cantidad que se juzga;
- la base lógica del dictamen, incluso todo dato tomado en consideración;
- la distribución de probabilidad resultante, o el rango y el valor más probable y la distribución de probabilidad deducida en consecuencia;
- la identificación de todo examinador externo;
- los resultados de todo examen externo;
- la aprobación del organismo encargado del inventario, especificando la fecha y la persona.

6.3 MÉTODOS PARA COMBINAR INCERTIDUMBRES

Una vez determinadas las incertidumbres en las categorías de fuentes, las mismas pueden combinarse para brindar estimaciones de la incertidumbre para todo el inventario en cualquier año y la incertidumbre en la tendencia general del inventario a través del tiempo.

La ecuación de propagación de errores, que se examina más detenidamente en el anexo I del presente informe y en el anexo I de las *Directrices del IPCC* (“Instrucciones de presentación”), ofrece dos reglas convenientes para combinar las incertidumbres no correlacionadas mediante adición y multiplicación:

- *Regla A:* Cuando las cantidades inciertas se van a combinar por adición, la desviación estándar de la suma será la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las desviaciones estándar de las cantidades que se suman, con todas las desviaciones estándar expresadas en términos absolutos (esta regla es exacta para las variables no correlacionadas).

Usando esta interpretación, puede derivarse una ecuación simple para la incertidumbre de la suma, que cuando se expresa en términos de porcentaje se convierte en:

ECUACIÓN 6.3

$$U_{\text{total}} = \frac{\sqrt{(U_1 \cdot x_1)^2 + (U_2 \cdot x_2)^2 + \dots + (U_n \cdot x_n)^2}}{x_1 + x_2 + \dots + x_n}$$

Donde:

U_{total} es la incertidumbre porcentual en la suma de las cantidades (la mitad del intervalo de confianza del 95% dividido por el total (o sea, la media) y expresada como porcentaje);

x_i y U_i son las cantidades inciertas y las incertidumbres porcentuales asociadas con ellas, respectivamente.

- *Regla B:* Cuando las cantidades inciertas se van a combinar por multiplicación, se aplica la misma regla, excepto que todas las desviaciones estándar deben expresarse como fracciones de los valores medios apropiados (esta regla es aproximativa para todas las variables aleatorias).

También puede derivarse una ecuación simple para la incertidumbre del producto, expresada en términos porcentuales:

ECUACIÓN 6.4

$$U_{\text{total}} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}$$

Donde:

U_{total} es la incertidumbre porcentual en el producto de las cantidades (la mitad del intervalo de confianza de 95% dividida por el total y expresada como porcentaje);

U_i son las incertidumbres porcentuales asociadas con cada una de las cantidades.

El inventario de gases de efecto invernadero es principalmente la suma de los productos de los factores de emisión y los datos de actividad. Por lo tanto, las reglas A y B pueden usarse repetidamente para estimar la incertidumbre del inventario total. En la práctica, las incertidumbres encontradas en las categorías de fuentes del inventario varían desde unos pocos puntos porcentuales hasta órdenes de magnitud, y pueden correlacionarse. Esto no es coherente con los supuestos de las reglas A y B de que las variables no están correlacionadas con una desviación estándar de menos de un 30% de la media, pero en tales circunstancias, aún pueden usarse las reglas A y B para obtener un resultado aproximativo. Otra alternativa es usar una simulación estocástica (el método de Monte Carlo), que puede combinar incertidumbres con cualquier estructura de distribución de probabilidad, rango y correlación, siempre que hayan sido debidamente cuantificadas. Así, se describen a continuación dos niveles de análisis de la incertidumbre:

- *Nivel 1:* Estimación de las incertidumbres por categoría de fuentes usando la ecuación de propagación de errores mediante las reglas A y B y una combinación simple de las incertidumbres por categoría de fuentes para estimar la incertidumbre general para un año y la incertidumbre en la tendencia.

- *Nivel 2*: Estimación de las incertidumbres por categoría de fuentes usando el análisis de Monte Carlo, seguido del uso de técnicas de Monte Carlo para estimar la incertidumbre general para un año y la incertidumbre en la tendencia.

El análisis de Monte Carlo puede usarse también de manera limitada dentro del nivel 1 para combinar incertidumbres en los datos de actividad y los factores de emisión que tienen distribuciones de probabilidad muy amplias o no normales, o ambas. Este enfoque puede ayudar también a tratar categorías de fuentes dentro del nivel 1 que se han estimado mediante modelos de proceso, en vez del cálculo clásico de “factor de emisión por datos de actividad”. La opción entre métodos se examina en la sección 6.3.1 a continuación.

6.3.1 Comparación entre niveles y elección del método

El empleo del nivel 1 o del nivel 2 brindará una idea mucho más clara que la que se tenía acerca del modo en que cada categoría individual de fuentes y cada gas de efecto invernadero contribuye a la incertidumbre en las emisiones totales en cualquier año y a la tendencia en las emisiones totales en distintos años.

La aplicación del nivel 2 al inventario del Reino Unido (Eggleston *et al.*, 1998) sugiere que el intervalo de confianza del 95% es asimétrico y está entre un 7% por debajo y un 20% por arriba de la media. La aplicación del nivel 1 (véase el apéndice 6A.2, “Ejemplo de cálculo de la incertidumbre de nivel 1”) sugiere una incertidumbre de alrededor de $\pm 20\%$. Como las aproximaciones inherentes en el nivel 1 significan que no puede hacer frente a la asimetría, esta comparación es alentadora. Físicamente, el motivo de la asimetría identificada en el nivel 2 es que el margen de incertidumbre de algunas categorías de fuentes muy inciertas está limitado por el conocimiento de que las emisiones no pueden ser inferiores a cero. En el método de nivel 2 se puede utilizar este conocimiento extra, pero en el método de nivel 1 no. En cuanto a las tendencias en distintos años, el estudio de nivel 2 de Eggleston *et al.* sugiere que el intervalo de confianza del 95% es bastante simétrico y está entre 5% por arriba y 5% por debajo de la media³. El correspondiente resultado de nivel 1 da un margen de alrededor de $\pm 2\%$. El valor inferior en el nivel 1 se debe en parte a que la tendencia estimada aquí corresponde al período 1990 - 1997, mientras que la estimación de nivel 2 era para 1990 - 2010, pero no es probable que esto permita explicar todas las diferencias. Sin embargo, ambos métodos todavía dan magnitudes semejantes para la incertidumbre en la tendencia, que es más baja que la incertidumbre en las emisiones totales en cualquier año.

Sería muy útil para mejorar la comprensión contar con más comparaciones nacionales entre métodos. El método de nivel 1, por basarse en una hoja de cálculo, es muy fácil de aplicar y no representaría un esfuerzo adicional para un organismo encargado del inventario emprender también el nivel 2. Por lo tanto, para el presente, es una *buena práctica* que todos los países emprendan análisis de incertidumbre para presentar resultados en el nivel 1, y que todos los organismos encargados de los inventarios con suficientes recursos y competencia técnica acometan los de nivel 2.

6.3.2 Nivel 1 – Estimación de las incertidumbres por categoría de fuentes con supuestos simplificadores

En el análisis de nivel 1 se estiman las incertidumbres usando la ecuación de propagación de errores en dos etapas. Primero, se usa la aproximación de la regla B para combinar los rangos de factores de emisión y datos de actividad por categoría de fuentes y gases de efecto invernadero. En segundo lugar, se emplea la aproximación de la regla A para obtener la incertidumbre general en las emisiones nacionales y la tendencia en las emisiones nacionales entre el año base y el año en curso.

El enfoque de nivel 1 debería aplicarse usando el cuadro 6.1, “Cálculo y presentación de la incertidumbre en el nivel 1”, que puede elaborarse con un programa informático comercial de hoja de cálculo. El cuadro se completa en la categoría de fuentes usando márgenes de incertidumbre para los datos de actividad y los factores de emisión coherentes con la *orientación de buenas prácticas* sectorial que figura en los capítulos 2 a 5. Los diferentes gases deberían anotarse por separado como equivalentes de CO₂ (o sea, que las emisiones deberían multiplicarse por los valores de PCA para 100 años). Las incertidumbres en la tendencia se estiman usando dos sensibilidades:

³ Específicamente, una caída en las emisiones de $6 \pm 5\%$.

- *Sensibilidad de tipo A*: el cambio en la diferencia en las emisiones generales entre el año base y el año en curso, expresado como porcentaje, resultante de un aumento del 1% en las emisiones de determinadas categorías de fuentes y gases, tanto en el año base como en el año en curso.
- *Sensibilidad de tipo B*: el cambio en la diferencia en las emisiones generales entre el año base y el año en curso, expresado como porcentaje, resultante de un aumento del 1% en las emisiones de determinadas categorías de fuentes y de gases, sólo en el año en curso.

Conceptualmente, la sensibilidad de tipo A surge de las incertidumbres que afectan por igual a las emisiones en el año base y en el año en curso, y la sensibilidad de tipo B surge de las incertidumbres que sólo afectan a las emisiones en el año en curso. Las incertidumbres que están plenamente correlacionadas en distintos años se asociarán con las sensibilidades de tipo A y las incertidumbres no correlacionadas en distintos años se asociarán con las sensibilidades de tipo B. Lo expuesto en las secciones 6.2.1 a 6.2.4 sugiere que las incertidumbres en el factor de emisión tenderán a tener sensibilidades de tipo A y las incertidumbres en los datos de actividad tenderán a tener las de tipo B. Pero esta asociación no siempre se da y es posible aplicar sensibilidad de tipo A a los datos de actividad y sensibilidad de tipo B a los factores de emisión para reflejar circunstancias nacionales particulares. Las sensibilidades de tipo A y tipo B son simplificaciones que se aplican al análisis de correlación.

Una vez calculadas las incertidumbres introducidas en las emisiones nacionales por las sensibilidades de tipo A y de tipo B, las mismas pueden sumarse usando la ecuación de propagación de errores (regla A) para dar la incertidumbre general en la tendencia.

Las columnas del cuadro 6.1, “Cálculo y presentación de la incertidumbre en el nivel 1”, están rotuladas de A a Q y contienen la siguiente información:

- A y B muestran la categoría de fuentes y gases de efecto invernadero del IPCC;
- C y D son las estimaciones de inventarios en el año base y en el año en curso⁴ respectivamente, para la categoría de fuentes y el gas especificados en las columnas A y B, expresados en equivalentes de CO₂;
- E y F contienen las incertidumbres para los datos de actividad y factores de emisión respectivamente, derivados de una mezcla de datos empíricos y dictamen de expertos, como ya se ha descrito en este capítulo, anotados como la mitad del intervalo de confianza del 95% dividida por la media y expresado como porcentaje. La razón de reducir a la mitad el intervalo de confianza del 95% es que el valor anotado en las columnas E y F corresponde entonces al valor familiar más o menos cuando las incertidumbres se citan vagamente como “más o menos x %”, de modo que los dictámenes de expertos de este tipo pueden incorporarse directamente a la hoja de cálculo. Si se sabe que la incertidumbre es muy asimétrica, hay que anotar la mayor diferencia en el porcentaje entre la media y el límite de confianza;
- G es la incertidumbre combinada por categoría de fuentes derivada de los datos de las columnas E y F usando la ecuación de propagación de errores (regla B). La entrada en la columna G es, por lo tanto, la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las entradas en las columnas E y F;
- en H se muestra la incertidumbre de la columna G como porcentaje de las emisiones nacionales totales en el año en curso. Esta es una medida del grado de incertidumbre introducido en el total de emisiones nacionales por la categoría de fuentes en cuestión. La entrada en cada línea de la columna H es la entrada en la columna G multiplicada por la entrada en la columna D, dividida por el total al pie de la columna D. El total al pie de la columna H es una estimación de la incertidumbre porcentual en las emisiones nacionales totales en el año en curso, calculada a partir de las entradas precedentes usando la regla A. Este total se obtiene sumando los cuadrados de todas las entradas en la columna H y sacando la raíz cuadrada;
- en I se muestra cómo cambia la diferencia porcentual en las emisiones entre el año base y el año en curso en respuesta a un aumento del 1 % en las emisiones de la categoría de fuentes, tanto en el año base como en el año en curso. Esto muestra la sensibilidad de la tendencia en las emisiones a una incertidumbre sistemática en la estimación de las emisiones (o sea, una incertidumbre correlacionada entre el año base y el año en curso). Es la sensibilidad de tipo ya definida antes. En el apéndice 6A.1 se muestra la derivación para la fórmula correspondiente a las entradas de la columna I;
- en J se muestra cómo cambia la diferencia porcentual en las emisiones entre el año base y los cambios del año en curso en respuesta a un aumento del 1 % en las emisiones de la categoría de fuentes, sólo en el año en curso. Esto muestra la sensibilidad de la tendencia de las emisiones a un error aleatorio en la estimación de las emisiones (o sea, no correlacionado, entre el año de base y el año en curso). Es la sensibilidad de tipo B que ya se ha descrito. La fórmula para las entradas en la columna J se deriva en el apéndice 6A;

⁴ El año en curso es el año más reciente para el que se cuenta con datos de inventario.

- en K se usa la información de las columnas I y F para mostrar la incertidumbre introducida en la tendencia en las emisiones por la incertidumbre en el factor de emisión, bajo el supuesto de que la incertidumbre en los factores de emisión está correlacionada en distintos años. Si el usuario decide que las incertidumbres en el factor de emisión no están correlacionadas en distintos años, debería usarse la entrada de la columna J en vez de la entrada de la columna I y multiplicar el resultado por $\sqrt{2}$. La fórmula para las entradas de la columna K se deriva en el apéndice 6A;
- en L se usa la información de las columnas J y E para mostrar la incertidumbre introducida en la tendencia en las emisiones por la incertidumbre en los datos de actividad, bajo el supuesto de que la incertidumbre en los datos de actividad no está correlacionada en distintos años. Si el usuario decide que las incertidumbres en los datos de actividad están correlacionadas en distintos años, debería usarse la entrada de la columna I en vez de la entrada de la columna J y entonces no se aplica el factor $\sqrt{2}$. La fórmula para las entradas de la columna L se deriva en el apéndice 6A;
- M es una estimación de la incertidumbre introducida en la tendencia en las emisiones nacionales por la categoría de fuentes en cuestión. En el nivel 1, esto se deriva de los datos que figuran en las columnas K y L utilizando la regla B. Por lo tanto, la entrada en la columna M es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las entradas en las columnas K y L. El total al pie de esta columna es una estimación de la incertidumbre total en la tendencia, calculada a partir de las entradas precedentes usando la ecuación de propagación de errores. Este total se obtiene sumando los cuadrados de todas las entradas en la columna M y sacando la raíz cuadrada. La fórmula para las entradas de la columna M y el total al pie de la columna M se muestra en el apéndice 6A.1;
- las columnas N a Q se usan para indicadores y referencias al pie de página;
- N contiene D, M o R, según que el rango de la incertidumbre en el factor de emisión se base en información por defecto sobre orientación en la categoría de fuentes (D), en mediciones efectuadas con ese fin (M) o en información sobre referencias nacionales (R);
- O contiene D, M o R, según que el rango de la incertidumbre en los datos de actividad se base en información por defecto sobre orientación en el sector, en mediciones efectuadas con ese fin o en información sobre referencias nacionales;
- P contiene los números de referencia de los dictámenes de expertos utilizados para estimar incertidumbres en esta categoría de fuentes;
- Q contiene el número de la nota explicativa al pie del cuadro para identificar la referencia documental de los datos sobre incertidumbre (incluso los datos medidos) u otros comentarios pertinentes para la línea.

Se presenta un ejemplo de la hoja de cálculo completada con todos los datos numéricos en el apéndice 6A.2, “Ejemplo de cálculo de la incertidumbre en el nivel 1”.

CUADRO 6.1
CÁLCULO Y PRESENTACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN EL NIVEL 1

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Categoría de fuentes del IPCC	Gas	Emisiones año base	Emisiones año t	Incerti-dumbre en los datos de actividad	Incerti-dumbre en el factor de emisión	Incerti-dumbre combinada	Incertidum-bre combi-nada como % del total de emisiones nacionales en el año t	Sensi-bilidad de tipo A	Sensi-bilidad de tipo B	Incertidumbre en la tendencia en las emisiones nacionales introducida por la incertidumbre en el factor de emisión	Incertidumbre en la tendencia en las emisiones nacionales introducida por la incertidum-bre en los datos de actividad	Incertidumbre introducida en la tendencia en las emisiones nacionales totales
		Datos de entrada	Datos de entrada	Datos de entrada	Datos de entrada	$\sqrt{E^2 + F^2}$	$\frac{G \cdot D}{\Sigma D}$	Nota B	$\frac{D}{\Sigma C}$	I • F Nota C	J • E • $\sqrt{2}$ Nota D	$\sqrt{K^2 + L^2}$
		Gg equivalente CO ₂	Gg equivalente CO ₂	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Por ej. 1.A.1. Combustible 1 para industrias de energía	CO ₂											
Por ej. 1.A.1. Combustible 2 para industrias de energía	CO ₂											
Etc...	...											
		ΣC	ΣD				$\sqrt{\Sigma H^2}$					$\sqrt{\Sigma M^2}$
Total												

CUADRO 6.1 (CONTINUACIÓN)					
CÁLCULO Y PRESENTACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN EL NIVEL 1					
A (cont.)	B (cont.)	N	O	P	Q
Categoría de fuentes del IPCC	Gas	Indicador de calidad del factor de emisión	Indicador de calidad de los datos de actividad	Números de referencia del dictamen de expertos	Número de referencia de la nota al pie
		Nota E	Nota E		
P.ej. 1.A.1. Combustible 1 para industrias de energía	CO ₂				
P.ej. 1.A.1. Combustible 2 para industrias de energía	CO ₂				
Etc...	...				
Total					

Nota A Si se conoce la incertidumbre total para una categoría de fuentes (no para un factor de emisión y datos de actividad por separado), entonces:

- Si hay una correlación de la incertidumbre a través de los años, anote la incertidumbre en la columna F y anote 0 en la columna E;
- Si no hay una correlación de la incertidumbre a través de los años, anote la incertidumbre en la columna E y anote 0 en la columna F.

Nota B

$$\frac{0.01 \cdot D_x + \sum D_i - (0.01 \cdot C_x + \sum C_i)}{(0.01 \cdot C_x + \sum C_i)} \cdot 100 - \frac{\sum D_i - \sum C_i}{\sum C_i} \cdot 100$$

Nota C

En el caso de que no se suponga ninguna correlación entre los factores de emisión, debería usarse la sensibilidad B y multiplicar el resultado por $\sqrt{2}$:

$$K_x = J_x \cdot F_x \cdot \sqrt{2}$$

Nota D

En el caso de que se suponga una correlación entre los datos de actividad, debería usarse la sensibilidad A y no se requiere la $\sqrt{2}$:

$$L_x = I_x \cdot E_x$$

Nota E

Use las siguientes abreviaturas:

D – categoría de fuentes por defecto del IPCC

M – basado en medidas

R – datos de referencia nacional

6.3.3 Agregación y presentación de datos en el nivel 1

En el cuadro 6.1, “Cálculo y presentación de la incertidumbre en el nivel 1”, hay un renglón para cada categoría de fuentes, combustible (cuando corresponda) y gases de efecto invernadero, que deberían usarse para la presentación de los datos.

Aunque el método de nivel 1 permite la correlación en el tiempo, como se ha descrito, no contempla la correlación y dependencia entre categorías de fuentes que pueden producirse porque pueden usarse los mismos datos de actividad o factores de emisión para múltiples estimaciones. Con frecuencia, un gas domina la categoría de fuentes y esto reduce el efecto de cualquier correlación. Pero la correlación y la dependencia pueden ser importantes para los combustibles de origen fósil, porque un combustible dado se usa con el mismo factor de emisión en varias subcategorías y si (como es el caso a veces) el consumo total de un combustible se conoce mejor que el consumo desglosado por categorías de fuentes, existirán dependencias ocultas en las estadísticas debido a la limitación que ofrece el consumo general. La dependencia y la correlación pueden tratarse agregando las categorías de fuentes hasta el nivel del consumo general de cada combustible antes de combinar las incertidumbres. Esto acarrea cierta pérdida de detalles en la presentación de las incertidumbres, pero dará cuenta de las dependencias donde se piensa que son importantes (p.ej., cuando las incertidumbres en las emisiones de combustibles de origen fósil, agregadas a partir del nivel de las categorías de fuentes, son superiores a lo previsto). El ejemplo de cálculo de nivel 1 usando datos del Reino Unido que se presenta en el apéndice 6A.2 tiene las categorías de combustibles de origen fósil agregadas de este modo. Esa ha sido la ventaja de permitir la compatibilidad con las categorías sugerida en el capítulo 7 para el análisis de las *categorías principales de fuentes*.

6.4 NIVEL 2 – ESTIMACIÓN DE LAS INCERTIDUMBRES POR CATEGORÍAS DE FUENTES USANDO EL ANÁLISIS DE MONTE CARLO

En el nivel 2, pueden aplicarse menos estrictamente los supuestos simplificadores requeridos para el nivel 1. En el nivel 2 se usa el análisis de Monte Carlo para combinar incertidumbres en las categorías de fuentes.

El principio del análisis de Monte Carlo es seleccionar valores aleatorios de factores de emisión y datos de actividad dentro de sus funciones de densidad de probabilidad individuales y calcular los correspondientes valores de las emisiones. Este procedimiento se repite muchas veces, usando una computadora, y los resultados de cada cálculo ejecutado componen la función de densidad de probabilidad de la emisión en general. El análisis de Monte Carlo puede realizarse en el nivel de las categorías de fuentes, para agregaciones de categorías de fuentes o para el inventario en conjunto.

Con el análisis de Monte Carlo se pueden tratar las funciones de densidad de probabilidad de cualquier forma y amplitud físicamente posible, se pueden manejar diversos grados de correlación (tanto en el tiempo como entre categorías de fuentes) y se pueden abordar modelos más complejos (p.ej., la desintegración de primer orden del CH₄ en los vertederos), así como simples cálculos de “factor de emisión por datos de actividad”.

En Eggleston *et al.* (1998) se ofrece un ejemplo de análisis de Monte Carlo, aplicado a un inventario nacional de gases de efecto invernadero y usado para estimar las incertidumbres tanto en las emisiones en general como en las tendencias de las emisiones. Otro ejemplo del uso de análisis de Monte Carlo se presenta en McCann *et al.* (1994). Puede verse una descripción general del método de Monte Carlo en Fishman (1996).

Como todos los métodos, el análisis de Monte Carlo sólo da resultados satisfactorios si se aplica correctamente. Esto requiere que el analista posea una comprensión científica y técnica del inventario. Por supuesto, los resultados sólo serán válidos en la medida en que los datos de entrada, incluso los dictámenes de expertos que existan, sean sólidos.

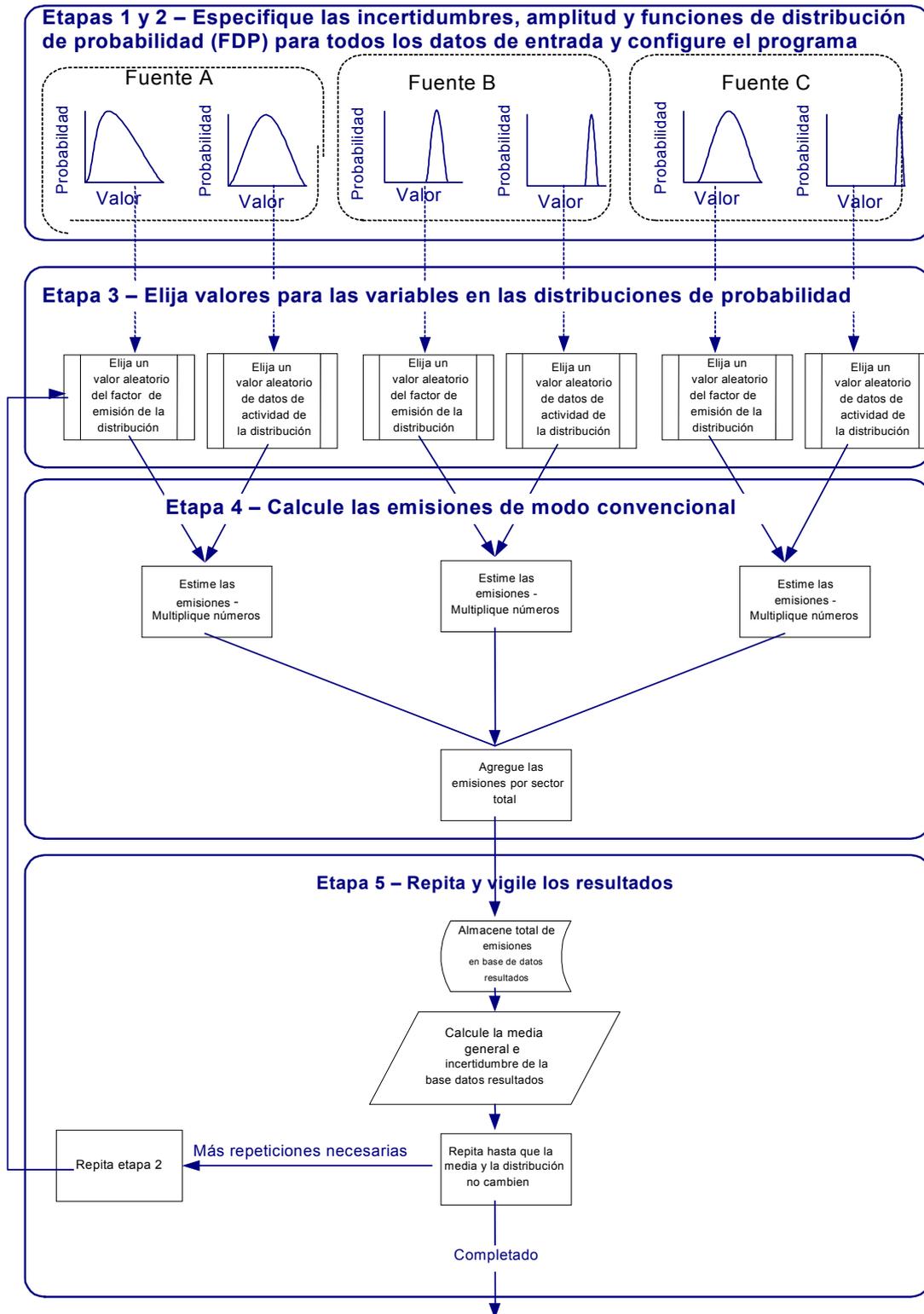
El enfoque de Monte Carlo consta de cinco etapas claramente definidas, que se muestran en la figura 6.1. Sólo las dos primeras exigen actividad del usuario; las demás son manejadas por el programa de computadora. La sección 6.5.3 contiene un análisis sucinto de diversos programas informáticos.

- **Etapas 1 – Especifique las incertidumbres en las categorías de fuentes.** Especifique las incertidumbres en los datos básicos. Esto comprende los factores de emisión y los datos de actividad, sus correspondientes medias y funciones de distribución de probabilidad y toda correlación entre categorías de fuentes. Tenga en cuenta la información que figura en las secciones 6.2.1 a 6.2.5.
- **Etapas 2 – Configure el programa informático.** El cálculo del inventario de emisiones, las funciones de densidad de probabilidades y los valores de correlación deberían configurarse en el programa de Monte Carlo.

El programa ejecuta automáticamente las etapas siguientes.

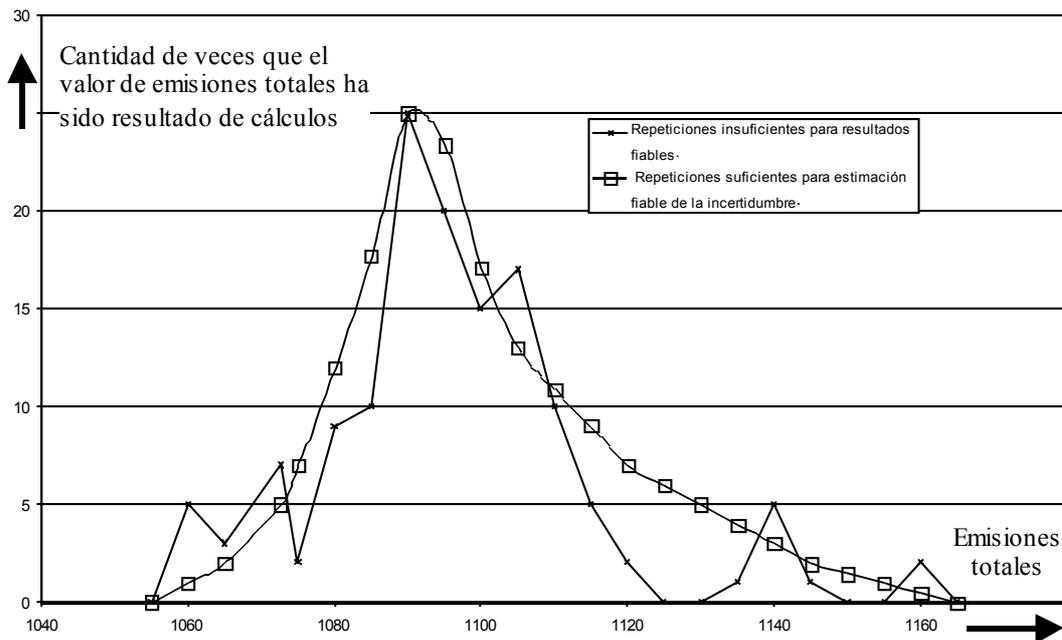
- **Etapas 3 – Elija las variables aleatorias.** Es el comienzo de las iteraciones. Para cada elemento de los datos de entrada, factores de emisión o datos de actividad, se selecciona aleatoriamente un número a partir de la función de densidad de probabilidad de esa variable.
- **Etapas 4 – Estime las emisiones.** Las variables seleccionadas en la etapa 3 se usan para estimar las emisiones totales. En el ejemplo que aparece en la figura 6.1 se suponen tres categorías de fuentes, cada una estimada como actividad multiplicada por un factor de emisión, y luego sumadas para obtener las emisiones totales. Los cálculos pueden ser más complejos. Las emisiones de los gases pueden multiplicarse por los valores de PCA para obtener las emisiones nacionales totales en equivalente de CO₂. Las correlaciones de 100% son fáciles de incorporar y los buenos programas de Monte Carlo permiten incluir otras correlaciones. Como los cálculos de las emisiones deberían ser iguales a los usados para estimar el inventario nacional, el proceso de Monte Carlo podría integrarse plenamente a las estimaciones de las emisiones anuales.
- **Etapas 5 – Repita y vigile los resultados.** El total calculado en la etapa 4 se almacena y luego se repite el proceso desde la etapa 3. La media de los totales almacenados da una estimación de la emisión total. Su distribución da una estimación de la función de densidad de probabilidad del resultado. Cuando se repite el proceso, la media se aproxima a la respuesta final. Cuando la media ya no cambia en más de una cantidad predefinida, puede darse por terminado el cálculo. Cuando la estimación para el rango de confianza del 95 % está determinada dentro de ± 1 %, se ha encontrado un resultado bastante estable. Puede verificarse la convergencia trazando un gráfico de frecuencia de las estimaciones de la emisión. Este gráfico debería ser bastante uniforme (figura 6.2, “Ejemplos de gráficos de frecuencia de los resultados de una simulación de Monte Carlo”). Estas medidas deberían ser ejecutadas por el programa y el usuario especificaría o una cantidad de repeticiones o criterios de convergencia.

Figura 6.1 Ilustración del método de Monte Carlo



En este ejemplo se suponen tres categorías de fuentes de emisión en cada una de las cuales la emisión se calcula como
 Datos de actividad • Factor de emisión.

Figura 6.2 Ejemplo de gráficos de frecuencia de los resultados de una simulación de Monte Carlo



6.4.1 Incertidumbres en las tendencias en el nivel 2

El método de Monte Carlo de nivel 2 puede usarse para estimar incertidumbres en la tendencia, así como en el valor de emisión absoluto en un año dado. El procedimiento es una simple extensión de lo que se describe en la sección anterior.

La tendencia se define aquí como la diferencia entre el año base y el año que interesa (año t). Por lo tanto, es necesario configurar el análisis de Monte Carlo para estimar ambos años simultáneamente. El procedimiento es:

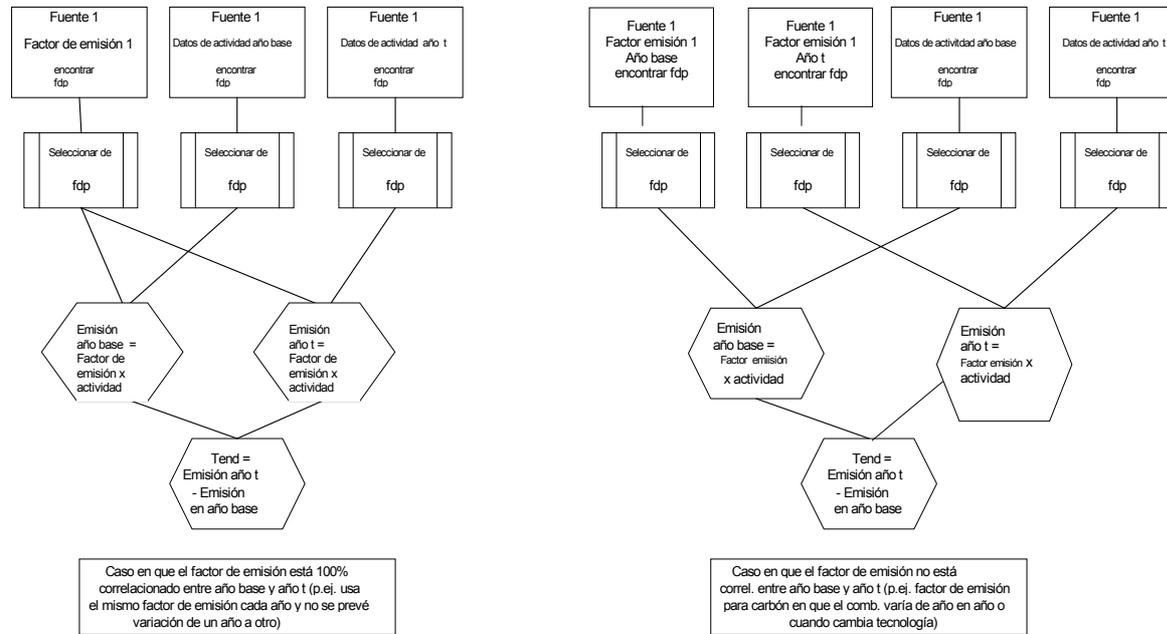
- Etapa 1 – Especifique las incertidumbres en la categoría de fuentes.** Determine las funciones de densidad de probabilidad para cada factor de emisión y actividad. Es el mismo proceso que se ha descrito antes, excepto que es necesario hacerlo tanto para el año base como para el año en curso, y es necesario considerar las relaciones entre los datos. Para muchas categorías de fuentes, se usará el mismo factor de emisión en cada año (o sea, que los factores de emisión para ambos años están correlacionados 100 %). En tales casos, se describe una sola distribución y se usa el valor seleccionado en la misma para cada año en la etapa 3. Los cambios en las tecnologías o las prácticas modificarán el factor de emisión con el tiempo. En ese caso, deberían usarse dos factores de emisión, que tienen una correlación inferior o cero. Si los factores de emisión contienen un elemento aleatorio o varían caprichosamente de un año a otro, deberían usarse también factores de emisión separados (p.ej., con el contenido de carbono de los combustibles de origen fósil, que puede cambiar según el suministro de combustible en el mercado y también contiene su propia incertidumbre). En general, se supone que los índices de actividad no están correlacionados en distintos años, así que deberían anotarse las dos distribuciones, aunque sus parámetros sean iguales, de modo que se generarán en la etapa 3 dos selecciones aleatorias diferentes a partir de esas distribuciones. El programa informático utilizado puede muy bien permitir establecer otras correlaciones y esas capacidades podrían aprovecharse si se cuenta con suficiente información. Pero probablemente eso sólo será necesario en unos pocos casos.
- Etapa 2 – Configure el programa informático.** El programa de computadora debería establecerse como ya se ha descrito, excepto que las funciones de distribución de probabilidad tendrán que captar la relación entre las emisiones en dos años, y para los cálculos de tendencia será necesario que haya dos cálculos separados pero simultáneos de las emisiones en el año base y en el año t . En los casos en que se supone que los datos de entrada están correlacionados en un 100 % (sobre todo, algunos factores de emisión) hay que tener la precaución de usar el mismo número aleatorio seleccionado a partir de la función de distribución de la

probabilidad cuando se estimen ambos años. Entonces se necesita un cálculo final para encontrar la diferencia entre los dos años.

Las etapas subsiguientes son ejecutadas automáticamente, en la mayoría de los casos, por el programa informático.

- **Etap 3 – Elija las variables aleatorias.** El programa de computadora procederá como ya se ha descrito, tomando en cuenta toda correlación entre funciones de densidad de probabilidad (FDP). En la figura 6.3, a continuación, se muestra el plan de cálculo para el análisis de tendencia
- **Etap 4 – Estime las emisiones.** Como en la descripción anterior, las variables seleccionadas en la etapa 3 se usarán para estimar las emisiones totales.
- **Etap 5 – Resultados.** El total de emisiones calculadas en la etapa 4 se almacena en un archivo de datos. Luego se repite el proceso desde la etapa 3 hasta que haya suficiente convergencia en los resultados. Las consideraciones en este caso son las mismas que se han descrito antes. Al mismo tiempo, se estima un rango de los resultados, incluyendo las emisiones totales y sectoriales para el año base, las emisiones totales y sectoriales para el año *t* y las diferencias (tendencias) entre éstas en el total y en cualquier sector de interés.

Figura 6.3 Plan de cálculo para el análisis de Monte Carlo de las emisiones absolutas y la tendencia de una sola categoría de fuentes, estimadas como factor de emisión por un índice de actividad



6.4.2 Presentación del análisis de incertidumbre en el nivel 2

El siguiente formato de datos es apropiado para presentar los resultados de la simulación de Monte Carlo para las emisiones por categoría de fuentes, por combustibles (cuando corresponda) y por gases de efecto invernadero expresados como equivalentes del CO₂. En el cuadro 6.2, la incertidumbre general en la tendencia en las emisiones nacionales aparece al pie de las columnas I y J. Los organismos encargados de los inventarios que efectúen un análisis de nivel 2 deberían presentar asimismo los resultados de un análisis de nivel 1 usando el cuadro 6.1, como se indica en la sección 6.3.1, “Comparación entre niveles y elección del método”.

CUADRO 6.2									
PRESENTACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN EL NIVEL 2									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Categoría de fuentes del IPCC	Gas	Emisiones año base	Emisiones año t	Incertidumbre en las emisiones año t como % de las emisiones en la categoría		Incertidumbre introducida en el total nacional en el año t	% cambio en las emisiones entre el año t y el año base	Rango de cambio % probable entre el año t y el año base	
		(Gg equivalente CO ₂)	(Gg equivalente CO ₂)	% abajo (percentil 2,5)	% arriba (percentil 97,5)	(%)	(%)	% inferior (percentil 2,5)	% superior (percentil 97,5)
p.ej. I.A.1 Combustible 1 para industrias de energía	CO ₂								
p.ej. I.A.2 Combustible 2 para industrias de energía	CO ₂								
Etc...	...								
Total									

6.5 CONSIDERACIONES PRÁCTICAS EN EL USO DE LA SIMULACIÓN DE MONTE CARLO

La simulación de Monte Carlo requiere que el analista especifique las distribuciones de probabilidad para cada entrada del modelo para la que hay que cuantificar la incertidumbre. El supuesto es que la simulación es una representación razonable del mundo real. Las distribuciones de probabilidad pueden obtenerse mediante diversos métodos, incluso el análisis estadístico de datos o la solicitud de dictámenes de expertos. Una consideración importante es formular las distribuciones para las entradas de modo que todas se basen en los mismos supuestos fundamentales con respecto al tiempo de promediación, la ubicación y otros factores condicionantes pertinentes para la evaluación de que se trate (p.ej., las condiciones climatológicas que influyen sobre las emisiones de gases de efecto invernadero de origen agrícola). Por esta razón, no debería suponerse que una distribución de incertidumbre de otro país es directamente aplicable como entrada para un inventario.

6.5.1 Especificación de las distribuciones de probabilidad para las entradas de inventario

La simulación de Monte Carlo requiere la identificación de las entradas del modelo a las que se deben asignar distribuciones de probabilidad y la formulación de las correspondientes distribuciones de probabilidad. En este capítulo ya se han examinado los métodos para formular distribuciones basadas en la solicitud de dictamen de expertos. Se describen y ejemplifican métodos para formular distribuciones a partir del análisis estadístico de datos en Cullen y Frey (1999). Otras referencias útiles son Hahn y Shapiro (1967), Ang y Tang (1975), D'Agostino y Stephens (1986), Morgan y Henrion (1990) y USEPA (1996, 1997, 1999). Se muestran algunos ejemplos de análisis probabilísticos aplicados a los inventarios de emisiones en Frey *et al.* (1998) y en Frey *et al.* (1999).

Para usar los datos como base para formular distribuciones, el primer paso crítico es determinar si los datos son una muestra aleatoria representativa, en el caso de una muestra de población. He aquí algunas preguntas clave que deben formularse con respecto a los datos:

- ¿Los datos son representativos de las diversas condiciones relativas a los factores de emisión o de actividad específicos para las circunstancias nacionales?
- ¿Los datos son una muestra aleatoria?
- ¿Cuál es el tiempo medio asociado con el conjunto de datos? y ¿es el mismo que para la evaluación (que será para las emisiones anuales en un año dado)?

Si los datos son una muestra aleatoria representativa, la distribución puede establecerse directamente usando técnicas estadísticas clásicas, aunque la muestra sea de tamaño reducido. Quizás sea necesario convertir los datos usando un tiempo de promediación apropiado. Se ofrece asesoramiento general para elegir las funciones de densidad de probabilidad en la sección 2.5, “Orientación de buenas prácticas para seleccionar una función de densidad de probabilidad”, del anexo 1, “Base conceptual para el análisis de la incertidumbre”.

En el caso ideal, los datos disponibles representarán un promedio anual para un factor de emisión o un total anual para los datos de actividad. En este caso, los datos representarían una muestra única a partir de una distribución de la población de valores medios anuales. La desviación estándar estimada de la población sería una medida apropiada de la incertidumbre en las emisiones anuales. En otros casos, los datos pueden representar un censo exhaustivo de la suma de toda actividad (p.ej., el uso total de energía para un combustible determinado). En este caso, la información con respecto a los errores en los instrumentos de medición o de vigilancia constituiría una base para evaluar la incertidumbre. El rango de incertidumbre en los datos de actividad podría delimitarse usando métodos independientes o verificaciones de coherencia. Por ejemplo, los datos de consumo de combustible pueden compararse con estimaciones de la producción, incluso con estimaciones de la producción por diferentes métodos.

En el caso de una muestra de población, el aspecto más crítico que hay que evaluar es si los datos son aleatorios y representativos de la población. Si se cumplen esas condiciones, pueden usarse métodos estadísticos clásicos para definir la distribución. De lo contrario, se requerirá alguna combinación de análisis de datos y solicitud de dictamen de expertos sobre las distribuciones. En el primer caso, Cullen y Frey (1999) sugieren explorar el

conjunto de datos usando estadísticas resumidas y gráficos para evaluar los rasgos esenciales (p.ej., la tendencia central, el rango de variación, la asimetría). Las ideas obtenidas al examinar los datos, combinadas con el conocimiento de los procesos que han generado los datos, deberían examinarse al seleccionar una representación matemática o numérica de la distribución como entrada a la simulación de Monte Carlo.

Una vez elegida una distribución en particular como candidata apropiada para el conjunto de datos, pueden emplearse técnicas como la “estimación de probabilidad máxima”⁵ o el “método de igualar momentos”⁶ para estimar los parámetros de la distribución. La bondad del ajuste de la distribución puede evaluarse de muchos modos, incluso comparando la función de distribución acumulativa (FDA) ajustada con el conjunto de datos original, diagramas de probabilidad y pruebas de bondad del ajuste (p.ej. Cullen y Frey, 1999). Es importante que la elección de una distribución paramétrica que represente un conjunto de datos se base no sólo en pruebas de bondad del ajuste, sino en las semejanzas en los procesos que generaron los datos frente a una base teórica para una distribución (p.ej., Hahn and Shapiro, 1967).

Si los datos están promediados sobre menos de un año, quizás sea necesario extrapolar la incertidumbre sobre todo el año. Considérese un ejemplo en el cual el conjunto de datos representa la variabilidad en las mediciones de las emisiones medias diarias para una categoría de fuentes determinada. Un enfoque, que describen en detalle Frey y Rhodes (1996), es ajustar una distribución paramétrica al conjunto de datos para la variabilidad diaria, usar una técnica numérica conocida como simulación de *bootstrap* para estimar la incertidumbre en los parámetros de la distribución y usar la simulación de Monte Carlo para simular las medias anuales aleatorizadas del factor de emisión. Usando la simulación de bootstrap, puede simularse la incertidumbre en la distribución de las muestras para los parámetros de la distribución ajustada (p.ej., Efron y Tibshirani, 1993; Frey y Rhodes, 1996; Frey y Burmaster, 1999).

Una forma sencilla de simulación de bootstrap funciona así: a partir de la distribución ajustada, se simula un conjunto de datos sintético aleatorio del mismo tamaño de muestra que el conjunto de datos original, utilizando la simulación de Monte Carlo. El conjunto de datos sintético se conoce como *muestra bootstrap*. Para la muestra bootstrap puede calcularse cualquier estadística o parámetro, como una media o parámetros de una nueva distribución ajustada al conjunto de datos sintético. Una estadística o parámetro estimados a partir de una muestra bootstrap se conoce como *réplica bootstrap* de esa estadística o parámetro. Este proceso se repite entonces muchas veces (típicamente, de 500 a 1.000 veces), generando la correspondiente cantidad de muestras bootstrap y estadísticas duplicadas. Las estadísticas tomarán diferentes valores cada vez, porque las muestras bootstrap son versiones aleatorizadas a partir del conjunto de datos original. De modo que este método es una técnica numérica para estimar las distribuciones de muestras para cualquier estadística en cualquier tipo de distribución del cual existan estadísticas. Esencialmente, la simulación bootstrap es una técnica numérica para simular el error de muestreo aleatorio. Las 500 a 1.000 muestras bootstrap implican la correspondiente cantidad de distribuciones plausibles alternativas de las cuales el conjunto de datos original podría haber sido una muestra aleatoria. Para esas distribuciones alternativas, cada una de las cuales refleja la variabilidad diaria en el ejemplo, se puede simular el valor de un año de estimaciones de emisiones (o sea, 365 muestras aleatorias de emisiones diarias sumadas para indicar un total anual o promediadas para indicar un factor de emisión media anual), brindando así de 500 a 1.000 estimaciones de emisiones medias anuales o totales anuales. La distribución de esas estimaciones describirá la incertidumbre en el caso anual a partir del error de muestreo aleatorio. Un supuesto clave en este ejemplo es que no existe ninguna correlación automática entre los valores diarios y que los valores diarios son representativos de las condiciones anuales – que no hay, por ejemplo, ningún efecto estacional que la muestra no haya captado.

6.5.2 ¿Cuánto esfuerzo se necesita para caracterizar la incertidumbre en una entrada de inventario?

Idealmente, la cantidad de esfuerzo dedicado a caracterizar la incertidumbre en una entrada de inventario debería ser proporcional a su importancia para evaluar la incertidumbre general. No sería un buen uso de recursos limitados insumir grandes cantidades de tiempo para recoger datos exhaustivamente y gastar en dictámenes de

⁵ En el método de probabilidad máxima se eligen como estimaciones los valores de los parámetros que maximizan la probabilidad (la función de probabilidad conjunta o la función de densidad conjunta) de la muestra observada.

⁶ En el método de los momentos se encuentran estimadores de parámetros desconocidos equiparando los correspondientes momentos de la muestra y la población. Este método es de fácil empleo y suministra estimadores coherentes. En muchos casos, los estimadores del método de los momentos están sesgados (Wackerly, Mendenhall III y Scheaffer, 1996; págs. 395-397).

expertos para una categoría de fuentes que tenga poco efecto sobre la incertidumbre general. Del mismo modo, sería un defecto que en una evaluación no se dedicaran recursos razonables para cuantificar la incertidumbre en las entradas a las cuales es muy sensible la incertidumbre general en el inventario. Muchos analistas que practican la simulación probabilista sugieren un enfoque reiterativo para ejecutar la simulación. En la primera repetición de un análisis de incertidumbre, pueden hacerse evaluaciones preliminares de la incertidumbre de las entradas y propagarse a todo el inventario con el único fin de hacer una identificación preliminar de cuáles son las principales fuentes de incertidumbre. Se describen métodos para evaluar la importancia de cada entrada en referencias tales como Morgan y Henrion (1990), Frey y Cullen (1999) y otras. Un ejemplo de una técnica relativamente sencilla es calcular el coeficiente de correlación entre los valores numéricos simulados de la distribución de los resultados del inventario y los valores numéricos simulados para cada distribución de entradas. Esta correlación refleja la fuerza de la relación lineal entre ambos. Cuanto mayor es la magnitud del coeficiente de correlación, más fuerte es la relación entre la incertidumbre en la entrada y la incertidumbre en el resultado, indicando que la entrada debería considerarse “sensible”. Muchos programas informáticos ejecutarán automáticamente el cálculo de sensibilidad para el usuario y lo presentarán gráficamente.

Después de identificar las entradas sensibles, pueden orientarse las actividades que corresponda para mejorar la estimación de la incertidumbre sólo para esas entradas. Luego, puede efectuarse con más confianza el análisis final de incertidumbre a partir de que las entradas importantes han recibido proporcionalmente mayor atención que las entradas no sensibles.

Otro punto con respecto a la reiteración se refiere a los aspectos a largo plazo de la ejecución de análisis de incertidumbre. Puede ser desalentador aplicar una simulación de Monte Carlo por primera vez. Pero como el organismo encargado del inventario adquiere experiencia con esos análisis, probablemente el organismo encontrará más fácil mejorar el análisis en el futuro. El análisis de Monte Carlo es típicamente un proceso de aprendizaje para todos los participantes, porque da pie a preguntas críticas e importantes sobre los fundamentos y la calidad de un inventario de emisiones. Así, con el tiempo, la simulación de Monte Carlo ayudará a decidir dónde concentrar las actividades de compilación de datos que permitirán tener más confianza en el inventario.

6.5.3 Elección de una técnica de simulación y de un tamaño de la muestra de simulación

Existen varios programas informáticos disponibles en el comercio que pueden usarse para ejecutar una simulación de Monte Carlo. Entre los ejemplos se cuentan Crystal Ball, @Risk, Analytica y Mathematica. Los primeros dos son adiciones a programas de hojas de cálculo usadas corrientemente. Muchos programas ofrecen una opción de diferentes métodos de muestreo, incluso simulación aleatoria de Monte Carlo y variantes del muestreo por hipercubo latino (MHL). El MHL puede producir distribuciones de resultados de modelos con una apariencia más “plana” en tamaños de muestra de sólo unos cuantos centenares de muestras. El inconveniente de usar el MHL es que uno debe decidir con anticipación cuántas reiteraciones va a usar. Esto se debe a que no pueden combinarse dos o más simulaciones de MHL, porque utilizarán estratos superpuestos, ocasionando dificultades para interpretar los resultados. En algunos casos, el MHL puede dar subestimaciones de los momentos más elevados en las distribuciones de probabilidad, ya que el método de estratificación puede excluir también la agrupación de valores muy altos o muy bajos, como los que pueden aparecer en los conjuntos de datos aleatorios. La sugerencia general es emplear la simulación aleatoria de Monte Carlo como método por defecto, porque dará flexibilidad para continuar una simulación aleatoria con muestras de simulación cada vez de mayor tamaño si es necesario, hasta que converja la distribución de los resultados del modelo. Cullen y Frey (1999) brindan más información sobre la comparación del MHL y la simulación de Monte Carlo (págs. 207-213).

6.5.4 Dependencia y correlación entre las entradas de inventario

Una cuestión clave que suelen examinar los analistas al establecer un análisis probabilístico es si existen dependencias o correlaciones entre las entradas del modelo. Idealmente, es preferible definir el modelo de modo que las entradas sean lo más estadísticamente independientes que sea posible. En vez de tratar de estimar los datos de actividad para muchas subcategorías cuyos datos se derivan, por lo menos en parte, por diferencias, puede ser mejor asignar incertidumbres a medidas agregadas de actividad más conocidas. Por ejemplo, el uso residencial de combustible podría estimarse como la diferencia entre el consumo total y el uso en los sectores del transporte, industrial y comercial. En este caso, la estimación de la incertidumbre en el uso residencial de combustible se correlaciona negativamente con las incertidumbres en el uso de combustible en las otras

subcategorías, e incluso puede ser muy grande comparada con la incertidumbre en el consumo total. De modo que en vez de tratar de estimar las incertidumbres por separado para cada subcategoría, sería más práctico estimar la incertidumbre para el consumo total, para el cual puede contarse con buenas estimaciones y verificaciones.

6.5.5 ¿Es importante la correlación?

Un punto importante que hay que recordar es que las dependencias, aunque existan, tal vez no sean importantes para evaluar las incertidumbres. Las dependencias entre entradas solo importarán si existen dependencias entre dos entradas a las cuales es sensible la incertidumbre en el inventario y si las dependencias son lo bastante fuertes. En cambio, las dependencias débiles entre entradas o las dependencias fuertes entre entradas a las cuales es insensible la incertidumbre en el inventario, tendrán relativamente escasa consecuencia en el análisis.

6.5.6 Algunos métodos para tratar las dependencias o la correlación

Cuando se juzga que las dependencias entre las entradas son importantes, pueden estudiarse diversas técnicas para incorporarlas al análisis. He aquí algunos ejemplos: i) modelizar explícitamente la dependencia; ii) estratificar o agregar las categorías de fuentes para minimizar el efecto de las dependencias; iii) simular la correlación usando métodos de emparejamiento restringido (que incluyen muchos programas informáticos); iv) usar técnicas de nuevo muestreo en los casos en que se cuenta con conjuntos de datos con múltiples variables; v) considerar los casos límite o sensibles (p.ej., un caso suponiendo independencia y otro caso suponiendo correlación positiva completa). Se encuentran más análisis y ejemplos de estos tipos de métodos en Cullen y Frey (1999), Morgan y Henrion (1990) y USEPA (1996). Estos documentos contienen también listas de referencia con citas de la bibliografía pertinente.

6.5.7 Especificación de la correlación en las entradas de inventario

Muchos programas informáticos permiten especificar una correlación entre las entradas del modelo (p.ej., Iman y Conover, 1982). En algunos casos, esos programas pueden ofrecer esta característica sólo con MHL, mientras en otros puede estar disponible también conjuntamente con la simulación aleatoria de Monte Carlo. Hay un detalle a propósito de estos métodos que conviene que observen los usuarios avanzados: que estos programas informáticos pueden inducir una correlación de rango entre dos o más distribuciones cualesquiera, pero no una correlación de muestra. Sin embargo, existen métodos que pueden emplearse para especificar una correlación de muestra en algunos tipos de distribuciones, como para las distribuciones normales con múltiples variables (véase ejemplos en Morgan y Henrion, 1990 o Cullen y Frey, 1999).

6.5.8 Análisis de los resultados de inventarios

Muchos programas informáticos permiten que el usuario visualice las funciones de densidad de probabilidad (FDP), las funciones de distribución acumulativa (FDA) y ofrecen resultados de estadísticas resumidas para una entrada determinada del modelo. Típicamente, la FDA aparecerá como una curva más plana que la FDP para cualquier caso dado. Además, la FDA permite interpretaciones cuantitativas de la mediana, el intervalo de confianza del 95 % o cualquier otro percentil de la distribución. De modo que, a los fines prácticos, la FDA suele ser la representación más útil de los resultados del modelo. La FDP es útil para obtener ideas cualitativas acerca de los resultados, como si están sesgados positivamente.

6.5.9 Estímulo al uso de técnicas apropiadas

La orientación ofrecida aquí no significa excluir el uso de métodos mejores a medida que estén disponibles. Además, este documento no cubre todas las situaciones que podría tener que afrontar un analista. Por lo tanto, se alienta al organismo encargado del inventario a que se remita a las referencias citadas más adelante en busca de sugerencias acerca del modo de ejecutar los análisis de incertidumbre.

6.6 Conclusión

Los métodos que se describen en este capítulo deberían permitir a los organismos encargados de los inventarios estimar y presentar la incertidumbre en las emisiones totales en cualquier año y la incertidumbre en la tendencia en distintos años, junto con la contribución de cada categoría de fuentes a esas incertidumbres generales. Esa información debería ayudar a priorizar los esfuerzos por mejorar la precisión de los inventarios en el futuro y puede mostrar cómo responden las incertidumbres generales y en la tendencia a medida que se reducen las incertidumbres en categorías de fuentes individuales.

APÉNDICE 6A.1

DERIVACIÓN DE LAS FORMULAS DEL CUADRO 6.1 (NIVEL 1)

EXPLICACIÓN DE LAS VARIABLES

C_x = Valor de una entrada en la columna C y la fila x

n = Número de las categorías de emisión (filas)

$\sum C_i$ = Sumatoria de todas las categorías de emisión (filas) del inventario desde $i=1$ hasta $i=n$

COLUMNAS A-F

Datos de entrada.

COLUMNA G

Incertidumbre combinada usando una ecuación de propagación de errores.

$$G_x = \sqrt{E_x^2 + F_x^2}$$

COLUMNA H

Incertidumbre combinada como porcentaje de las emisiones totales en el año t.

$$H_x = \frac{G_x \cdot D_x}{\sum D_i}$$

El total en la columna H (incertidumbre en las emisiones totales) se obtiene usando la ecuación de propagación de errores:

$$\text{Total de la columna H} = \frac{\sqrt{\sum_x \left[\left(\sum_x D_x \right)^2 \cdot (H_x)^2 \right]}}{\sum_x D_x} = \sqrt{\sum_x H_x^2}$$

COLUMNA I

Las entradas en la columna I muestran cómo cambia la diferencia en las emisiones entre el año base y el año t en respuesta a un aumento del 1% en las emisiones de la categoría de fuentes x en el año base y en el año t. Esto muestra la sensibilidad de la tendencia en las emisiones ante una incertidumbre sistemática en la estimación de las emisiones, o sea la que está correlacionada entre el año base y el año t. Esta sensibilidad se describe como sensibilidad de tipo A.

I_x = tendencia porcentual si la categoría de fuentes x se aumenta en 1% en ambos años – tendencia porcentual sin incremento

$$= \frac{0.01 \cdot D_x + \sum D_i - (0.01 \cdot C_x + \sum C_i)}{(0.01 \cdot C_x + \sum C_i)} \cdot 100 - \frac{\sum D_i - \sum C_i}{\sum C_i} \cdot 100$$

COLUMNA J

Las entradas en la columna J muestran cómo cambia la diferencia en las emisiones entre el año base y el año t en respuesta a un aumento del 1% en las emisiones de la categoría de fuentes x sólo en el año t. Esto muestra la

sensibilidad de la tendencia en las emisiones ante el error de incertidumbre aleatorio en la estimación de las emisiones, o sea el que no está correlacionado entre el año base y el año Y. Esta sensibilidad se describe como sensibilidad de tipo B.

J_x = tendencia porcentual si la categoría de fuentes x aumenta en 1% en el año t – tendencia porcentual sin incremento

$$= \frac{0.01 \cdot D_x + \sum D_i - \sum C_i}{\sum C_i} \cdot 100 - \frac{\sum D_i - \sum C_i}{\sum C_i} \cdot 100$$

$$= \frac{D_x}{\sum C_i}$$

COLUMNA K

Bajo el supuesto de que se usa el mismo factor de emisión en ambos años y de que los factores de emisión reales están plenamente correlacionados, el % de error introducido por él es igual en ambos años. Por lo tanto, la fórmula para la incertidumbre introducida en la tendencia por el factor de emisión es:

$$K_x = \text{sensibilidad A} \cdot \text{incertidumbre del factor de emisión}$$

$$= I_x \cdot F_x$$

En caso de que no se suponga ninguna correlación entre los factores de emisión, debería usarse la sensibilidad B y el resultado debe ser incrementado por $\sqrt{2}$ por la razón indicada a continuación en la derivación principal para la columna L:

$$K_x = \text{sensibilidad B} \cdot \text{incertidumbre del factor de emisión} \cdot \sqrt{2}$$

$$= J_x \cdot F_x \cdot \sqrt{2}$$

COLUMNA L

La tendencia es la diferencia entre las emisiones en el año base y en el año t. Por lo tanto, tiene que tomarse en cuenta la incertidumbre de los datos de actividad del año base y del año t. Las dos incertidumbres combinadas usando la ecuación de propagación de errores y el supuesto de que la incertidumbre es igual en el año base y en el año t son:

$$= \sqrt{(\text{incertidumbre (datos de actividad, año base)})^2 + (\text{incertidumbre (datos de actividad, año t)})^2}$$

$$\approx \sqrt{(\text{incertidumbre (datos de actividad, año t)})^2 \cdot 2}$$

$$= E_x \cdot \sqrt{2}$$

Como se supone que los datos de actividad en ambos años son independientes, la columna L equivale a:

$$L_x = \text{sensibilidad B} \cdot \text{incertidumbre combinada de los datos de actividad de ambos años}$$

$$= J_x \cdot E_x \cdot \sqrt{2}$$

En el caso de que se suponga correlación entre los datos de actividad, debería usarse la sensibilidad A y no se aplica el factor $\sqrt{2}$.

$$L_x = I_x \cdot E_x$$

COLUMNA M

En la columna M figura la incertidumbre combinada introducida en la tendencia por la incertidumbre en los datos de actividad y el factor de emisión.

$$M_x = \sqrt{K_x^2 + L_x^2}$$

Las entradas M_i en la columna M se combinan para obtener la incertidumbre total de la tendencia usando la ecuación de propagación de errores del modo siguiente:

$$\text{Total de la columna M} = \frac{\sqrt{\sum_x \left[\left(\sum_x (D_x - C_x) \right)^2 \cdot (M_x)^2 \right]}}{\sum_x (D_x - C_x)} = \sqrt{M_1^2 + M_2^2 + \dots + M_n^2}$$

APÉNDICE 6A.2 EJEMPLO DE CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE EN EL NIVEL 1

En la hoja de cálculo siguiente se muestra un ejemplo de cálculo para el inventario nacional de gases de efecto invernadero del Reino Unido.

CUADRO 6.3 EJEMPLO DE CÁLCULO Y PRESENTACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN EL NIVEL 1													
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	Categoría de fuentes del IPCC	Gas	Emisiones año base 1990	Emisiones año t 1997	Incetidumbre en los datos de actividad	Incetidumbre en el factor de emisión	Incetidumbre combinada	Incetidumbre combinada como % de las emisiones nacionales totales en el año t	Sensibilidad de tipo A	Sensibilidad de tipo B	Incetidumbre en la tendencia en las emisiones nacionales introducida por la incetidumbre en el factor de emisión	Incetidumbre en la tendencia en las emisiones nacionales introducida por la incetidumbre en los datos de actividad	Incetidumbre introducida en la tendencia en las emisiones nacionales totales
			Gg equivalente de CO ₂	Gg equivalente de CO ₂	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1A	Carbón	CO ₂	238 218	142 266	1.2	6	6,1	1,2	-0,0966	0,1840	-0,58	0,31	0,66
1A	Petróleo	CO ₂	208 684	196 161	1	2	2,2	0,6	0,0076	0,2538	0,02	0,36	0,36
1A	Gas natural	CO ₂	111 052	181 691	2	1	2,2	0,6	0,1039	0,2351	0,10	0,66	0,67
1A	Otros (desechos)	CO ₂	138	741	7	20	21,2	0,0	0,0008	0,0010	0,02	0,01	0,02
1B	Transformación combustible sólido	CO ₂	2 573	1 566	1.2	6	6,1	0,0	-0,0010	0,0020	-0,01	0,00	0,01
1B	Petróleo y gas natural	CO ₂	8 908	6 265		14	14,0	0,1	-0,0024	0,0081	-0,03	0,00	0,03
2A1	Producción de cemento	CO ₂	6 693	6 157	1	2	2,2	0,0	0,0001	0,0080	0,00	0,01	0,01
2A2	Producción de cal	CO ₂	1 192	1 703	1	5	5,1	0,0	0,0008	0,0022	0,00	0,00	0,01
2A3	Uso de caliza y dolomita	CO ₂	1 369	1 551	1	5	5,1	0,0	0,0004	0,0020	0,00	0,00	0,00
2A4	Uso de sosa comercial	CO ₂	116	120	15	2	15,1	0,0	0,0000	0,0002	0,00	0,00	0,00
2B	Producción de amoníaco	CO ₂	1 358	814		5	5,0	0,0	-0,0005	0,0011	0,00	0,00	0,00
2C1	Producción siderúrgica	CO ₂	3 210	1 495	1.2	6	6,1	0,0	-0,0019	0,0019	-0,01	0,00	0,01
5D	Cambio en el uso de la tierra y silvicultura	CO ₂	31 965	27 075	5	54	54,2	2,1	-0,0027	0,0350	-0,14	0,25	0,29
6C	Incineración de desechos sólidos municipales	CO ₂	660	29	7	20	21,2	0,0	-0,0007	0,0000	-0,01	0,00	0,01
		Total de CO ₂	616 137	567 634									
1A	Todos los combustibles	CH ₄	2 507	1 975	1.2	50	50,0	0,1	-0,0004	0,0026	-0,02	0,00	0,02
1B1	Minería de carbón	CH ₄	17 188	6 687	1	13	13,0	0,1	-0,0116	0,0087	-0,15	0,01	0,15
	Transformación de combustibles sólidos	CH ₄	215	173	6	50	50,4	0,0	0,0000	0,0002	0,00	0,00	0,00
1B2	Transmisión de gas natural	CH ₄	8 103	7 301	2	15	15,1	0,2	-0,0001	0,0094	0,00	0,03	0,03
	Petróleo y gas marítimo	CH ₄	2 402	1 957	10	26	27,9	0,1	-0,0003	0,0025	-0,01	0,04	0,04
2C	Producción siderúrgica	CH ₄	16	13	1.2	50	50,0	0,0	0,0000	0,0000	0,00	0,00	0,00
4A	Fermentación entérica	CH ₄	19 177	18 752	1	20	20,0	0,5	0,0016	0,0243	0,03	0,03	0,05
4B	Manejo del estiércol	CH ₄	2 338	2 325	1	30	30,0	0,1	0,0003	0,0030	0,01	0,00	0,01

CUADRO 6.3													
EJEMPLO DE CÁLCULO Y PRESENTACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN EL NIVEL 1													
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	
Categoría de fuentes del IPCC	Gas	Emissiones año base 1990	Emissiones año t 1997	Incetidumbre en los datos de actividad	Incetidumbre en el factor de emisión	Incetidumbre combinada	Incetidumbre combinada como % de las emisiones nacionales totales en el año t	Sensibilidad de tipo A	Sensibilidad de tipo B	Incetidumbre en la tendencia en las emisiones nacionales introducida por la incetidumbre en el factor de emisión	Incetidumbre en la tendencia en las emisiones nacionales introducida por la incetidumbre en los datos de actividad	Incetidumbre introducida en la tendencia en las emisiones nacionales	
		Gg equivalente de CO ₂	Gg equivalente de CO ₂	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
4F	Quema de campos	CH ₄	266	0	25	50	55,9	0,0	-0,0003	0,0000	-0,02	0,00	0,02
6A	Eliminación de desechos sólidos	CH ₄	23 457	17 346	15	46	48,4	1,2	-0,0052	0,0224	-0,24	0,48	0,53
6B	Tratamiento de aguas residuales	CH ₄	701	726	15	48	50,3	0,1	0,0001	0,0009	0,01	0,02	0,02
6C	Incineración de desechos	CH ₄	1	1	7	50	50,5	0,0	0,0000	0,0000	0,00	0,00	0,00
		Total de CH ₄	76 371	57 257									
1A2&1A4&1A5	Otras combustiones	N ₂ O	3 865	3 562	1,2	195	195,0	1,0	0,0001	0,0046	0,01	0,01	0,01
1A3	Transporte	N ₂ O	1 300	3 645	1,4	170	170,0	0,9	0,0032	0,0047	0,54	0,01	0,54
1B2	Petróleo y gas natural	N ₂ O	3	2	10	110	110,5	0,0	0,0000	0,0000	0,00	0,00	0,00
2B	Producción de ácido adipico	N ₂ O	25 136	17 766	0,5	15	15,0	0,4	-0,0067	0,0230	-0,10	0,02	0,10
2B	Producción de ácido nítrico	N ₂ O	4 383	3 723	10	230	230,2	1,2	-0,0004	0,0048	-0,08	0,07	0,11
4B	Manejo del estiércol	N ₂ O	1 583	1 559	1	509 ^a	509,0	1,1	0,0002	0,0020	0,08	0,00	0,08
4D	Suelos agrícolas	N ₂ O	29 472	29 098	1	509	509,0	21,0	0,0029	0,0376	1,47	0,05	1,47
4F	Quema de campos	N ₂ O	78	0	10	230	230,2	0,0	-0,0001	0,0000	-0,02	0,00	0,02
6B	Tratamiento de aguas residuales	N ₂ O	153	157	1	100	100,0	0,0	0,0000	0,0002	0,00	0,00	0,00
6C	Incineración dedesechos	N ₂ O	115	11	7	230	230,1	0,0	-0,0001	0,0000	-0,03	0,00	0,03
		Total de N ₂ O	66 089	59 525									
2	Procesos industriales	HFC	11 374	18 447	2	25	25,1	0,7	0,0104	0,0239	0,26	0,07	0,27
3	Procesos industriales	PFC	2 281	661	5	19	19,6	0,0	-0,0018	0,0009	-0,03	0,01	0,04
4	Procesos industriales	SF ₆	724	1 170	10	8	12,8	0,0	0,0007	0,0015	0,01	0,02	0,02
		Total de hidrocarburos halogenados y SF ₆											
	Emissiones totales	Total de PCA ponderado	772 976	704 693									
	Incetidumbres totales							21,3					2,0

^a Incetidumbre estimada a partir de la distribución logarítmica normal usada en la simulación de Monte Carlo o sea (97,5 percentil-mediana)/media *100

REFERENCIAS

- Ang, A.H.S. y W.H. Tang (1975). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Volume 1*. John Wiley and Sons, Nueva York.
- Cullen, A.C. y H.C. Frey (1999). *Probabilistic Techniques in Exposure and Risk Assessment: A Handbook for Dealing with Variability and Uncertainty in Models and Inputs*. Plenum Press, Nueva York.
- D'Agostino, R.B. y M.A. Stephens (1986). *Goodness of Fit Techniques*. Marcel Dekker, Nueva York.
- Efron, B. and Tibshirani, R.J. (1993). *An Introduction to the Bootstrap*. Chapman and Hall, Nueva York.
- Eggleston, S. *et al.* (1998). *Treatment of Uncertainties for National Greenhouse Gas Emissions*. Report AEAT 2688-1 for DETR Global Atmosphere Division, AEA Technology, Culham, Reino Unido.
- Fishman G.S. (1996). *Monte Carlo: Concepts, Algorithms, and Applications*. Springer-Verlag, Nueva York.
- Frey, H.C. y D.E. Burmaster (1999). 'Methods for Characterization of Variability and Uncertainty: Comparison of Bootstrap Simulation and Likelihood-Based Approaches'. *Risk Analysis*, 19(1): 109-129.
- Frey, H.C. y D.S. Rhodes (1996). 'Characterizing, Simulating, and Analyzing Variability and Uncertainty: An Illustration of Methods Using an Air Toxics Emissions Example'. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2(4), págs. 762-797.
- Frey, H.C., Bharvirkar, R., Thompson, R. y Bromberg, S. (1998). 'Quantification of Variability and Uncertainty in Emission Factors and Inventories'. *Proceedings of Conference on the Emission Inventory*, Air & Waste Management Association, Pittsburgh, PA, EE.UU.
- Frey, H.C., Bharvirkar, R. y Zheng, J. (1999). *Quantitative Analysis of Variability and Uncertainty in Emissions Estimation, Final Report*. Preparado por la Universidad del Estado de North Carolina para la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los EE.UU., Research Triangle Park, North Carolina, Estados Unidos, julio de 1999. Accesible en www4.ncsu.edu/~frey/
- Hahn, G. J. y Shapiro, S. S. (1967). *Statistical Models in Engineering*, John Wiley and Sons, Nueva York.
- Hora, S.C. y R.L. Iman (1989). 'Expert opinion in risk analysis: The NUREG-1150 methodology'. *Nuclear Science and Engineering*, 102, págs. 323-331.
- Iman, R. L. y Conover, W. J. (1982). 'A Distribution-Free Approach to Inducing Rank Correlation Among Input Variables'. *Communications in Statistics*, B11(3), págs. 311-334.
- McCann, T.J. & Associates y Nosal, M. (1994). *Report To Environment Canada Regarding Uncertainties in Greenhouse Gases Emission Estimates*. Calgary, Canadá.
- Merkhofer, M.W. (1987). 'Quantifying judgmental uncertainty: methodology, experiences, and insights'. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 17(5), págs. 741-752.
- Morgan, M.G. y M. Henrion (1990). *Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis*. Cambridge University Press, Nueva York.
- NCRP (Consejo Nacional sobre Protección y Mediciones de las Radiaciones) (1996). *A Guide for Uncertainty Analysis in Dose and Risk Assessments Related to Environmental Contamination*. NCRP Commentary No. 14, Bethesda, MD, EE.UU.
- Robinson, J.R. (1989). 'On Uncertainty in the Computation of Global Emissions for Biomass Burning'. *Climatic Change*, 14, págs. 243-262.
- Spetzler, C.S. y von Holstein, S. (1975). 'Probability encoding in decision analysis'. *Management Science*, 22(3), págs. 340-358.
- USEPA (1996). *Summary Report for the Workshop on Monte Carlo Analysis*. EPA/630/R-96/010, Foro de evaluación de riesgos, Agencia de Protección del Medio Ambiente de los EE.UU., Washington, DC, EE.UU.
- USEPA (1997). *Guiding Principles for Monte Carlo Analysis*. EPA/630/R-97/001, Oficina de Investigación y Desarrollo, Agencia de Protección del Medio Ambiente de los EE.UU., Washington, DC, USA, marzo de 1997. Accesible en la página: <http://www.epa.gov/ncea/mcpolicy.htm>.
- USEPA (1999). *Report of the Workshop on Selecting Input Distributions For Probabilistic Assessments*. EPA/630/R-98/004, Oficina de Investigación y Desarrollo, Agencia de Protección del Medio Ambiente de los EE.UU., Washington, DC, enero de 1999. Accesible en la página <http://www.epa.gov/ncea/input.htm>.
- Wackerly, D. D., Mendenhall III, W. y Scheaffer, R. L. (1996). *Mathematical Statistics with Applications*. Duxbury Press, EE.UU.