

Distribución de radionúclidos naturales (^7Be y ^{210}Pb) y antropogénicos (^{137}Cs y $^{239,240}\text{Pu}$) en el Océano Ártico

Cámara Mor, P.

- Licenciatura de Ciencias Ambientales-UAB-

Resumen

La distribución de los radionúclidos (^7Be , ^{137}Cs , ^{210}Pb y $^{239,240}\text{Pu}$) en los diferentes compartimentos (columna de agua, sedimentos del fondo y hielo) depende no sólo de las propiedades fisicoquímicas del propio radionúclido, sino también de los procesos que tienen lugar en el Océano Ártico. El hielo marino desempeña un papel relevante en la dispersión de los radionúclidos desde las áreas de formación del hielo a lo largo del Ártico debido a la liberación de éstos durante su tránsito o definitivamente en las áreas de ablación, especialmente en el Estrecho de Fram. Además, el hielo durante su deriva incorpora radionúclidos debido a la deposición atmosférica. Los radionúclidos conservativos (^{137}Cs) permanecen disueltos en la columna de agua, mientras que los reactivos (^{210}Pb e isótopos de Pu) se hallan predominantemente en los sedimentos de las plataformas continentales. En cambio, en las cuencas árticas centrales la mayor parte se encuentran en la columna de agua debido a la limitación en el arrastre por parte de las partículas (scavenging). En el Estrecho de Fram, como resultado de la liberación masiva de sedimentos se activa el proceso de scavenging y se observa como los inventarios de todos los radionúclidos estudiados en sedimentos aumentan en comparación con los valores de las cuencas centrales árticas. El inventario de radionúclidos en sedimentos del hielo (SIS) presenta valores inferiores a los otros compartimentos pero no es despreciable por la relevancia de la dispersión.

Palabras clave: Océano Ártico, radionúclidos, SIS.

Resum

La distribució dels radionúclids (^7Be , ^{137}Cs , ^{210}Pb i $^{239,240}\text{Pu}$) en els diferents compartiments (columna d'aigua, sediment del fons i gel) no només depèn de les propietats fisicoquímiques del propi radionúclid, sinó també dels processos que tenen lloc en l'Oceà Àrtic. El gel marí té un paper rellevant en la dispersió dels radionúclids des de les àrees de formació del gel marí al llarg de l'Àrtic a causa de l'alliberament d'aquests durant el seu trànsit o definitivament a les àrees de ablació, especialment en l'Estret de Fram. A més, el gel durant la seva deriva incorpora radionúclids a causa de la deposició atmosfèrica. Els radionúclids conservatius (^{137}Cs) romanen dissolts en la columna d'aigua, mentre que els reactius (^{210}Pb i isòtops de Pu) es troben predominantment en els sediments de les plataformes continentals. En canvi, en les conques àrtiques centrals la major part es troben en la columna d'aigua degut a la limitació en l'arrossegament per part de les partícules (scavenging). En l'Estret de Fram, com resultat de l'alliberament massiu de sediments s'activa el procés de scavenging i s'observa com els inventaris de tots els radionúclids estudiats en sediments augmenten en comparació dels valors de les conques centrals àrtiques. L'inventari de radionúclides en sediments del gel (SIS) presenta valors inferiors als altres compartiments però no és menyspreable per la seva rellevància de la dispersió.

Paraules clau: Oceà Àrtic, radionúclids, SIS

Abstract

The distribution of the radionuclides (^7Be , ^{137}Cs , ^{210}Pb and $^{239,240}\text{Pu}$) in the different compartments (water column, bottom sediments and sea ice) don't only depends on the physical-chemistry properties of the own radionuclide, but also it depends on the processes that take place in the Arctic Ocean. The sea ice potentially plays a significant role in the dispersion of radionuclides from areas of formation of sea ice throughout the Arctic, due to liberation of these during its transit or in the ablation areas, specially in the Fram Strait. Besides, the sea ice incorporates radionuclides by means of atmospheric deposition during its drift. The conservative radionuclides (^{137}Cs) remain dissolved in the water column, whereas the reactive-particle (^{210}Pb and isotopes of Pu) are into sediments of the continental shelves predominantly, however in the central Arctic, they are mostly in the water column owing to the limitation of the scavenging process. In the Fram Strait, as result of the massive sediment liberation takes place the activation of scavenging, and it is observed as the inventories of all the studied radionuclides in sediments increase with respect to the values of the central basins. The inventory of radionuclides in sediments of the ice (SIS) displays inferior values to the other compartments but it is not despicable by the relevance of the dispersion.

Keywords: Arctic Ocean, radionuclides, SIS.

1. Introducción

La radioactividad es un fenómeno inherente al planeta Tierra. Pero, no sólo existe radiactividad natural sino que el hombre también está expuesto a radiactividad de origen antropogénico-derivado de la propia actividad humana-

La radioactividad artificial incorporada a la atmósfera termina por depositarse sobre los continentes y sobre los océanos. En el caso del Océano Ártico se pueden distinguir otras fuentes de radiactividad artificial: i) vertidos controlados de las plantas de reprocesamiento europeas [Sellafield (Reino Unido) y La Hague (Francia)] (Aarkorog, 1994; Kershaw y Baxter, 1995; AMAP, 1998; ii) depósito permanente de residuos sólidos y líquidos en el mar de Barents y Kara (Yablokov et al. 1993; Joint Norwegian-Russian Expert Group, 1996; AMAP, 1997); iii) La descarga fluvial. Especialmente de los ríos Ob y Yenisey que transportan radioisótopos disueltos en sus aguas procedentes de la industria nuclear. Trapeznikov et al., 1993; Baskaran et al., 1995; Sayles et al., 1997).

El Océano Ártico es el océano circumpolar localizado en el Hemisferio Norte, entre el continente euroasiático y norteamericano, cubriendo una superficie de 14 millones de km² y almacenando un volumen de 17 millones de km³ de agua. Una gran parte de su extensión está cubierta por hielo, ya sea de forma perenne o estacional. En verano el hielo marino cubre 7 millones de Km² mientras que en invierno ocupa 14 millones de Km² (Maykut, 1985; AMAP 1997).

El agua, el aire y el hielo pueden transportar radionúclidos a lo largo de grandes distancias. El aire, por su rápido movimiento se convierte en un importante mecanismo de transporte de radionúclidos que terminan por depositarse en la superficie terrestre por deposición seca o húmeda. De hecho, la intensidad del *fallout* ha variado según la latitud (UNSCEAR, 1988, 2000). Por otro lado, el agua de los ríos; pueden transportar radionúclidos en sus aguas

procedentes de la industria nuclear. Por ejemplo, la planta de Mayak y Siberian Chemical Combine (Rusia) que vierten en el río Ob y la planta Mining and Chemical Industrial Complex (Rusia) en el río Yenesey (AMAP, 2002), etc. Por otro lado, otro medio de transporte de radionúclidos artificiales al Océano Ártico lo constituye las propias corrientes oceánicas. Por ejemplo, existe un flujo de radionúclidos procedentes de la planta de Sellafield que alcanza el Océano Ártico. Finalmente, el hielo. Es el estudio de esta vía de transporte lo que motiva el presente proyecto.

El hielo marino del Océano Ártico se forma predominantemente en la época invernal, especialmente en la plataforma continental euroasiáticas -mares de Laptev, Kara y Barents-. Estas plataformas continentales son las principales zonas de exportación del hielo marino hacia el Océano Ártico central (Zakharov, 1966, 1976; Aagaard et al., 1981; Colony y Thorndike, 1985; Reimnitz et al., 1992; Pavlov et al., 1994 y Dethleff et al., 1998). Durante la formación del hielo marino se produce una exclusión de las sales disueltas en la columna de agua (Weeks y Ackley, 1986). La exclusión también la experimentan algunas especies o sustancias disueltas en ella (Weeks, 1994). Asimismo, durante la formación del hielo también se produce la incorporación de sedimentos, principalmente de la fracción de limo y arcilla (<63 µm) que se realiza a través de diversos mecanismos. Por ejemplo la fracción gruesa se incorpora mediante la formación de *anchor ice*, mientras que la fracción fina es resultado del *suspension freezing* (Nürnberg et al., 1994; Kempema et al., 2000). El hielo multi-anual experimenta un proceso de concentración debido a los ciclos de congelación y deshielo (Pfirman, 1990, 1995). Los sedimentos asociados al hielo (SIS) pueden ser transportados grandes distancias a través del Océano Ártico, desde las áreas de formación a las áreas de ablación, principalmente en el Estrecho de Fram (Pfirman et al., 1995, Meese et al., 1997; Kempema et al., 1989). Su trayectoria varía en función del lugar de formación. El hielo formado en las plataformas euroasiáticas es transportado

hacia el Atlántico Norte a través del Estrecho de Fram siguiendo el Transpolar Drift (TPD); en cambio, el hielo de formado en el margen de Alaska se introduce en el giro de Beaufort donde permanece temporalmente - durante 5 - 15 años. (Thorndike, 1986)- antes de alcanzar el TPD y llegar al Estrecho de Fram, donde tiene lugar su fusión (*Figura 1*).

Pero además de transportar sedimentos, el hielo marino también transporta especies químicas (Pfirman et al, 1995; Meese et al., 1997; Landa et al., 1998; Cooper et al., 1998), entre ellos radionúclidos, tanto de origen natural como artificial, asociados la deposición atmosférica, columna de agua y sedimentos. El hielo marino se convierte así en un importante mecanismo de transporte y redistribución de isótopos radioactivos en el Océano Ártico.

El objetivo principal es el estudio de la distribución de radionúclidos en los diferentes compartimentos del Océano Ártico (columna de agua, sedimentos, hielo), especialmente el hielo marino y en los SIS. Tiene la finalidad de confirmar que los radionúclidos puede ser un útil indicador para determinar la importancia del hielo marino en la distribución de la material particulado y especies asociadas en el Océano Ártico y un útil trazador de los mecanismos de transporte

Como objetivos secundarios, se plantea la determinación de los inventarios de radionúclidos específicos de orígenes distintos (i.e. ^{210}Pb , isótopos de Pu, ^{137}Cs) en distintos compartimentos del Océano Ártico La combinación de los inventarios de los radionúclidos en los diferentes compartimentos con los procesos de formación, incorporación de sedimentos, deriva y fusión del hielo, etc. permitirá explicar la distribución de cada uno de los radioisótopos. Otro objetivo, es identificar aquellas áreas donde será susceptible de producirse una exportación de radionúclidos o bien la incorporación de éstos. Asimismo, otro objetivo, será determinar la importancia de la liberación de SIS y radionúclidos durante el tránsito y su destino final.

2. Metodología

La metodología empleada en el presente estudio consta de dos procedimientos; i) caracterización de cada una de la zonas mediante los inventarios de los radionúclidos (^7Be , ^{137}Cs , ^{210}Pb e isótopos Pu) en cada uno de los compartimentos del Océano Ártico (columna de agua, sedimentos y hielo) y ii) determinación de la distribución de los radioisótopos en el Océano Ártico.

i) Primeramente, se ha realizado una breve descripción de la totalidad del área de estudio, el Océano Ártico, destacando las heterogeneidades funcionales y topográficas existentes, con la finalidad de diferenciar las diferentes áreas tipológicas; mares marginales -eurosiberianos y norte americanos-, cuencas -euroasiática y canadiense- y Estrecho de Fram y de Bering. Esta subdivisión permite facilitar el estudio

Tras la identificación de las diferentes áreas, se ha realizado la caracterización de cada una de ellas que ha consistido en determinar el inventario de cada uno de los radionúclidos (^7Be , ^{137}Cs , ^{210}Pb e isótopos Pu) en cada compartimento. A partir de los registros de concentraciones e inventarios de radionúclidos publicados hasta la fecha en diversos informes, estudios y artículos se ha elaborado una base de datos para poder calcular los inventarios. Se ha asumido que la densidad del sedimentos del fondo marino presenta una densidad media de $2,5 \text{ g/cm}^3$ (Hermanson, 1990, citado en Baskaran y Naidu, 1995).

ii) Una vez inventariadas todas las zonas se ha relacionado los inventarios con los procesos característicos de cada una de ellas con la finalidad de explicar la distribución observada. Además se ha comparado entre si las áreas de una misma tipología, así como globalmente.

3. Resultados y Discusión

Las propiedades físico-químicas de los radionúclidos (^{137}Cs , ^{210}Pb e isótopos de Pu) y los diferentes procesos característicos en la diferentes regiones del Océano Ártico

-mares marginales, cuencas árticas centrales y Estrecho de Fram- determinan la distribución de éstos entre los diferentes compartimentos.

En general, en los mares marginales se ven caracterizados por un arrastre especialmente activo (Cochran et al., 1995; Baskaran et al., 1996; Landa et al., 1999) en comparación con en el Ártico central. Esto se debe a la mayor concentración de material particulado en la columna de agua como resultado de la alta productividad biológica y de la cantidad de inputs procedentes de las descargas de los ríos. La combinación de este proceso con las propiedades químicas de los isótopos determina la distribución entre la columna de agua y los sedimentos del fondo en estas áreas.

La cuencas árticas centrales se caracterizan por el grosor de la columna de agua que es superior al de las plataformas continentales. Para entender la distribución de los radionúclidos en los diferentes compartimentos entre las diferentes áreas del Océano Ártico es importante conocer el grosor de la columna de agua así como, la cantidad de material particulado en la columna de agua.

• ^{137}Cs

El ^{137}Cs , radionúclido conservativo presenta poca afinidad por el material particulado y es por ello que experimenta débilmente el proceso de arrastre. Por consiguiente, se caracteriza por encontrarse principalmente disuelto en la columna de agua (Livingston et al., 2000).

En los mares marginales como consecuencia de la elevada del proceso de *scavenging*. A pesar de que es un radionúclido conservativo, una parte del ^{137}Cs disuelto en la columna de agua es arrastrado por las partículas. Por tanto el inventario de la columna es menor. (*figura 2*). En las cuencas centrales, el inventario de ^{137}Cs en la columna de agua es superior al de los mares marginales debido a que a la escasez de partículas en suspensión y al mayor grosor de la columna de agua. La excepción se

encuentra en los mares marginales eurosiberianos, donde el ^{137}Cs se halla principalmente disuelto en la columna de agua en lugar de los sedimentos como se esperaría debido a la mayor eficiencia del *scavenging* en estas zonas. El valor más elevado de inventario de ^{137}Cs en la columna de agua se registra en el Mar de Barents (13740 Bq/m^2) (*figura 2*). Este valor elevado de inventarios en la columna de agua en el Mar de Barents es el resultado de la influencia de los vertidos de radioisótopos procedentes de las plantas de reprocesamiento europeas y de la descarga -especialmente de los ríos Yenisey y Ob-. El inventario de ^{137}Cs en los sedimentos de las cuencas árticas centrales se desconoce debido a la ausencia de datos, aunque es de esperar que el inventario en sedimentos sea inferior al de la columna de agua dado las propiedades del radioisótopo y de las características

Las cuencas centrales se diferencian entre ellas en el inventario de ^{137}Cs en la columna de agua. La Cuenca Euroasiática presenta un valor superior a la Canadiense, 8749 Bq/m^2 y 1674 Bq/m^2 , respectivamente. Las causas que originan que el inventario de la Cuenca Euroasiática sea superior al de la Canadiense son; i) la mayor influencia del flujo de radionúclidos procedente de las plantas de reprocesamiento europeas, especialmente de Sellafield (UK); ii) la mayor contribución del *fallout* producido por el accidente de Chernobyl; iii) el transporte de ^{137}Cs por las masas de agua desde las plataformas continentales eurosiberianas -donde los valores de ^{137}Cs en la columna de agua superiores a los de los mares norteamericanos- y iv) las descargas de ^{137}Cs del hielo marino -con un mayor contenido en el hielo formado en las plataformas eurosiberianas (*tabla 1*).

El ^{137}Cs en SIS representa un pequeño porcentaje respecto al total inventariado en cada una de las zonas. Pero no sólo se encuentra en SIS, también se halla disuelto en el propio cristal de hielo, aunque no se disponen de datos. Según Masqué et al. (submitted) dado que actualmente el *input*

atmosférico de ^{137}Cs es despreciable, se puede considerar que la mayor parte de ^{137}Cs en el hielo se encuentra asociado a los SIS. En las zonas marginales, los mares eurosiberianos presentan un inventario de ^{137}Cs en SIS superior a los norteamericanos (8 Bq/m² y 2 Bq/m², respectivamente) (tabla 1). El inventario en SIS se explica combinando i) los datos de los inventarios de ^{137}Cs en los sedimentos -valores superiores en los mares eurosiberianos-, ii) los mecanismos de incorporación de sedimentos en el hielo -los mares marginales eurosiberianos son las principales zonas de formación de hielo y según Pfirman et al. (1989, 1990) y Reimnitz et al. (1993) incorporan más sedimentos que los mares norteamericanos- y iii) la concentración de ^{137}Cs en la columna de agua (Cooper et al., 1998 y Nies et al., 1999)

Durante la deriva del hielo se enriquece, por un lado, por ciclos de congelación y deshielo y por otro, por la intercepción de material mediante deposición atmosférica. Las cuencas centrales presentan los valores más elevados de ^{137}Cs en SIS (20 Bq/m² y 16 Bq/m² para la Cuenca Euroasiática y Canadiense, respectivamente) puede ser debido al mayor tiempo de residencia del hielo marino en esta región, 6 años (Vinje, 2001). La diferencia entre el inventario entre ambas cuencas centrales puede ser debido a que el hielo de la Cuenca Euroasiática procede de las plataformas eurosiberianas. El hielo formado en las plataformas eurosiberianas presentan valores de inventarios de ^{137}Cs en SIS superior a los norteamericanos (tabla 1). Además, estas zonas son consideradas como las principales zonas fuente ya que tiene lugar la mayor producción e incorporación de sedimentos en el hielo y donde se registra un mayor inventario de ^{137}Cs en sedimentos (Landa et al., 1998; Meese et al., 1997). Por otro lado también experimenta un proceso de descarga de SIS y por tanto de los radionúclidos asociado a ellos. Por ejemplo, la concentración de ^{137}Cs en SIS representa el 41% respecto a la concentración de la Cuenca Euroasiática y un 52% respecto a la concentración de ^{137}Cs en la Canadiense. Aunque la mayoría de los sedimentos son liberados en el Estrecho de Fram durante la

fusión del hielo, su incorporación masiva activa el proceso de *scavenging* y como resultado de ello, el inventario de ^{137}Cs en la columna de agua disminuye (figura 2).

● $^{239,240}\text{Pu}$

El $^{239,240}\text{Pu}$ es un radionúclido reactivo, caracterizado por una alta afinidad por el material particulado de la columna de agua ($K_d = 1,7-1,8 \cdot 10^5$, Holm et al., 1986; Hong et al., 2004). Por lo que es susceptible de ser afectado por el *scavenging*.

En las plataformas continentales el proceso de *scavenging* es especialmente activo, por consiguiente, el $^{239,240}\text{Pu}$ se halla predominantemente en los sedimentos marinos (figura 3). El porcentaje que representa el $^{239,240}\text{Pu}$ en sedimentos en los mares de Chukchi y Beaufort es de un 99,8% del total inventariado y en los mares de Kara y Laptev el inventario en sedimentos representa un 94% del total de $^{239,240}\text{Pu}$ inventariado -valor similar al 96% registrado por Watters et al. (1980) en áreas de costa-. La diferencia puede ser debida a una mayor eficiencia del proceso de *scavenging* en los mares norteamericanos, aunque diversos autores consideran que es más intenso en las plataformas eurosiberianas. Otra explicación es que la tasa de input de $^{239,240}\text{Pu}$ sea mayor al proceso de *scavenging* en las plataformas eurosiberianas, originando que la columna de agua actúe como reservorio.

En mar abierto, en cambio el $^{239,240}\text{Pu}$ permanece principalmente disuelto en la columna de agua. Resultado de la limitación del *scavenging* en el Ártico central por la escasez de material particulado como por el mayor grosor de la columna de agua. Por ejemplo, en la Cuenca Canadiense aproximadamente el 99% se encuentra disuelto en la columna de agua (24 Bq/m²). En cambio, en el Estrecho de Fram el 80% del total de $^{239,240}\text{Pu}$ inventariado permanece disuelto en la columna de agua debido al aumento del material particulado por la liberación de sedimentos durante la fusión del hielo. Bowen et al. (1971) informa que únicamente entre el 10-20% del inventario del $^{239,240}\text{Pu}$ se deposita en los sedimentos.

Al igual que ocurre con el ^{137}Cs , los valores de inventario de $^{239,240}\text{Pu}$ en SIS presentan valores inferiores en los mares marginales respecto a las cuencas árticas centrales. Dentro de los mares marginales, son en los eurosiberianos donde se registra un valor más elevado (150 mBq/m^2) (tabla 1). De la misma forma que ocurre con los inventarios, los mares marginales eurosiberianos presentan una mayor concentración que los norteamericanos. En las cuencas centrales se observan los valores superiores debido al enriquecimiento durante su deriva. En la Cuenca Canadiense el inventario de $^{239,240}\text{Pu}$ en SIS es de 420 mBq/m^2 y en la Euroasiática de 580 mBq/m^2 . En el Estrecho de Fram, el valor superior del rango de inventario (70 mBq/m^2) es similar al valor del mar de Chukchi y Beaufort. Respecto a la concentración de $^{239,240}\text{Pu}$ en SIS destacar que es superior en el Estrecho de Fram (496 mBq/kg) que en el mar de Chukchi y Beaufort (260 mBq/kg). Además de hallarse asociado a sedimentos, también se encuentra disuelto en el hielo aunque no se disponen de datos de la concentración. No obstante, el *fallout* atmosférico de $^{239,240}\text{Pu}$ es menos apreciable en la actualidad. Por lo que se considera que la mayor parte del $^{239,240}\text{Pu}$ del hielo marino se encuentra asociado a los SIS (Masqué et al., submitted).

Durante la deriva, el hielo libera sedimentos y asociados a ellos radionúclidos. La concentración de $^{239,240}\text{Pu}$ en el Estrecho de Fram supone el 70% respecto a la concentración de la Cuenca Euroasiática y el 49% respecto a la concentración de la Cuenca Canadiense. En esta zona se registra el mayor inventario en sedimentos de $^{239,240}\text{Pu}$ como resultado de la liberación masiva de los SIS durante la época de fusión del hielo que activa el proceso de *scavenging* (figura 3).

• ^{210}Pb

Las fuentes del ^{210}Pb en el Océano Ártico son i) la deposición atmosférica, caracterizada por presentar un flujo constante a escala anual –Weis y Naidu (1995) registran $13,3 \text{ Bq/m}^2\text{a}$ en Alaska y Dibb (1990) entre $13,1\text{-}15,7 \text{ Bq/m}^2\text{a}$ en

Groenlandia-y ii) la desintegración del ^{226}Ra , disuelto en la columna de agua.

El ^{210}Pb se halla predominantemente en los sedimentos del fondo en todo el Océano ártico (figura 4). Aunque varía respecto al porcentaje que representa el inventario de ^{210}Pb en sedimentos respecto al total inventariado. Éste es superior en los mares de Chukchi y Beaufort (1197 Bq/m^2 en sedimentos, representa el 75% del total inventariado) que en la Cuenca Euroasiática (con 1721 Bq/m^2 en sedimentos, es un 57% del total inventariado). Sin embargo, en valor absoluto el inventario de ^{210}Pb en sedimentos aumenta desde los mares de Chukchi y Beaufort hasta el Estrecho de Fram, donde se registra el valor más elevado con 2732 Bq/m^2 (61% del total inventariado). El inventario en sedimentos es superior en la cuenca central que en los mares marginales a pesar de que en el ártico central el *scavenging* está limitado (figura 4). Este hecho se explica por la mayor diferencia entre el ^{226}Ra y ^{210}Pb ya que la columna de agua es superior. El mayor porcentaje de ^{210}Pb en sedimentos en los mares marginales y Estrecho de Fram es consecuencia de la mayor intensidad del proceso de *scavenging*. En relación al inventario en la columna de agua, las cuencas centrales presentan valores superiores a los mares norteamericanos como consecuencia del mayor grosor de la columna de agua.

De la misma forma que ocurre con ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$, el ^{210}Pb se incorpora al hielo marino asociado a los sedimentos. En general se observa como la concentración de Chukchi y Beaufort (983 Bq/kg) (tabla 1). En cambio, las cuencas centrales son las que presentan un mayor inventario de ^{210}Pb en SIS (456 Bq/m^2) debido al enriquecimiento durante su deriva. Pero, además también se encuentra disuelto en el propio cristal de hielo. Masqué et al. (submitted) han registrado valores entre $14,5\text{-}27,9 \text{ Bq/m}^2$ en el Estrecho de Fram. El rango de inventario de ^{210}Pb en SIS es de $1\text{-}23 \text{ Bq/m}^2$, aunque estos valores contienen una gran incertidumbre asociada como resultado del cálculo de la carga de SIS en el Estrecho de

Fram. La concentración de ^{210}Pb en SIS representa aproximadamente el 21% respecto a la Cuenca Euroasiática. Por lo tanto, durante el tránsito hacia el Estrecho de Fram se ha producido una descarga de ^{210}Pb a la columna de agua.

- **^7Be**

No se puede determinar la distribución del ^7Be en el Océano Ártico puesto que no se disponen de registros de dicho radioisótopo en los diferentes compartimentos para las diferentes zonas – mares marginales, cuencas centrales y Estrecho de Fram-. Únicamente se dispone del valor de la deposición (113-131 Bq/m²a, Dibb, 1990) y de la concentración en SIS en el Estrecho de Fram (13-212 Bq/kg, Masqué et al., submitted). La escasez de registros puede ser explicado al hecho de que tiene un periodo de semidesintegración de 53 días.

- **Sedimento del hielo marino (SIS)**

La cuantificación de la concentración y carga de sedimentos en el hielo es de especial importancia ya que asociados a ellos se incorporan los radionúclidos al hielo. Por tanto conocer la cantidad de SIS que se incorporan en al hielo proporciona una idea de la cantidad de radionúclidos que puede contener.

El rango de concentración de sedimentos en el hielo marino varía entre 5 a 56000 g/m³ (Osterkamp and Gosling, 1984; Larssen et al., 1987; Kempema et al., 1989; Nürnberg et al., 1994; Eicken et al., 1995,1997 y Pfirman et al., 1995). La concentración varía según el área.

En el mar de Laptev el promedio de concentración de SIS es de 156 g/m³ (Eicken et al., 1997) suponiendo un flujo anual entre 2 a 30 ·10⁶ toneladas (Eicken et al., 1997; Dethleff et al., 2005). En la plataforma de Beaufort se registra un valor medio de 192 g/m³ (Osterkamp and Gosling, 1984) y Barnes et al. (1982) informa de un rango entre 3 a 865 g/m³ en la misma zona. En los mares de Chukchi y Beaufort, Eicken

et al. (2005) determinan un promedio de SIS de 342 g/m³. En el Ártico central, Nürnberg et al. (1994) estiman un valor medio de 3974 g/m³. En el Estrecho de Fram no se dispone de concentración de SIS en hielo, aunque se puede realizar una aproximación conociendo el flujo anual de exportación de hielo marino (2900 km³, Vinje, 2001) y el flujo anual de sedimento (7-150 ·10⁶ t, Larssen et al., 1987 y Wollenburg, 1993), obteniendo un resultado de 2,4-51 g/m³. Es una primera aproximación ya que no todo el hielo que es exportado a través del Estrecho de Fram contiene sedimentos y según Dethleff et al. (2005) parece inverosímil o subestimado el flujo de 150 millones de toneladas de SIS exportadas ya que además del mar de Laptev existen otras plataformas continentales que contribuyen SIS en el Ártico central.

La amplitud de los rangos de concentraciones y de carga de SIS y la escasez de datos de los que se disponen dificultan la determinación el valor representativo de concentración y carga de SIS en cada zona. La cantidad de sedimentos en el hielo depende no sólo del proceso de formación, de los ciclos de congelación y fusión, sino también de las condiciones de formación y de donde, cuando y como se han recogido las muestras.

La distribución de la concentración de SIS presenta una gran variación entre las diferentes regiones. En las cuencas centrales se observan los valores más elevados como consecuencia del enriquecimiento durante el tránsito pero además por tener el hielo un mayor tiempo de residencia. Los valores inferiores se registran en el Estrecho de Fram que son insignificantes comparados con los valores del Ártico central. La diferencia pone de manifiesto que la descarga de sedimentos durante la deriva, y según los datos registrados, sería del 99% respecto a la concentración del Ártico central. Dicho valor se haya sobrevalorado por la infravaloración de la concentración de SIS en el Estrecho de Fram, así como por las aproximaciones y las limitaciones que se han realizado durante el cálculo de la carga de SIS. Según los datos, parece que la descarga de sedimentos tenga lugar

predominantemente en las cuencas centrales y no en el Estrecho de Fram. Este hecho entraría en contradicción con se tiene la certeza que dicha zona es la principal zona de ablación del hielo marino y principal zona de incorporación de sedimentos.

La descarga de sedimentos es importante en las cuencas centrales ya que es la principal fuente de material particulado en la columna de agua, y es el responsable del *scavenging*. Una mayor concentración de SIS supone una mayor concentración de radionúclidos puesto que éstos se hallan asociados a los sedimentos. Esta hipótesis es un poco arriesgada porque la concentración de radionúclidos en los sedimentos depende de diversos parámetros como la mineralogía, tamaño de los sedimentos, etc. (Cooper et al., 1998; Matishov et al., 1999; Crane et al., 2000). Por tanto, la descarga de SIS durante el tránsito también se pone de manifiesto en los inventarios de los radionúclidos en SIS. Se observa como la variación de los inventarios de los radionúclidos no es tan amplia como la concentración de SIS en el hielo.

Por último, si como consecuencia del cambio climático varía la circulación, el régimen de hielo, los tiempo de tránsito y el flujo de exportación de hielo. Un incremento de exportación de hielo desde la plataformas continentales a las cuencas centrales conlleva a un aumento de la carga de SIS en el hielo. También puede provocar un posible aumento de la liberación de SIS durante su deriva y en las principales zona de ablación, principalmente en el Estrecho de Fram, respecto a la situación Así, se podría relacionar la concentración de sedimentos con el flujo de hielo y, por consiguiente, con el clima. Podrían ser utilizados como proxies paleoclimáticos. Por ejemplo, las capas de Heinrich que relacionan la acumulación de sedimentos transportados por icebergs con el aumento de fusión de éstos (Boecker, 1994).

4. Conclusiones

El movimiento de las masas de agua y los procesos de sedimentación, así como la

incorporación de sedimentos el hielo marino tienen un papel destacado en la determinación del destino final de los radionúclidos. Otro aspecto importante son las propiedades geoquímicas del propio radionúclido para determinar su destino final y su distribución en los diferentes compartimentos del Océano Ártico. Así, los radioisótopos conservativos (^{137}Cs) se hallan predominantemente disueltos en la columna de agua. Los reactivos (^{210}Pb e isótopos de Pu) en los mares marginales se encuentran principalmente en los sedimentos debido a la intensidad del *scavenging* y en el Ártico central en la columna de agua, por la limitación del *scavenging* como por el grosor de la columna de agua.

La ausencia de registros y la amplitud de los rangos de concentración y carga de SIS en el hielo han dificultado la determinación más precisa de la liberación de sedimentos durante el tránsito. El valor estimado de la descarga de SIS y de radionúclidos asociados a ellos durante la deriva está sobrevalorado. A pesar de ello, los datos indican que si se produce tal liberación y por tanto el hielo marino contribuye a la dispersión y redistribución de sedimentos y de radionúclidos de sedimentos y radionúclidos a lo largo del Océano Ártico.

En el Estrecho de Fram se produce la liberación masivamente de SIS. En dicha área se observa como los inventarios de los radionúclidos en sedimentos aumentan como consecuencia de la activación del proceso de *scavenging* por el flujo de material particulado procedente de la fusión del hielo marino.

5. Bibliografía

- Aagaard, K., (1981). On the deep circulation of the Arctic Ocean. *Deep-Sea Res.* 82: 251-268.
- Aarkrog, A. (1988). *Worldwide data on fluxes of $^{239,240}\text{Pu}$ and ^{238}Pu to the oceans.* LAEA-TECDOC-481- Inventories of selected radionuclides in the Oceans. Vienna: International Atomic Energy Agency.p103-138.
- AMAP. (1997). Arctic Pollution Issues: A *State of the Arctic Environment Report.* Arctic Monitoring and Assessment Programme, P.O. box 8100 Dep., N-0032 Oslo, Norway.

- Barnes P.W. and Reimnitz E., (1974). Sedimentary processes on Arctic Shelves off the northern coast of Alaska. In: J.C. Reed and J.E. Sater (Editors). *The coast And Shelf of the Beaufort Sea*. Arct. Inst. N. Am., Arlington, pp. 439-502.
- Baskaran and Naidu (1995). ^{210}Pb -derived chornology and the fluxes of ^{210}Pb and ^{137}Cs isotopes into continental shelf sediments, East Chukchi Sea, Alaska Arctic. *Geo. Cosm. Acta*, 59, 4435-4448.
- Baskaran et al. (1996). Pu, ^{137}Cs and excess ^{210}Pb in the Russian Arctic sediments. *Earth and planetary Science Letters* 140 243-257.
- Baskaran et al. (1995). Distribution of $^{239,240}\text{Pu}$ and ^{238}Pu concentrations in sediments from the Ob and Yenisey Rivers and the Kara Sea. *Appl. Radiat. Isot.* 46. 1109-1119.
- Baskaran, M. (2005). Interaction of sea sediments and surface sea water in the Arctic Ocean: Evidence from excess ^{210}Pb . *Geophysical reseach letters*, Vol. 32, LI2601.
- Bowen V.T., Wong K.M. and Noshkin V.E. (1971) Plutonium-239 in and over the Atlantic Ocean. *J.Mar. Res.* 29, 1-10.
- Cochran J.K., D. J. Hirschberg, H. D. Livingston,- K. O. Buesselert and R. M. Keys (1995). Natural and anthropogenic radionuclide distributions in the Nansen Basin, Arctic Ocean: Scavenging rates and circulation timescales. *Deep-Sea Research II. Vol. 42, No. 6, pp.* 1495-1517.
- Colony, R. and Thorndike, A.S. (1985). Sea ice motion as a drunkard's walk. *Journal of Geophysical Research*, 90, 965-974.
- Cooper, L.W., Larsen, I.L., Beasley, T.M., Dolvin, S.S., Grebmeier, J.M., Kelley, J.M., Scott, M. and Jonhson-Pyrtle, A. (1998). The distribution of radiocesium and plutonium in Sea Ice-entrained Arctic sediments in relation to potential Sources and sinks. *Journal of Environmental Radioactivity*, 39 (3), 279-303.
- Crane, K., Galasso, J., Brown, C., Cherkashov, G., Ivanov, G. and Vanstain, B. (2000). Northern ocean inventories of radionuclide contamination: GIS efforts to determine the past and present state of the environment in and adjacent to the Arctic. *Marine*
- Dethleff, D. (2005). Entrainment and export of export of Laptev Sea ice sediments, Siberain Arctic. *Journal of Geophysical Research*, 110, C070009, doi:10.1029/2004J002740.
- Dethleff, D., Loewe, P., Kleine, E., (1998). The Laptev Sea flaw lead - Detailed investigation on ice formation and export during 1991/92 winter season. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 27, 3, 225-243.
- Dibb, J.E. 1990. Beryllium-7 and ^{210}Pb in the atmosphere and surface snow over the Greenland ice sheet in the summer of 1989. *Journal of Geophysical Research*, 95, 407-422.
- Eicken, H., Gradinger, R., Gaylord, A., Mahoney, A., Rigor, I., Melling, H. (2005). Sediment transport by sea ice in the Chukchi and Beaufort Seas: Increasing importance due to changing ice conditions?. *Deep-Sea Research II*, 52, 3281-3302
- Eicken, H., Reimnitz, E., Alexandrov, V., Martin, T., Kassens, H. and Viehoff, T. (1997). Sea-ice processes in the Laptev Sea and their importance for sediment export. *Continental Shelf Research*, 17 (2), 205-233.
- Holm E., Aarkrog A., Ballestra S. and Dahlgaard H. (1986). Origin and isotopic ratios of plutonium in the Barents and Greenland Seas. *Earth and Planetary Letters*, 79, 27-32
- Hong G.H., Baskaran M. and Povinec P.P (2004). Artificial Radionuclides in the Western North Pacific: A Review *Global Environmental Change in the Ocean and on Land*, Eds., M. Shiyomi *et al.*, pp. 147-172.
- Huh C. Piasias N.G., Kelley J.M., Maiti T.C., Grantz A. 1997. Natural radionuclides and plutonium in sediments from te western Arctic Ocean: sedimentation rates and parthways of radionuclides. *Deep-sea Research II. Vol 44.* 1725-1743.
- Kempema, E.W., Reimnitz, E. and Barnes, P.W. (1989). Sea ice sediment entrainment and rafting in the Arctic. *J. Sed. Pet.*, 59, 308-317.
- Landa, E., Reimnitz, E., Beals, D., Pochkowski, J., Rigor, I. (1998). Transport of ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ with ice-rafted debris in the Arctic Ocean. *Arctic*, 51, 27-39.
- Landa, E., Reimnitz, E., Beals, D., Pochkowski, J., Rigor, I. (1998). Transport of ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ with ice-rafted debris in the Arctic Ocean. *Arctic*, 51, 27-39.
- Larssen, B.B., Elverhoi, A. and Aagaard, P. (1987). Study of particulate material in sea-ice in the Fram Strait - a contribution to paleoclimate research. *Polar Research*, 5(3), 313-315.
- Livingston H.D., Bowen V.T., Kupferman S.L., Moore R.M., (1984). Vertical profile of artificial radionuclide concentrations in the central Arctic Ocean. *Geochimica Cosmochimica Acta* 48, 2195-2203.
- Livingston H.D. and Povinec P.P. (2000). *Anthropogenic marine radioactivity Ocean and Coastal Management*, Volume 43, Issues 8-9, 2000, Pages 689-712.
- Masqué, P., Cochran, J.K., Hebbeln, D., Hirschberg, D.J., Dethleff, D. and Winkler, A.

- (2003). The role of sea ice in the fate of contaminants in the Arctic Ocean: Plutonium atom ratios in the Fram Strait. *Environmental Science and Technology*, 37, 4848-4864.
- Masqué, P., Cochran, J.K., Hirschberg, D.J., Dethleff, D., Hebbeln, D., Winkler, A. and Pfirman, S. (submitted) Radionuclides in Arctic sea ice: tracers of sources, fates and ice transit time scales. Submitted to *Deep-Sea Research I*.
- Matishov G.G., Mastishov D.G., Namjatov A.A., Carroll J., Dahle S. (1999). Anthropogenic radionuclides in Kola and Motovski Bays of the Barents Sea, Russia. *Journal Environment Radioactivity* 43, 77-88.
- Maykut, G.A., (1985). *The ice environment*. In: Horner, R.A. (Ed.), *Sea Ice Biota*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Meese, D.A., Reimnitz E., Tucker, W.B.III, Gow, A.J., Bischof, J., Darby, D. (1997). Evidence for radionuclide transport by sea-ice. *Sci. Total Environ.* 202, 267-278.
- Nies H., Harms I.H., Karcher M.J., Dethleff D., Bahe C. (1999). Anthropogenic radioactivity in the Arctic Ocean –review of the results from the joint German project- *The Science of the Total Environment* 237, 238; 181-191.
- Nürnberg, D., Wollenburg, I., Dethleff, D., Eicken, H., Kassens, H., Letzig, T., Reimnitz, E. and Thiede, J. (1994). Sediments in Arctic Sea ice: implications for entrainment, transport and release. *Marine Geology*, 119, 185 -214.
- Osterkamp, T. E. and Gosink, J. P. (1984). *Observations and analyses of sediment-laden sea ice*. In: Barnes, P. W., Schell, D. M., and Reimnitz, E. (eds.) *The Alaskan Beaufort Sea: ecosystems and environments*, Orlando, Academic Press, pp. 73-93.
- Pavlov, V.K., Timokhov, L.A., Baskakov, G.A., Kulakov, M., Yu., Kurazhov, V.K., Pavlov, P.V., Pivovarov, S.V., Stanovoy, V.V. (1994). *Hydrometeorological regime of the Kara, Laptev, and East Siberian Seas*. Part 1.: Processes of transfer and transformation of contaminants inflowing by continental discharge into the Kara, Laptev and East Siberian Seas. Federal Service of Russia for hydrometeorology and monitoring of the environment. The Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, 1-179.
- Pfirman S.L., Gascard, J.C., Wollenburg, I., Mudie, P. y Abelman, A., (1989). Particle-laden Eurasian Arctic sea ice: Observation from July and August 1987. *Polar Research* 7: 59-66.
- Pfirman, S., Lange, M.A., Wollenburg, I. and Schlosser, P. (1990). *Sea ice characteristics and the role of sediment inclusions in deep-sea deposition: Arctic-Antarctic comparisons*. In: U. Bleil and J. Thiede (eds.), *Geological History of the Polar Oceans: Arctic versus Antarctic*. Kluwer Academic Publishers, pp. 187-211.
- Pfirman, S.L., Eicken, H., Bauch, D. y Weeks, W.F. (1995). The potential transport of pollutants by Arctic Sea ice. *Science of the Total Environment*, 159, 129-146.
- Reimnitz E., Marincovich L., McCormick M., Briggs W., (1992). Suspension freezing of bottom sediment and biota in the Northwest Passage and implications for Arctic Ocean sedimentation. *Canadian Journal of Earth Science* 29: 693-703.
- Reimnitz E., Marincovich L., McCormick M., Briggs W., (1992). Suspension freezing of bottom sediment and biota in the Northwest Passage and implications for Arctic Ocean sedimentation. *Canadian Journal of Earth Science* 29: 693-703.
- Smith J.N. and Ellis K.M. (1995). Radionuclide tracer profiles at the CESAR Ice Station and Canadian Ice Island in the western Arctic Ocean. *Deep-sea Research II. Vol. 42. No. 6, 1449-1470*.
- Smith J.N., Ellis, K.M., Kilius L.R.(1998) 129I and 137Cs tracer measurements in the Arctic Ocean. *Deep-Sea research I*, 45, 959-984.
- Smith J.N., Ellis, K.M., Polyak L., Ivanov G., Forman S.L., Moran S.B. (2000). ^{239,240}Pu transport into the Arctic Ocean from underwater nuclear tests in Chernaya Bay, Novaya Zemlya. *Continental Shelf Research* 20, 255-279.
- Smith L.M., Gifford H. Miller, Bette Otto-Bliesner, Sang-Ik Shin. (2003). Sensitivity of the Northern Hemisphere climate system to extreme changes in Holocene Arctic sea ice. *Quaternary Science Reviews* 22,645–658.
- Strand P. Nitikin A., Rudjoird A.L., Salbu B., Chrisjensen G., Foyen L., Kryshev I.I., Chumichev V.B., Dahlgaard H., Holm E. (1994). Survey of artificial radionuclides in the Barents Sea and the Kara Sea. *J. Environ. Radioactivity* 25, 99-112.
- Stumm, W. y Morgan, J.J., (1981). *Aquatic Chemistry*. John Wiley and Sons, NY.
- UNSCEAR, (1988): *Ionization Radiation: Sources, effects and risks of ionizing radiation*. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York, UN, *Report to the General Assembly, with annexes*.
- UNSCEAR, (2000). *Sources and effects of ionizing radiation*. New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations.
- Vinje, T., (2001). Fram Strait ice fluxes and atmospheric circulation 1950-2000. *Journal of Climate*, 14(16), 3508-3517.

Weeks, W. F. y Ackley, S.F., (1986). *The growth, structure and properties of sea ice*. In: N. Untersteiner (Ed.), *Geophysics of Sea Ice*. NATO Advanced Studies Institute Series, Series B, Physics, 146. Plenum Press, New York, pp. 9-14.

Weeks, W.F., (1994). *Possible role of sea ice in the transport of hazardous material*. In: Proc. Workshop on Arctic Contamination, Interagency Arctic Research Policy Committee, Anchorage, Alaska, 1993. *Arctic Research of the United States*, 8; 34-52.

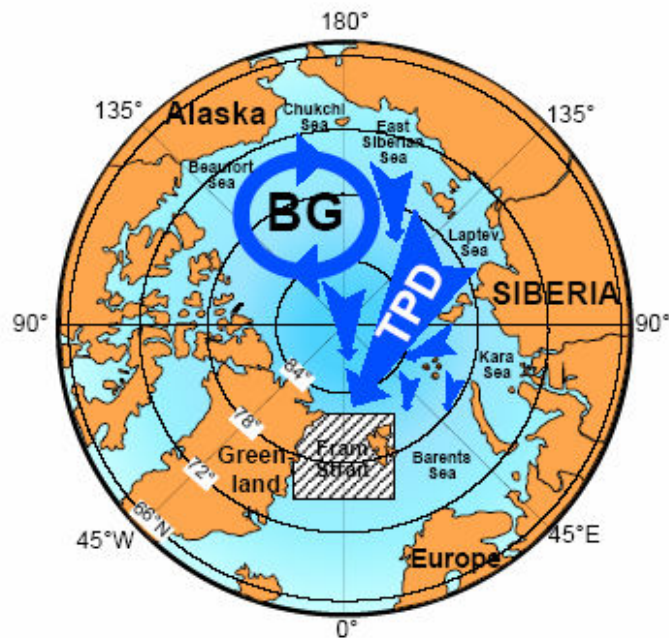
Weis H.V. and Naidu A.S. (1986). 210Pb flux in an Arctic coastal region. *Arctic*, 39, 59-64.

Wollenburg, I. (1993). Sediment transport durch das arktische Meeris: Die rezente lithogene und biogene Materialfracht. *Berichte zur Polarforschung (Rep Polar Res)*, 127, 1-159

Zakharov, V.F. (1966). The role of flaw leads off the edge of fast ice in the hydrological and ice regime of the Laptev Sea. *Oceanology*, 6, 815-821.

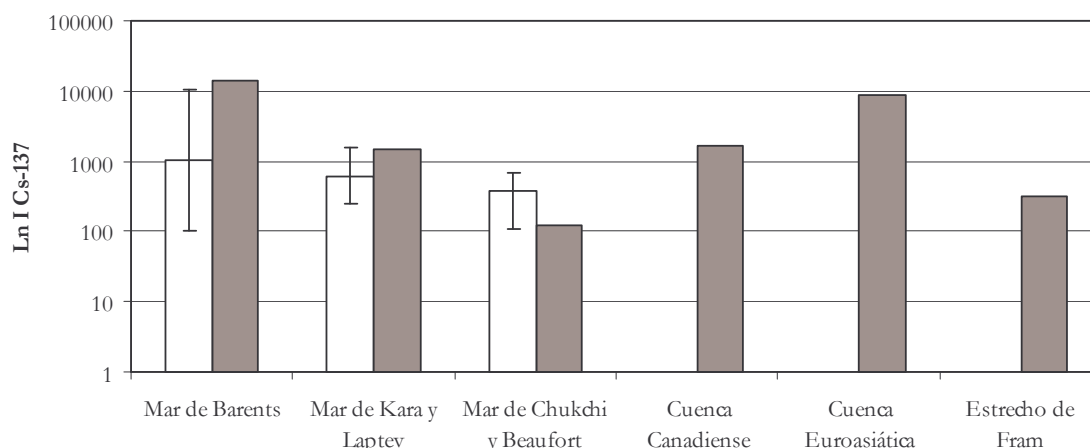
Zakharov, V.F. (1976). Cooling of the Arctic and the ice cover of the Arctic Seas. Arctic and Antarctic Research Institute, Leningrad, Russia, pp. 96 (English translation by the Norwegian Polar Institute).

Figura 1. Esquema de la principales vías de circulación del hielo marino en el Océano Ártico



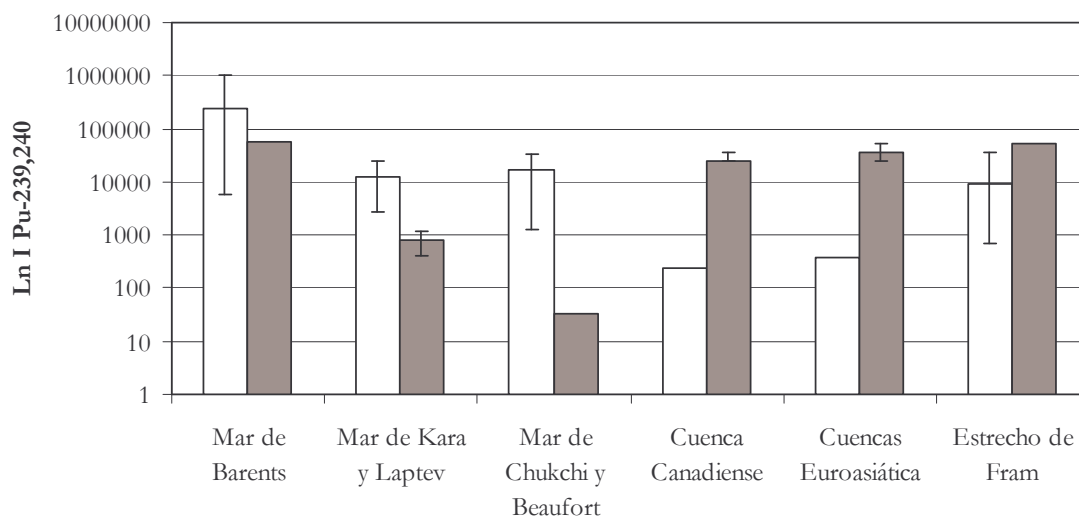
Fuente: Masqué et al. 2003

Figura 2. Inventario de la columna de agua (Bq/m²) de ¹³⁷Cs en las diferentes regiones del Océano Ártico.



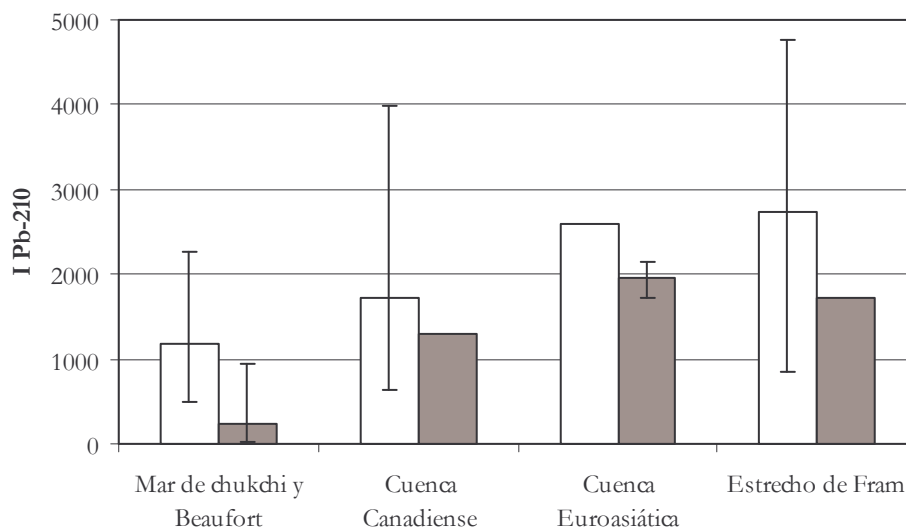
Los datos del mar de Barents proceden de Strand et al. (1993) en Smith et al. (1995); Cochran et al. (1995) y Smith et al. (2000). Los datos del mar de Kara y Laptev proceden de Strand et al. (1994); Hamilton et al. (1994); Smith et al. (1995); Stand et al. (1993) en Smith et al. (1995) y Baskaran (1996). Los del mares de Chukchi y Laptev son de Baskaran and Naidu (1995); Cooper et al. (1995); Medinets et al. (1992) en Cooper et al. (1995). Los de la Cuenca Canadiense proceden de Smith and Ellis, (1995). Los datos de la Cuenca Euroasiática de Cochran et al. (1995) y los del Estrecho de Fram proceden de Smith et al. (1990, 2003).

Figura 3. Inventario de ^{239,240}Pu en sedimentos marinos (color blanco) y de columna de agua (color gris) (mBq/m²) en las diversas regiones del Océano Ártico.



Los datos del mar de Barents proceden de Strand et al. (1993) en Smith et al. (1995); Cochran et al. (1995) y Smith et al. (2000). Los de los mares de Kara y Laptev de Strand et al. (1994); Baskaran (1996) y Huh et al. (1997). Los del mar de Chukchi y Beaufort proceden de Hardy et al. (1993) en Baskaran et al. (1995); Huh et al. (1995) en Huh et al. (1997) y Landa et al. (1998, 1999). Los de la Cuenca Canadiense proceden de Huh et al. (1997); Livingston et al. (1984) en Baskaran et al. (1995); Cooper et al. (2000) y Smith et al. (2003). Los datos de la Cuenca Euroasiática proceden de Livingston (1985) en Aarkrog (1988); Baskaran et al. (1995) y Cochran et al. (1995) y Livingston et al. (1995) en Huh et al. (1997) y en el Estrecho de Fram procede de Masqué et al. (2003) y Livingston et al. (1985) en Aarkrog (1995).

Figura 4. Inventario de ^{210}Pb en sedimentos (color blanco) y de la columna de agua (color gris) (Bq/m^2) en las diferentes regiones del Océano Ártico.



Los datos de los mares de Chukchi y Beaufort proceden de Huh et al. (1997); Huh et al. (1995) en Huh et al. (1997) y Smith et al. (2003). Los de la Cuenca Canadiense de Huh et al. (1997) y Smith et al. (2003). Los de la Cuenca Euroasiática proceden de Smith et al. (2003) y los del Estrecho de Fram proceden de Masqué et al. (2003) y Smith et al. (1990, 2003)

Tabla 1. Inventario de ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$ y ^{210}Pb en sedimentos del hielo marino

	SIS	^{137}Cs		$^{239,240}\text{Pu}$		^{210}Pb	
	g/m^2	Bq/Kg	Bq/m^2	Bq/Kg	Bq/m^2	Bq/Kg	Bq/m^2
Mar de Kara y Laptev	246	31 *	8	0,595*	0,15	n.d	n.d
Mar de Chuckchi y Beaufort	186	10 ■**	2	0,260	0,048	983 ■	182
Cuenca Euroasiática	596,1	34 *■°	20 (8,5)	0,706*	0,42 (0,18)	765 ■	456 (191,25)
Cuenca Canadiense	596,1	27 °*	16 (6,7)	0,965*	0,58 (0,24)	n.d	n. d.
Estrecho de Fram	6-136	14^	0,084-2	0,496^	3 · 10 ⁻³ -0,07	166^	1-23

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de ° Cooper et al. (1995, 1998); ° Meese et al. (1997); * Landa et al. (1998); ■ Baskaran (2005); ^Masqué et al. (submitted). n.d. no hay registro.