

## ACUMULACIÓN DE RADIATIVIDAD EN HONGOS Y SU RELACIÓN CON ROEDORES EN EL BOSQUE DEL CENTRO NUCLEAR DE MÉXICO

Víctor Hugo VALENZUELA<sup>1</sup>, Teófilo HERRERA<sup>1</sup>, María Isabel GASO<sup>2</sup>,  
Évangeline PÉREZ-SILVA<sup>1</sup> y Esperanza QUINTERO<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias, UNAM, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510, D.F., México

<sup>2</sup> Instituto de Biología, UNAM, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510, D.F., México

<sup>3</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Apdo. Postal. 18-1027, 11801 D.F., México

*(Recibido febrero 2003, aceptado abril 2004)*

Palabras clave: macromicetos, roedores, micofagia, bioindicadores, radionúclidos

### RESUMEN

Se estudió la concentración de radionúclidos en hongos y su posible transferencia a roedores por considerar a los hongos como bioindicadores de radiactividad. Los coeficientes de transferencia indican el paso de radionúclidos desde un medio o compartimiento a otro. Los factores agregados describen la transferencia a través de una cadena completa de parámetros como el factor que relaciona la concentración de radionúclidos en el suelo y en el alimento. Se hizo la evaluación del fenómeno de la micofagia, se comprobó la presencia de esporas y tejido fúngico en el tracto digestivo de los roedores, se determinó la concentración del cesio 137 y del potasio 40 en los roedores y se calculó el coeficiente de transferencia.

Key words: macromycetes, rodents, mycophagy, bioindicators, radionuclides

### ABSTRACT

The concentration of radionuclides in mushrooms and their possible transfer to rodents were studied because fungi are considered as bioindicators of radioactivity. The transfer coefficients indicate radionuclides transference from one medium or compartment to another. The aggregate factors describe the transference through a complete chain of parameters such as the factor relating the concentration of radionuclides in the soil and the food. An evaluation of the phenomenon of mycophagy was made. The presence of mushroom spores and tissue in the digestive tract of the rodents was observed. Also, the concentration of radiocesium and radiopotassium in the rodents was determined and the transfer coefficient was calculated.

### INTRODUCCIÓN

Se ha comprobado que hay roedores adaptados a la micofagia, con efectos tanto en su población como en la dispersión de los hongos.

Por otra parte, la toxicidad fúngica y el valor alimenticio de los hongos tienen implicaciones en la es-

tructura y en la función del ecosistema (Trappe y Maser 1976).

En los ecosistemas terrestres, el suelo es el principal receptor de la mayoría de los radionúclidos; por eso tiene la mayor concentración de éstos, lo que permite tomarlo como referencia (Copplestone *et al.* 1999).

La principal justificación para utilizar bioindicadores en el Programa de Vigilancia Radiológica del Centro Nuclear de México, consiste en que pueden concentrar eficientemente los radionúclidos que existen en el ambiente y es posible analizarlos, en los bioindicadores, de manera sencilla, rápida y con el menor costo (Gasó *et al.* 1998, 2000a, b).

El propósito principal de la investigación acerca de los hábitos alimentarios de los pequeños roedores es conocer los hongos que consumen estos animales y observar cómo, cuándo y dónde los obtienen, por lo que es importante identificar correctamente dichos hongos (Kiefer *et al.* 1996).

Debido a que los hongos son buenos bioindicadores de contaminación radioactiva y a que los roedores los consumen con frecuencia, ambos son de gran ayuda como indicadores de este tipo de contaminación (Thomas 2000).

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el Centro Nuclear Nabor Carrillo de México, que se localiza a 2 km hacia el sureste del poblado de Salazar, municipio de Ocoyoacac, Estado de México (19° 17' 19" N y 99° 22' 43" O). Su extensión aproximada es de 15 km<sup>2</sup> y cuenta con un reactor nuclear Triga Mark III, de 1MW de potencia, un acelerador tandem, un irradiador gamma y varios laboratorios radioquímicos.

Los macromicetos y los roedores fueron determinados en el Laboratorio de Micología y en la Colección Nacional de Mamíferos (CNMA), del Instituto de Biología de la UNAM, respectivamente. Los especialistas que identificaron los hongos fueron Evangelina Pérez Silva, Teófilo Herrera y Víctor Hugo Valenzuela. Los roedores fueron identificados por Beatriz Villa, Yolanda Hortelano, Julieta Vargas y Víctor Hugo Valenzuela.

La recolección y el muestreo de los roedores fue

al azar, colocando trampas de golpe en varios puntos de la zona de estudio (Williams 1962, Wolf y Dueser 1985). Los hongos fueron registrados por los métodos convencionales (Cifuentes *et al.* 1986, Wolf y Dueser 1985). El material fúngico fue depositado en el Herbario Nacional (MEXU). Los roedores capturados están conservados en la mencionada colección de mamíferos.

El volumen irregular que presentan los cuerpos fructíferos de la gran diversidad de hongos encontrados no permite evaluar cuantitativamente el consumo del hongo (como en el caso del fenómeno de herbivoría) ya que los hongos no presentan volumen homogéneo que sea fácil de evaluar, como en el caso de las hojas que son relativamente planas. El consumo de cuerpos fructíferos por pequeños mamíferos fue evaluado con fines prácticos por medio de porcentajes aproximados, para presentar resultados cuantitativos, sin llegar al 100%, pues en este caso no se puede identificar el hongo consumido (Fig. 1).

Los contenidos estomacales de los pequeños roedores se colocaron en matraces Erlenmeyer de 100 ml con 30 ml de solución de 6 g de bisulfito de sodio (NaHSO<sub>3</sub>) y 4 g de sulfito de sodio (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) en 100 ml de agua destilada, por espacio de 20 min, se lavaron con agua corriente durante 10 min con la finalidad de eliminar el fijador FAA (formol, ácido acético y alcohol) en el que se conservaron los aparatos digestivos de los ratones, siguiendo una técnica ya establecida (Trappe y Masser 1976, Fogel y Trappe 1978).

El análisis del contenido estomacal de los roedores y la determinación de esporas y de tejido fúngico se efectuaron de la siguiente manera: se cortó a lo largo el tracto digestivo de los roedores; con un bisturí, se rasparon las paredes del estómago y de los intestinos delgado y grueso, los contenidos de estos órganos se colocaron en vasos separados, se añadió agua destilada y se homogeneizó con un agitador magnético durante 15 min. Después el material estomacal se pasó por un filtro Swinner-250, el filtrado se colocó en tu-

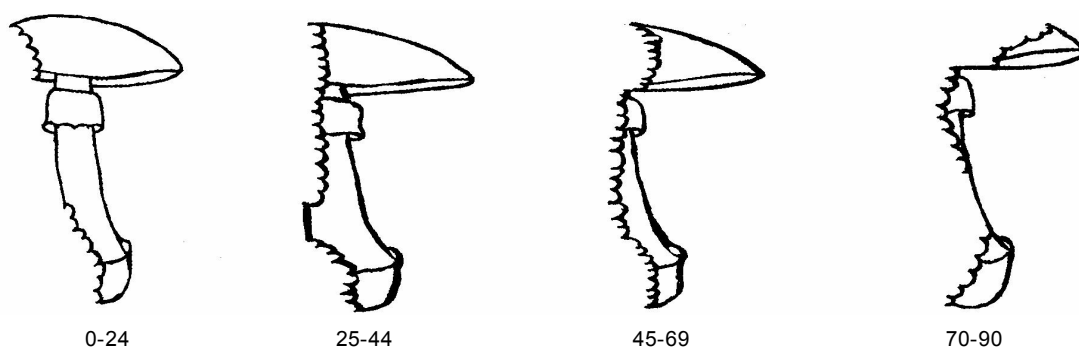


Fig. 1. Evaluación esquemática porcentual de la microfagia de los roedores de esta investigación

bos de 15 ml y se centrifugó a 1500 rpm durante 15 minutos.

A continuación se decantó el sobrenadante, el material sedimentado fue resuspendido en agua destilada, filtrado y centrifugado nuevamente a 1500 rpm durante 15 min. El botón del sedimento fue resuspendido en agua destilada, para usarlo en la identificación de esporas.

La técnica de montaje se realizó con el material filtrado que se obtuvo de los contenidos estomacales de los ratones, usando alcohol polivinílico como medio de montaje (Sieverding 1991). Las preparaciones realizadas con este método fueron revisadas para buscar esporas y tejido fúngico, en un microscopio de luz a un aumento de 100X. En la identificación de esporas se usaron diversos reactivos como el de Melzer (Kühner y Romagnesi 1953) y KOH al 10 %.

Se determinaron las concentraciones de actividad del  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{40}\text{K}$  por unidad de peso seco tanto en las muestras de roedores como en las de hongos. Las calibraciones de eficiencia del detector se hicieron siguiendo la geometría de cartucho. La cantidad de muestra seca y molida que se utilizó fue de 45 g aproximadamente (Gasó *et al.* 1998).

Para el análisis de los radionúclidos sólo se utilizaron el músculo y el hueso de los ratones y los carpóforos de los hongos involucrados en la micofagia. Las muestras se secaron a temperatura constante de 125 °C durante 48 horas; después se molieron en un molino Wiley con malla de 1 mm. En cada tipo de muestra se registró la pérdida de peso, debido al proceso de secado, para cálculos posteriores.

Las muestras de hongos y de ratones se analizaron con un detector de germanio hiperpuro Princeton Gamma Tech. Modelo N-IGC 29, con 27 % de eficiencia relativa, acoplado a un analizador multicanal.

El cálculo de la actividad de cada radionúclido presente en las muestras se indica en  $\text{Bq kg}^{-1}$  (peso seco) y en función del área de los fotopicos que presenta el espectro (Quintero *et al.* 1996).

Se revisaron 180 preparaciones de contenidos estomacales, de éstas se seleccionaron 15, por presentar esporas solitarias o pequeños grupos de tres o cuatro; se identificaron esporas semejantes a las de los géneros *Russula* y *Lycoperdon*, tanto por la morfología de las mismas, como por su reacción positiva o negativa con el reactivo de Melzer; esto prueba el consumo de hongos por los ratones muestreados.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Hongos

Se obtuvieron numerosos cuerpos fructíferos de macromicetos comestibles y tóxicos, de los cuales se

determinaron 78 especies, correspondientes a los órdenes: Pezizales, Aphyllophorales, Agaricales y Lycoperdales (**Tabla I**).

En la clasificación de las familias se ha seguido el criterio de Lowy (1971), para Tremellales; en Aphyllophorales la base fue la obra de Gilbertson y Ryvarden (1987), en Agaricales la base fue Singer (1986) y en Gasteromycetos, Bowerman (1961), Guzmán (1970), Cunningham (1942), León-Gómez y Pérez-Silva (1988), Pegler *et al.* (1995), y Pérez-Silva *et al.* (1999).

### Mamíferos

Con base en los ejemplares disponibles se logró determinar tres especies de roedores que correspondieron a tres géneros de la familia Muridae. Se alimentan de pastos, semillas y frutos y en la época de lluvias también de carpóforos de hongos (**Tabla II**).

### Micofagia

Las especies de hongos tienen ventaja estratégica en la diseminación si las esporas son ingeridas por los roedores y después excretadas lejos de su lugar de origen.

En la preparación por gradiente de densidad raramente se agregan las esporas en grandes grupos, no exceden un máximo de cinco esporas por grupo, por lo que es posible la observación individual de ellas.

### Análisis de radionúclidos y cálculo de la concentración de actividad en los pequeños roedores

El objetivo de esta parte del trabajo fue identificar las especies de pequeños roedores con mayor capacidad de acumulación de radionúclidos tanto de origen artificial como natural.

La relación entre la concentración de los radionúclidos en los pequeños mamíferos y los hongos contribuye al conocimiento de la dinámica del  $^{137}\text{Cs}$  y del  $^{40}\text{K}$  en los ecosistemas forestales.

Se presentan los resultados obtenidos en las muestras de músculo y hueso de ratones analizados en el Laboratorio de Vigilancia Radiología Ambiental del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ).

En el **tabla III** se indican los valores de la actividad específica del  $^{137}\text{Cs}$  y del  $^{40}\text{K}$ , sólo en las especies de hongos en las que se observó algún consumo por parte de los roedores, así como la contribución de los radionúclidos consumidos mediante la ingestión de cada especie. Se indican también los porcentajes de consumo, la actividad específica de los hongos y la transferencia que aportan a los roedores tanto de  $^{137}\text{Cs}$  como de  $^{40}\text{K}$ .

El cociente de la relación de concentración (RC) ó factor de transferencia (FT), que es la concentración de un elemento en el hongo, dividida entre su concen-



**TABLA III.** VALORES DE ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE  $^{137}\text{Cs}$  Y  $^{40}\text{K}$  EN HONGOS Y SU CONTRIBUCIÓN VÍA INGESTIÓN POR LOS ROEDORES

| Especies de hongos                 | Porcentaje de hongo consumido por los roedores% | Actividad específica de $^{137}\text{Cs}$<br>$\text{Bq kg}^{-1}$<br>en los hongos | Actividad específica de $^{40}\text{K}$<br>$\text{Bq kg}^{-1}$<br>en los hongos | Ingestión de $^{137}\text{Cs}$ por roedores<br>$\text{Bq kg}^{-1}$ | Ingestión de $^{40}\text{K}$ por roedores<br>$\text{Bq kg}^{-1}$ |
|------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| <i>Agaricus campestris</i>         | 10                                              | 3.6                                                                               | 1343                                                                            | 0.36                                                               | 134.3                                                            |
| <i>Amanita pantherina</i>          | 80                                              | 36.9 *                                                                            | 1043 *                                                                          | 29.5                                                               | 834.4                                                            |
| <i>Boletus aereus</i>              | 50                                              | 26.6                                                                              | 439                                                                             | 13.3                                                               | 116.8                                                            |
| <i>Clavariadelphus pistillaris</i> | 50                                              | 75.0                                                                              | 1323                                                                            | 37.5                                                               | 661.5                                                            |
| <i>Clavariadelphus truncatus</i>   | 15                                              | 646.5                                                                             | 1315                                                                            | 96.98                                                              | 197.3                                                            |
| <i>Gomphus floccosus</i>           | 50                                              | 304.9                                                                             | 628                                                                             | 152.2                                                              | 314.0                                                            |
| <i>Hygrophorus</i> sp.             | 10                                              | 35.8                                                                              | 1780                                                                            | 3.6                                                                | 178.0                                                            |
| <i>Lactarius salmonicolor</i>      | 45                                              | 34.8                                                                              | 805                                                                             | 15.66                                                              | 362.3                                                            |
| <i>Pholiota</i> sp.                | 95                                              | 21.0                                                                              | 1119                                                                            | 19.95                                                              | 1063.0                                                           |
| <i>Russula olivacea</i>            | 40                                              | 12.9                                                                              | 778                                                                             | 5.2                                                                | 311.0                                                            |
| <i>Lycoperdon</i> sp.              | 30                                              | 23.85                                                                             | 310                                                                             | 2.38                                                               | 185.7                                                            |
|                                    |                                                 | 111.08                                                                            | 944.818                                                                         | 34.33                                                              | 396.75                                                           |

\* valor estimado por Yoshida y Muramatzu (1994)

mayor cantidad de  $^{40}\text{K}$  y por lo tanto, el porcentaje consumido por los ratones es mayor, como sería el caso de *Pholiota* sp., *Amanita pantherina*, *Clavariadelphus pistillaris* y *Lactarius salmonicolor*.

El factor de concentración (FC) del  $^{137}\text{Cs}$  de los hongos hacia los pequeños roedores fue calculado para cada especie de ratón (Tabla IV), utilizando el valor promedio del  $^{137}\text{Cs}$  y el  $^{40}\text{K}$  (con base en peso seco) en los hongos y en los ratones, tomando en cuenta el porcentaje de consumo de cada especie de hongos por los roedores, así como las actividades específicas del  $^{137}\text{Cs}$  y del  $^{40}\text{K}$  en cada especie de ratón.

## CONCLUSIONES

Las plantas toman el  $^{137}\text{Cs}$  directamente de la lluvia radiactiva que precipita a la tierra y lo incorporan a su metabolismo. También pueden recibir este radionúclido de los hongos micorrízicos con los que están asociadas y estos a su vez son capaces de incorporarlo directamente de la atmósfera y del suelo.

En la evaluación de la micofagia realizada por los pequeños roedores, se observó que estos prefieren ciertas partes de los cuerpos fructíferos de los hongos; por ejemplo de los agaricales eligen los pileos, aunque también pueden consumir los estípites.

El aumento en la concentración de cualquier radionúclido en el ambiente se estima considerando un impacto potencial que puede calcularse a partir de la dosis que reciben los individuos de poblaciones que viven cerca de una instalación nuclear, que comen y beben sólo productos locales.

Las relaciones cualitativas y cuantitativas de los hongos con las poblaciones de pequeños mamíferos en los diversos tipos de hábitat estudiados, demuestran la importancia de considerar una cadena trófica y la transferencia de radionúclidos en ella.

Es también importante analizar los factores que pudieran alterar la conservación de los bosques y de las diversas formas de vida asociadas a los mismos en una armonía ecológica.

Se concluye que hay transferencia y acumulación de radionúclidos de los hongos a los roedores sin valo-

**TABLA IV.** ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE  $^{137}\text{Cs}$  Y  $^{40}\text{K}$  EN ROEDORES Y FACTORES DE CONCENTRACIÓN HONGOS-ROEDORES

| Especies de roedores                                                      | Actividad específica en hongos $\text{BqKg}^{-1}$ |                 | Actividad específica en roedores $\text{BqKg}^{-1}$ |                 | Promedio de $^{137}\text{Cs}$ en hongos $\text{BqKg}^{-1}$ | Factor de concentración hongo-roedor |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
|                                                                           | $^{137}\text{Cs}$                                 | $^{40}\text{K}$ | $^{137}\text{Cs}$                                   | $^{40}\text{K}$ |                                                            |                                      |
| <i>Neotomodon alstoni</i>                                                 | 2.0                                               | 300.2           | 0.24                                                | 27.20           | 34.33                                                      | 0.06                                 |
| <i>Reithrodontomys megalotis</i>                                          | 2.8                                               | 312.7           | 0.48                                                | 53.16           | 34.33                                                      | 0.08                                 |
| Muestra compuesta por <i>Microtus mexicanus</i> y las especies anteriores | 5.1                                               | 178.1           | 0.45                                                | 15.85           | 34.33                                                      | 0.15                                 |

rar si es alta o baja, lo cual se podría investigar cuando se hagan más trabajos sobre el tema.

También convendría valorar el peligro potencial de la acumulación de radiactividad en los consumidores frecuentes de hongos recolectados en lugares con alta contaminación radiactiva.

## AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Beatriz Villa y a las M. en C. Yolanda Hortelano y Julieta Vargas (mastozoólogas de la Colección Nacional de Mamíferos del Instituto de Biología, UNAM) por la ayuda en la determinación de las especies de roedores. También se agradece a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM (DGAPA) y al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) por el apoyo brindado para la elaboración del trabajo.

## REFERENCIAS

- Bowerman C.A. (1961). *Lycoperdon* in Eastern Canada with special reference to the Ottawa District. Can. J. Botany 39, 353-383.
- Cifuentes-Blanco J., Villegas-Ríos M. y Pérez-Ramírez L. (1986). Hongos. En: *Manual de herbario* (A. Lot y F. Chiany, Eds.). Consejo Nacional de la Flora de México, pp. 55-64.
- Copplestone D., Johnson M.S., Jones S. R., Toal M. E. y Jackson D. (1999). Radionuclide behaviour and transport in a coniferous woodland ecosystem: vegetation, invertebrates and wood mice, *Apodemus sylvaticus*. Sci. Tot. Environ. 239, 95-109.
- Cunningham G. H. (1942). *Gasteromycetes of Australia and New Zealand*. Dunedin, N. Z., 236 p.
- Fogel R. D. y Trappe J. M. (1978). Fungus consumption (mycophagy) by small mammals. Northwest Science 52, 1-31.
- Gasó M.I., Segovia N., Herrera T., Pérez-Silva E., Cervantes L., Quintero E., Palacios J. y Acosta E. (1998). Radiocesium accumulation in edible wild mushrooms from coniferous forests around the Nuclear Centre of Mexico. Sci. Total. Environ. 223, 119-129.
- Gasó M.I., Segovia N., Cervantes L., Herrera, T. y Pérez-Silva E. (2000a). Internal radiation dose from  $^{137}\text{Cs}$  due to the consumption of mushrooms from a Mexican temperate mixed forest. Radiat. Protect. Dosimetry, 87, 213-216.
- Gasó M.I., Segovia N., Morton O., Cervantes L., Godínez P., Peña P. y Acosta E. (2000b).  $^{137}\text{Cs}$  and relationships with major and trace elements in edible mushrooms from Mexico. Sci. Total. Environ. 262, 73-89.
- Gilbertson R.L. y Ryvarden L. (1987). *North American Polypores 2*. Fungiflora, Oslo, pp. 435-856.
- Guzmán G. (1970). Monografía del género *Scleroderma* Pers. emend. Fr. Darwiniana 16, 233-407.
- Hawksworth D.M., Kirk P., Sutton B. y Pegler. D.N. (1995). *Ainsworth and Bisby's. Dictionary of the Fungi*. Eighth Ed. International Mycological Institute. zCAB International, Surrey, Reino Unido.
- Kiefer P., Prohl G., Muller H., Lindner G., Drissner J. y Zibold G. (1996). Factors affecting the transfer of radiocesium from soil to rodents in forest ecosystems of southern Germany. Sci. Total Environ. 192, 49-61.
- Kühner R. y Romagnesi H. (1953). *Flore analytique des champignons supérieurs*. Masson et Cie, Paris, 554 p.
- León-Gómez C. y Pérez-Silva E. (1988). Especies de Nidulariales (Gasteromicetes) comunes en México. Rev. Mex. Micol., 4, 161-183.
- Lowy B. (1971). Tremellales. Flora Neotrópica 6. The New York Botanical Garden, Nueva York.
- Pegler D.N., Laessle B.M. y Spooner B.M. (1995). British puffballs, earthstars and stinkhorns. Royal Botanical Gardens, Kew, Inglaterra.
- Pérez-Silva E., Herrera T. y Esqueda-Valle M. (1999). Species of *Geastrum* (Basidiomycotina, Geastraceae) from Mexico. Rev. Mex. Micol. 15, 89-104.
- Quintero E., López H. y Cervantes L. (1996). Gamma and beta background counting  $^{131}\text{I}$  in milk in the vicinity of the Nuclear Center of Mexico. J. Radiat. Nucl. Chem. L. 214, 309-317.
- Sieverding E. (1991). *Vesicular-arbuscular management in tropical agroecosystems*. Technische Zusammenarbeit (GTZ). GmbH. H.
- Singer R. (1986). *The Agaricales in Modern Taxonomy*. Fourth Ed. Koeltz, Scientific Books, Koenigstein.
- Thomas P. A. (2000). Radionuclides in the terrestrial ecosystem near a Canadian uranium mill: small mammals food chains and bioavailability. Health Physics 78, 625-632.
- Trappe J.M. y Maser C. (1976). Germination of spores of *Glomus macrocarpus* (Endogonaceae) after passage through a rodent digestive tract. Mycologia 68, 433-436.
- Williams O. (1962). A technique for studying microtine food habits. J. Mamm. 93, 365-368.
- Wolff O.J. y Dueser D.R. (1985). Foods and habitats of sympatric *Peromyscus leucopus* and *P. maniculatus*. J. Mamm. 66, 46-52.
- Yoshida S. y Muramatsu Y. (1994). Radiocesium concentration in mushrooms collected in Japan. J. Environ. Radioactivity 22, 141-154.