

Los isótopos se están utilizando para estudiar los efectos ecológicos en la Amazonia brasileña.

Isótopos en investigaciones ambientales

Los estudios sobre la cuenca del Amazonas en el Brasil están ayudando a evaluar los efectos que los cambios en la explotación de la tierra tienen en la ecología y el clima

por Glynn Bowen, Kazimierz Rozanski y Peter Vose

Cada vez se hace más real la amenaza de que nuestro medio ambiente experimenta una modificación considerable.

El rápido aumento de las concentraciones de gases con efecto de invernadero en la atmósfera, el deterioro de los recursos hídricos, la deforestación y los contaminantes industriales son sólo algunos ejemplos de la creciente presión que se ejerce sobre el ecosistema global. Es preciso realizar con urgencia una evaluación apropiada de las posibles consecuencias socioeconómicas de esos cambios de gran alcance y formular estrategias idóneas de intervención, lo que exigirá una mayor comprensión de esos sistemas sumamente complejos con estructuras internas heterogéneas y numerosos mecanismos de retroalimentación.

Los problemas ambientales pueden clasificarse en distintas categorías interrelacionadas. Algunos se circunscriben en mayor o menor medida al lugar directamente afectado, como por ejemplo, la erosión de los suelos frágiles expuestos a una explotación excesiva. La ordenación deficiente de recursos, especialmente en grandes extensiones de terreno, provocará efectos de más largo alcance, como la eutroficación del agua por la acción del nitrato y el fosfato. La explotación forestal puede afectar la sedimentación de los cursos de agua, la calidad del agua y las cadenas alimentarias de los animales acuáticos. Lejos de la fuente pueden producirse efectos de gran alcance que afecten zonas enteras; por ejemplo, posibles cambios en la precipitación debido a la tala en gran escala de selvas húmedas o a la lluvia ácida originada en lugares distantes. Por último, entre los efectos globales más alarmantes figuran los cambios climáticos asociados al calentamiento global.

Desde hace mucho los isótopos radiactivos y estables se han considerado un instrumento muy eficaz para estudiar los aspectos físicos y biológicos del ecosistema global. Sus aplicaciones en la investigación del medio ambiente son numerosas y abarcan todos los niveles.

En este artículo se analizan sólo algunos de los enfoques adoptados para abordar los problemas ambientales relacionados con el uso de los isótopos, y se presta especial atención a los estudios sobre la cuenca del Amazonas.

La cuenca del Amazonas

La cuenca del Amazonas abarca una superficie de 6 millones de kilómetros cuadrados y es la cuenca continental de evaporación más grande del mundo. Comprende cerca de la mitad de los bosques tropicales de la Tierra, y en ella habitan unas 80 000 especies vegetales y posiblemente 30 millones de especies animales, en su mayoría insectos. El río Amazonas aporta el 20% de la descarga fluvial a los océanos. Sobre este ecosistema singular de importancia global se cierne actualmente la grave amenaza de la deforestación generalizada. En el último decenio se perdieron aproximadamente 180 000 kilómetros cuadrados de bosque primario en la región brasileña de la Amazonia.

Desde hace tiempo el OIEA viene participando en las investigaciones sobre isótopos ambientales que se realizan en el Brasil por intermedio de diversos proyectos emprendidos dentro del marco de programas de cooperación técnica. El proyecto más ambicioso ejecutado hasta la fecha se inició en 1985. Se trata de un amplio esfuerzo multidisciplinario que comprende el estudio con la ayuda de isótopos de los efectos que los cambios en la explotación de la tierra tienen en la ecología y el clima de la región amazónica del Brasil. Este proyecto, que reúne a unos 80 científicos procedentes de diversos institutos brasileños, recibe apoyo técnico de la División Mixta FAO/OIEA y de la Sección de Hidrología Isotópica de la División de Ciencias Físicas y Químicas del OIEA.

La coordinación del proyecto en el Brasil corre a cargo de la Comisión Nacional de Energía Nuclear (CNEN) de este país y en él participan varios institutos brasileños. El proyecto mantiene contactos muy fructíferos con varias entidades extranjeras. Por ejemplo, el Gobierno de Suecia ha hecho una notable contribución al programa de hidrología por conducto del Organismo Sueco para la Cooperación con los Países en Desarrollo en la Esfera de la Investigación (SAREC). Se mantienen relaciones positivas con el Office Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM) de Francia, la Fundación Nacional de Ciencias de los Estados Unidos, el Instituto Max Planck de Limnología de Alemania, el Departamento de Ciencias Geológicas de la Universidad Waterloo del Canadá, el Fondo Mundial para la Naturaleza y otras instituciones.

Balances hídricos en la región — evapotranspiración

Los isótopos ambientales son instrumentos muy valiosos en los estudios sobre el ciclo del agua, debido en parte al hecho

El Sr. Bowen es Jefe de la Sección de Fertilidad de Suelos, Riego y Producción Agrícola de la División Mixta FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Agricultura y la Alimentación, y el Sr. Rozanski es funcionario de la Sección de Hidrología Isotópica de la División de Ciencias Físicas y Químicas del OIEA. El Sr. Vose fue Asesor Técnico Principal del Proyecto de la Amazonia del OIEA.

de que las moléculas de agua contienen tres isótopos diferentes que pueden utilizarse con eficacia como trazadores. El tritio, un trazador radiactivo, es especialmente útil para estudiar la dinámica del movimiento del agua en diferentes compartimentos de la hidrosfera, tanto a escala local como global. Los isótopos estables pesados de hidrógeno y oxígeno (deuterio y oxígeno 18) suministran información sobre las características estacionarias del ciclo del agua.

Desde principios de los años sesenta la red global de estaciones, operada conjuntamente por el OIEA y la Organización Meteorológica Mundial (OMM), ha vigilado mensualmente la distribución del contenido de tritio, deuterio y oxígeno 18 en la precipitación. Esta excepcional base de datos sobre isótopos posibilita numerosas aplicaciones de los isótopos ambientales en la hidrología, la climatología y las ciencias atmosféricas. (Véase el artículo sobre el mismo tema que aparece en este número del Boletín del OIEA.)

En los últimos años se ha realizado un número cada vez mayor de investigaciones sobre los diversos aspectos del transporte del agua a la atmósfera con ayuda de los métodos isotópicos. El enfoque metodológico de estos problemas ha variado y de los modelos semiempíricos de "masas aisladas de aire" se ha pasado a los modelos generales de circulación a escala global, modelos estos últimos en que se ha tenido en cuenta la gran complejidad de los procesos atmosféricos que ocasionan la precipitación a diferentes escalas de tiempo y espacio. Los últimos estudios más recientes, orientados a integrar los ciclos isotópicos a los modelos generales de circulación a escala global, han confirmado la utilidad de la base de datos del OIEA/OMM para la verificación y ulterior mejoramiento de estos tipos de modelos.

La deforestación en gran escala contribuirá a cambiar el balance hídrico regional mediante la reducción del flujo de evapotranspiración a la atmósfera, problema especialmente crítico en la cuenca del Amazonas. La densa cubierta vegetal y las temperaturas relativamente altas del aire de la superficie hacen que la "bomba de agua biológica" actúe con eficacia y devuelva una parte importante de la precipitación a la atmósfera. El modelo isotópico regional de transporte del vapor de agua en la atmósfera de la cuenca (basado en anteriores estudios de datos isotópicos sobre la precipitación) reveló que cerca del 50% de la precipitación de la cuenca consiste en humedad reciclada (Véase la figura 1), cuestión que confirman los últimos datos obtenidos. Esa alta contribución de humedad reciclada hace que el ciclo del agua sea sensible a la deforestación y que con el debilitamiento de la "bomba de agua biológica" se escape más agua a los ríos y aumenten las temperaturas locales.

Hace poco se ha establecido en el marco del proyecto del Brasil una red especial de estaciones de muestreo de precipitación para análisis isotópicos con el propósito de conocer más a fondo el régimen de transporte del vapor de agua en la cuenca. Los datos que se obtengan de esa forma, complementados con el análisis isotópico del vapor de agua, permitirán elaborar un modelo más avanzado de distribución de la humedad atmosférica en esta región. El acceso a modelos representativos de circulación atmosférica y de transporte del vapor de agua en esta región es especialmente importante, dados los posibles efectos regionales y globales que tendría la tala del bosque amazónico.

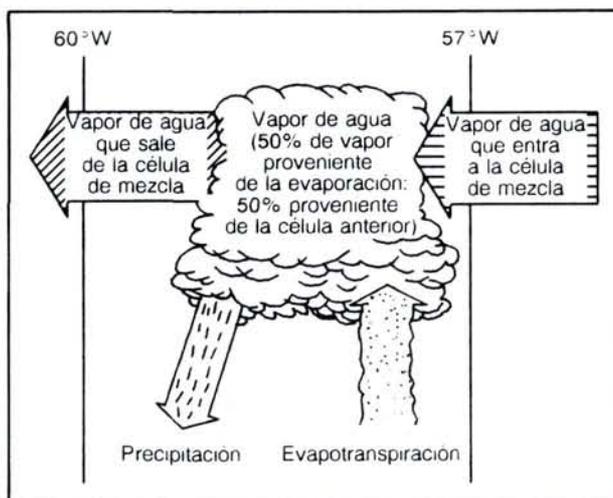
Si de resultados de la deforestación se reduce la cantidad de agua que regresa a la atmósfera, probablemente los efectos variarán según el tamaño del área deforestada. Existe poca información detallada sobre los balances hídricos com-

parativos de las superficies forestales aisladas y no aisladas o de las zonas desforestadas de diferente tamaño situadas próximas a los bosques. No obstante, las investigaciones que se realizan por medio del proyecto brasileño, que comprenden la medición neutrónica de la humedad, la micrometeorología y los estudios fisiológicos de especies vegetales, indican que la influencia del límite del bosque se hace patente, por lo menos, a una distancia de 100 metros en el interior del mismo a nivel del suelo. Ello implica que, desde el punto de vista meteorológico, los efectos de la deforestación quizás tengan mayor alcance que el tamaño real de la superficie desforestada, efectos que se intensificarán a medida que continúe la deforestación y que aumente la relación cada vez más elevada entre el límite del bosque y el bosque inalterado.

Distribución del agua superficial

El segundo requisito importante, que permitirá comprender mejor la dinámica del ciclo del agua en la cuenca del Amazonas, consiste en determinar con más precisión la distribución a una escala regional de las aguas superficiales procedentes del cauce principal del Amazonas y sus afluentes. En este sentido se prevé que sean muy útiles los datos isotópicos obtenidos a través de la red regional de datos sobre las precipitaciones, complementados con la vigilancia isotópica sistemática en toda la cuenca del agua almacenada en el cauce principal del río y en la llanura aluvial. En particular, será posible deducir las proporciones del agua almacenada en el cauce principal y en la llanura aluvial, así como también las tasas de transferencia del agua entre esas dos fuentes principales de almacenamiento en diferentes estaciones y en cada segmento del valle fluvial. Los análisis isotópicos preliminares indican que hasta el 30% del agua del cauce principal se deriva del agua que ha pasado por la llanura aluvial.

Figura 1. Esquema simplificado de formación de la lluvia en la cuenca del Amazonas



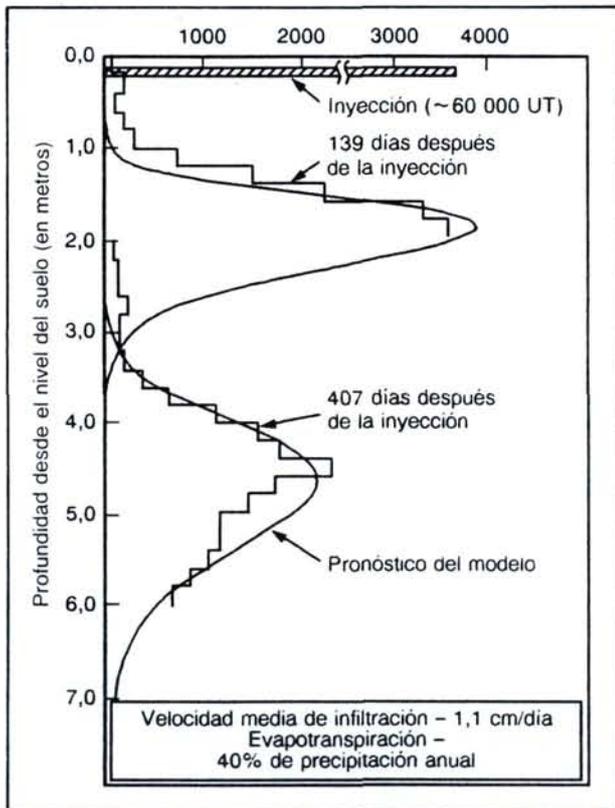
En la ilustración se muestra un esquema general para explicar la formación de la lluvia en la Amazonia a partir de dos fuentes de vapor: el Océano Atlántico y el bosque. (La ilustración se basa en las medidas de oxígeno 18 y deuterio realizadas por Salati, Dall'Olio et al. en las aguas naturales y vapor atmosférico.)

Transporte del agua en el suelo. Los datos isotópicos ambientales también proporcionan información sobre el transporte y almacenamiento del agua en la zona no saturada del lugar afectado. Numerosos estudios dan pruebas de que el tritio es un trazador muy importante del movimiento del agua en la zona no saturada.

En un estudio llevado a cabo en virtud del proyecto brasileño, se pudo evaluar la velocidad media de infiltración y el flujo de evapotranspiración tanto del bosque inalterado como de la superficie desforestada de la región. (Véase la figura 2.) Aunque el estudio isotópico brinda información sobre la dinámica del movimiento del agua en la zona no saturada, la cantidad de agua almacenada en el suelo se determina, generalmente, utilizando equipos basados en la moderación de neutrones.

Sedimentación. Desde hace mucho tiempo se sabe que el aumento de la sedimentación en los ríos es una de las consecuencias principales de la deforestación. No obstante, es difícil obtener un estudio de referencia o resultados que determinen el cambio en la tasa de sedimentación de los ríos de aguas blancas (exentas de materia orgánica) de la Amazonia.

Figura 2. Resultados del experimento de infiltración en la Amazonia Central



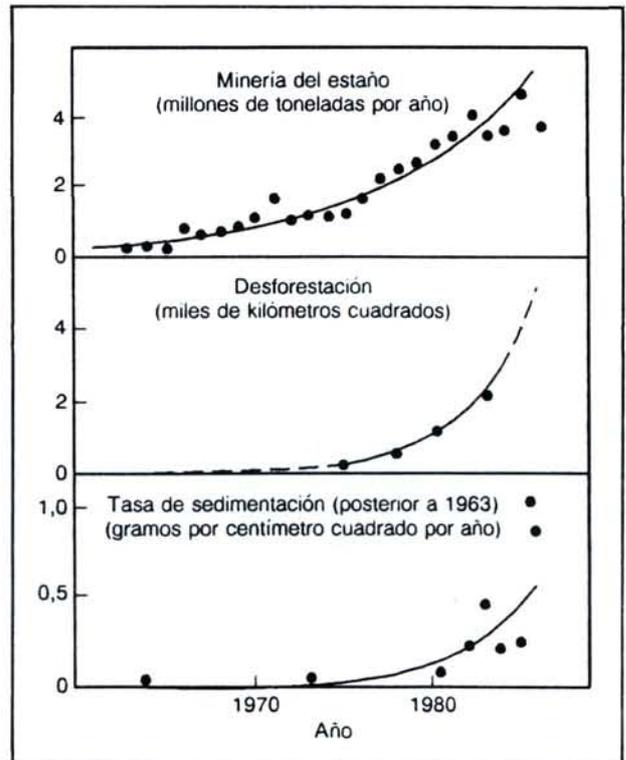
El gráfico indica los resultados obtenidos en un experimento de infiltración realizado cerca de Manaus (Amazonia Central) en el marco del proyecto del OIEA en el Brasil. Se utilizó tritio artificial inyectado como trazador del movimiento del agua en la zona no saturada. Se recogieron muestras del suelo a los 139 y 407 días de la inyección y se midió el contenido de tritio en el agua extraída del suelo. A partir de la posición del máximo de la curva de distribución del trazador y del contenido de agua en el suelo, se pudo determinar la velocidad media de infiltración y el flujo medio de evapotranspiración de esta región. Se elaboró un modelo numérico que permite simular el movimiento del agua en el suelo en intervalos de un día.

Los antecedentes de la sedimentación en los lagos de las llanuras aluviales de los ríos Jamari y Jiparana, que drenan en el Estado de Rondonia, se determinan geocronológicamente mediante el análisis de las estratigrafías del plomo 210 y el cesio 137 en perfiles de muestras inalteradas de sedimentos. Según los resultados obtenidos en el Lago Paca, pequeño lago de la llanura aluvial de Jamari, la sedimentación ha aumentado diez veces en el último decenio, aumento que está en relación directa con la deforestación y la minería del estaño. (Véase la figura 3.)

Efectos locales de los nutrientes en la zona afectada

Los efectos específicos locales llegan, por naturaleza, a convertirse en efectos de mayor escala. Cuanto mayor sea la superficie, tanto mayor será el efecto fuera del lugar directamente afectado. Desde el punto de vista de la nutrición, el bosque tropical es un sistema perfectamente equilibrado. Un importante elemento perturbador como la deforestación plantea problemas en relación con la dinámica de los recursos de nitrógeno, azufre y otros nutrientes del suelo. ¿Qué cantidad de éstos se perderá? ¿Quedará suficiente cantidad para regenerar el bosque original? ¿Bastarán esos nutrientes para cultivar la tierra desforestada? O, al igual que muchos otros, ¿desembocará este sistema de suelo tropical en una espiral de fertilidad irreversible? ¿Cómo pueden desarrollarse sistemas sostenibles?

Figura 3. Efectos de la minería y la deforestación en la tasa de sedimentación



Los estudios basados en el plomo 210 han demostrado que la sedimentación del Lago Paca en Rondonia está directamente asociada a la deforestación y a la minería hidráulica del estaño. (Datos de Forsberg, Godov y Victoria.)

Los métodos isotópicos, algunos relativamente nuevos, desempeñan una función importante en los estudios específicos a escala local. He aquí algunos ejemplos indicativos:

- *Estudio sobre renovación de la materia orgánica.* Se ha estudiado el cambio de la relación isotópica del carbono 13/carbono 12 de la materia orgánica para determinar las contribuciones respectivas del carbono orgánico procedente del bosque y de los pastizales. En los estudios sobre el Amazonas, después de un año, la proporción del carbono obtenido de los pastizales en la capa de 0 a 20 centímetros fue del 5% y, después de dos años, del 20%. Alrededor del 40% del carbono procedente del bosque había desaparecido. Sin embargo, los pastizales habían reemplazado en gran parte la materia orgánica perdida.

- *Estudio sobre la fijación biológica del nitrógeno.* La fijación biológica del nitrógeno es una de las formas en que pueden mantenerse los niveles de nitrógeno en el suelo para conservar su productividad. La ocurrencia y magnitud de este proceso pueden evaluarse a través del nitrógeno 15, basándose en la abundancia isotópica natural de este isótopo en las plantas.

- *Estudio sobre la disponibilidad y las pérdidas de nitrógeno.* El uso experimental del nitrógeno 15 es de inestimable valor para determinar el nitrógeno del suelo que se transfiere a la atmósfera y al agua subterránea, así como el nitrógeno que se libera con la descomposición de la materia orgánica. Con los isótopos estables y radiactivos de azufre se pueden efectuar estudios similares.

Cadenas alimentarias acuáticas

Las variaciones naturales en los isótopos estables de carbono, nitrógeno y azufre se utilizan para determinar el flujo de energía a través de las redes alimentarias acuáticas. En la Amazonia, los trabajos se han centrado principalmente en el carbono 13, que se ha empleado para identificar la fuente energética vegetal de peces, cocodrilos e insectos acuáticos. El descubrimiento más sorprendente hasta la fecha es que las hierbas con biosíntesis del tipo C₄, que representan más de la mitad de la producción primaria de la llanura aluvial del Amazonas, parecen aportar muy poco a las redes alimentarias acuáticas. Los datos muestran el predominio abrumador de las fuentes de carbono con biosíntesis del tipo C₃ como alimento de los peces que componen el 90% de la producción pesquera comercial de la Amazonia.

Contaminantes

Existen muchos tipos de contaminantes y de métodos isotópicos útiles para investigarlos y poder eliminarlos o conocer sus efectos y reducirlos al mínimo. Los productos agroquímicos marcados isotópicamente se han venido utilizando desde hace tiempo para estudiar el desplazamiento y degradación de los pesticidas. Se están poniendo a punto importantes técnicas basadas en el uso de ADN marcado con isótopos para estudiar el desarrollo de organismos degradadores de contaminantes del suelo difíciles de erradicar.

Una de las principales preocupaciones de los países industrializados es la contaminación del agua con ión nitrato a causa del uso excesivo de fertilizantes. Una solución parcial es seleccionar genotipos de plantas de cultivo de elevada productividad que requieran menor cantidad de fertilizantes, es decir, disminuir la carga del suelo. Por ejemplo, algunas variedades de cereales presentan una eficiencia mayor que otras para la asimilación de fertilizantes nitrogenados. Isótopos tales como

el nitrógeno 15 pueden resultar un elemento clave para estudiar las razones que ocasionan este fenómeno. La información obtenida puede orientar a los cultivadores para un mejor enfoque de sus programas de cultivo.

Asimismo, los isótopos estables nitrógeno 15 y azufre 34 son de incalculable valor en los estudios sobre los efectos de la contaminación atmosférica en las plantas. También los isótopos carbono 14 y fósforo 32 se utilizan en los estudios fisiológicos de especies vegetales.

Erosión y desertificación

La erosión y la desertificación son dos importantes problemas ambientales que aquejan a todo el mundo. Tanto es así que todos los años se desertifican unos 6 millones de hectáreas. Los isótopos suelen contribuir en gran medida a la medición de la erosión, para lo cual se han utilizado, por ejemplo, los cambios de los niveles de cesio 137 en los suelos superficiales (cesio derivado de la precipitación radiactiva procedente de ensayos nucleares pasados).

En la rehabilitación de los suelos erosionados y desertificados, los árboles fijadores de nitrógeno desempeñan un papel fundamental. El nitrógeno 15 es indispensable para evaluar la fijación del nitrógeno de diferentes árboles y variedades, incluyendo los efectos de la ordenación de especies arbóreas y otros factores. Por otra parte, en plantas leguminosas la determinación de las relaciones carbono 13/carbono 12 es de gran ayuda para seleccionar los genotipos que absorben eficazmente el agua para su crecimiento. En el programa de suelos de la División Mixta FAO/OIEA se estudian éstos y otros aspectos.

Evaluación de los cambios

En este artículo se han señalado algunos posibles usos de los isótopos en la investigación del medio ambiente. Estos son instrumentos poderosos que no se han aprovechado plenamente. Aunque en este trabajo no se ha abordado específicamente el importante problema del cambio climático del globo, la tala del bosque amazónico puede tener graves consecuencias a este respecto. En el programa ambiental del OIEA se presta especial atención a este tema. Una de esas consecuencias podría ser una reducción considerable del calor latente que se transporta a las regiones más allá de los trópicos y la aceleración del efecto de invernadero por la emisión de enormes cantidades de dióxido de carbono y otros gases con dicho efecto.

Los resultados obtenidos con los modelos climáticos actuales indican que una destrucción total y rápida del bosque amazónico podría ser irreversible. Los cambios en el ciclo hidrológico regional y la alteración de las complejas interacciones planta-animal serían tan drásticos que impedirían que el bosque ya destruido se restaurase por sí mismo. Por tanto, algunos resultados referentes a diversos aspectos del modelo amazónico servirán como importantes elementos de partida para los modelos de cambio global que se están elaborando. Ese es uno de los aspectos del problema. Otro aspecto es la utilidad de los métodos isotópicos para determinar el cambio previsto y prepararse para él. Dos ejemplos son el uso de los isótopos de carbono y nitrógeno para estudiar los cambios en la materia orgánica del suelo y la determinación de las relaciones carbono 13/carbono 12 para identificar los genotipos de plantas que absorben el agua con eficacia, sobre todo, en los climas más secos que se pronostican para muchas regiones del mundo.