

Abstract

Following a basic model for biogeochemical cycling, the stores and transfers of N, P, K, Na, Ca, Mg, Mn, Fe and Al in the montane forest ecosystem of San Eusebio, Mérida, Venezuela, are presented. The input layer of the ecosystem is the forest canopy; the output layer was placed at 120 cm below soil surface. Mineral stores were analysed in the compartments vegetation, dead wood, litter and soil. Transport processes were registered through chemical analysis of litter and water. In order to characterise the dynamics of the ecosystem the parameters: 1) vegetation turnover, 2) input-output-ratio, 3) vegetation store – input-ratio and 4) vegetation store – turnover – ratio, were used.

Nitrogen and phosphorous show high organic reserves in the soil and a rapid turnover in the vegetation. Potassium is the minimum element showing a high vegetation turnover and almost equal input and output. Aluminum has an interesting cycling with very high reserves in exchangeable form in the soil.

Results are discussed in relation to the chemical input patterns into the ecosystem, vegetation physiology, climate and soil characteristics.

Introducción

El desarrollo de modelos matemáticos para interpretar la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, basándose en la cuantificación de las reservas acumuladas en los compartimentos y la expresión de los cambios con ecuaciones matemáticas, son el resultado de los nuevos conceptos de la ecología moderna. Los ciclos biogeoquímicos en ecosistemas han sido hasta ahora poco estudiados y, ello, en un grado de detalle muy diferente. Actualmente existe el consenso de que un estudio completo del ecosistema implica la evaluación de las reservas minerales y orgánicas y sus interrelaciones con la

atmósfera, pedósfera, litósfera e hidrósfera. Las reservas minerales y orgánicas del ecosistema forestal están acumuladas en la vegetación, los animales, la capa de mantillo y el suelo; los procesos de transferencia ocurren con los residuos animales, vegetales y el agua (1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 11, 14, 15). En artículos anteriores se han publicado los detalles de estudios al respecto conducidos en el ecosistema forestal montano de San Eusebio en los Andes Occidentales de Venezuela (3, 6, 7, 13).

Para la cuantificación de la dinámica y los procesos de cambio en los ecosistemas se han descrito en la literatura diferentes parámetros o relaciones matemáticas (1, 2, 5, 8, 14, 15).

– Índice de transformación en la vegetación (vegetation turnover), definido matemáticamente como la diferencia entre ingresos y egresos en el compartimento de la vegetación del ecosistema, expresada como masa en unidad de superficie y de tiempo (kg/ha y año). Las fuentes de ingreso o ganancia son las lluvias, deposición de partículas, la fijación de N en raíces y hojas. Las fuentes de pérdidas o egreso son la producción de residuos vegetales aéreos y radicales, la producción de madera muerta, el escurrimiento de los tallos y las hojas. Este

1/ Recibido para publicación el 20 de agosto de 1980. Los autores agradecen a la Sociedad Alemana de Investigaciones por el apoyo financiero para conducir los trabajos y a la Universidad de los Andes por el apoyo logístico.

* Instituto de Suelos y Nutrición Vegetales. Universidad de Göttingen, Alemania, D 3 400 Göttingen-Wende, Büsgenweg 2.

** Actualmente en Centro de Pesquisas Agropecuarias dos Tropicós Umidos. Belém, Brazil

parámetro es prácticamente equiparable a la absorción de elementos por la vegetación, suponiendo que el ecosistema se encuentra en su estado clímax, donde la producción es igual a la descomposición.

- Índice de ingreso - egreso del ecosistema (ecosystem input - output ratio), definido matemáticamente como el cociente entre la ganancia y pérdida de un elemento en el ecosistema:

$$\frac{\text{ingreso (kg/ha y año)}}{\text{egreso (kg/ha y año)}}$$

Valores > 1 implican una ganancia, valores < 1 implican una pérdida. Para la evaluación de este parámetro es necesario, a la vez, evaluar todas las fuentes de ingreso o ganancia (lluvia, deposición, fijación de N, meteorización de las rocas parentales de los suelos) y de egreso o pérdida (percolación, escurrimiento, volatilización, erosión, cosecha) del ecosistema

- Índice de ingreso - reserva en la vegetación (vegetation store - input ratio), definido matemáticamente como:

$$\frac{\text{reserva en la vegetación (kg/ha)}}{\text{ingreso en el ecosistema (kg/ha y año)}}$$

Esta relación implica los años necesarios para llenar la reserva encontrada en la vegetación en función del ingreso o ganancia atmosférica encontrada.

- Índice de reserva - transformación en la vegetación (vegetation store - turnover ratio), definido matemáticamente como:

$$\frac{\text{reserva en la vegetación (kg/ha)}}{\text{índice de transformación (kg/ha y año)}}$$

Esta relación implica los años necesarios para la renovación de la reserva mineral de la vegetación.

En función de un modelo básico para evaluar el ciclo biogeoquímico publicado anteriormente, se presentan en este artículo los detalles del ciclo de los elementos químicos N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Al y Na y los parámetros de su caracterización en el ecosistema forestal montano de San Eusebio en Venezuela.

Materiales y métodos

Sitio de los estudios

El estudio se realizó en el bosque "San Eusebio" de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universi-

dad de los Andes en Mérida, Venezuela, descritos en detalle en publicaciones anteriores (3, 6, 7, 13).

Cálculo de los índices característicos del ecosistema

Para el cálculo de los índices caracterizadores del ecosistema se utilizaron los valores de las reservas minerales [de 13 parcelas estudiadas, expresados como kg/ha (6)] y los procesos de transferencia con los residuos vegetales y con el agua, medidos durante un año, y expresados como kg/ha y año (3, 7).

La relación de la transformación en la vegetación (turnover) se calculó como la diferencia de ingresos y egresos de la vegetación del ecosistema. Como fuente de ingreso se consideró el aporte de elementos con las lluvias, medido en una parcela de tala rasa (30 pluviómetros). Como fuente de egresos se consideraron el escurrimiento foliar (30 pluviómetros) y el de tallos (4 parcelas), la producción de residuos vegetales aéreos (hojas, ramas, flores y frutos y epifitas en 3 parcelas con 36 recolectores), la producción de madera muerta y residuos radicales (con base en los datos de biomasa).

El índice ingreso-egreso del ecosistema (input-output ratio) se calculó según el aporte de las lluvias y pérdidas con el agua de percolación (placas lisimétricas a 90 cm de profundidad).

Para el cálculo de la relación ingreso-reserva vegetal (vegetation store-input ratio) se usaron igualmente los valores del aporte del agua de lluvia y la determinación de los elementos químicos en la fitomasa.

La relación entre la reserva vegetal y la transformación (vegetation store-turnover ratio) está basada igualmente en las cantidades de los elementos químicos en la biomasa de la vegetación y la tasa de transformación arriba indicadas.

Para la preparación de los modelos matemáticos se utilizaron los compartimentos de la vegetación, la capa de mantillo, el suelo y los procesos de translocación de elementos químicos arriba indicados.

Resultados y discusión

Relación de transformación en la vegetación (vegetation turnover)

Los valores encontrados se encuentran en detalle en el Cuadro 1. Por ser la vegetación un sistema cerrado dentro del ecosistema, debe compensarse la diferencia entre las ganancias y pérdidas a través de la absorción de elementos químicos a partir del suelo. Esta premisa es válida para todos los elementos qui-

Cuadro 1: Ingreso y egreso de elementos químicos en el compartimento de la vegetación y su "turnover" en comparación con otros ecosistemas forestales tropicales (kg/ha y año).

	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Al	Na
San Eusebio									
Ingresos									
Lluvia	9.9	1.1	2.6	5.6	5.23	0.90	0.23	2.43	3.26
Egresos									
Residuos vegetales aéreos	69.1	3.99	33.1	43.1	14.38	0.80	3.71	9.34	0.27
raíces	89.3	5.36	33.0	61.3	14.10	14.80	2.09	33.10	1.03
Madera muerta	11.8	0.72	5.8	17.5	3.02	0.25	0.86	1.31	0.15
Escurrecimiento foliar	8.5	1.38	69.7	6.9	3.34	0.47	0.24	2.26	4.39
Escurrecimiento de tallos	0.1	0.02	1.0	0.1	0.04	0.02	trazas	0.03	0.03
Suma	178.8	11.47	142.6	128.9	34.88	16.34	6.90	46.04	5.87
"Turnover"	168.9	10.37	140.0	123.3	29.65	15.44	6.67	43.61	2.61
El Verde, Pto. Rico (11)									
	220	-	-	10.0	-	-	-	-	-
Sta. Fé, Panamá (5)									
	-	9.0	-	251	25	-	-	-	-
Costa Marfil (1)									
	210	11.5	-	-	-	-	-	-	-
Kade (10)									
	235	13.6	278.0	298	59	-	-	-	-

micos estudiados, a excepción del nitrógeno. Como fuentes adicionales de ingreso de N en la vegetación deben considerarse la fijación de N en las raíces y hojas (4, 12); estos procesos no fueron estudiados en detalle; sin embargo, vale indicar que dentro de las especies encontradas no existen leguminosas y por otro lado otros autores han demostrado que en los nódulos radicales encontrados en el Pino laso (*Podocarpus respigiosii*) no se produce fijación de N (4).

La validez de los resultados está sujeta a que la vegetación se encuentre en su grado clímax o sea que la producción sea equiparable a la descomposición (catabolismo = anabolismo); una acumulación en la vegetación (crecimiento y retención) implicaría una corrección de los valores. Esta premisa se puede aceptar con base en que se trata de bosques primarios seniles desde que se conoce la historia.

Los elementos N, K y Ca alcanzaron valores altos de "turnover", Mg y Al los tuvieron medianos y para P, Mn y Na se encontraron los valores más bajos. Las tendencias encontradas generalmente se han constatado en otros ecosistemas, cuyos valores, sin embargo, no son siempre equivalentes, ya que el estudio de los procesos difiere en su grado de intensidad y casi no se conocen datos sobre la producción de madera muerta y residuos radicales. Además los valores del egreso con el agua se han obtenido con diferentes métodos. Los valores de los estudios en Sta. Fé, Panamá (5), y El Verde en Puerto Rico (11), así como en la Costa de Marfil (1) y Ghana (10) se han incluido en el Cua-

dro 1. La tendencia de la movilidad de los elementos químicos se puede generalizar con un grado de renovación alto para el N (170 a 235 kg/ha y año), medio para K, Ca y Mg, y bajo para el P (10 a 14 kg/ha y año). Los valores encontrados para el Fe en San Eusebio aparentemente son erróneos, ya que el valor del egreso con los residuos radicales es muy alto y seguramente se debe a una contaminación de las pruebas.

Coefficiente ingreso-egreso del ecosistema (input-output ratio)

Los valores encontrados en este estudio en San Eusebio se han sumariado comparativamente con los de Sta. Fé, Panamá, y El Verde, Puerto Rico (5, 11, 15) en el Cuadro 2. Por ser en San Eusebio los ingresos con las lluvias siempre más altos que los egresos, con el agua de percolación resultan valores del coeficiente > 1; ello implica que se produce siempre una ganancia o acumulación de los elementos químicos en el ecosistema. Para los elementos estudiados en los otros ecosistemas se ha encontrado generalmente una pérdida en el ecosistema, a excepción del Mg en El Verde (15) y P, Mn y Na en Sta. Fé (5). En este caso debe suponerse una compensación de las pérdidas con la meteorización paulatina de las rocas parentales de los suelos, sin embargo, éste es un proceso cuya cuantificación es casi imposible, especialmente en períodos relativamente cortos.

Los valores netos de ganancia anual de los elementos químicos se pueden calcular con base en los datos

del Cuadro 2. Las mayores acumulaciones se producen para Mg y Ca. Como fuente de origen para estos elementos se consideran los polvos y aerosoles de la erosión del suelo en la zona desértica al norte del área en estudio (13). Para el N se encontró una acumulación anual de 4.0 kg/ha y año; como fuente de producción de N en la atmósfera se consideran las tormentas y la quema de gases excesivos en la extracción del petróleo en la región del lago Maracaibo.

Relación reserva en la vegetación-ingreso (vegetation store input-output)

Los valores de las reservas minerales en la vegetación y los del ingreso correspondientes utilizados para el cálculo de la relación en el estudio de San Eusebio están sumariados en el Cuadro 3; igualmente, aquí

se presentan los valores respectivos calculados en función de los valores publicados por otros autores para ecosistemas forestales tropicales (5, 11, 15). El tiempo necesario para renovar las reservas minerales de la vegetación del bosque de San Eusebio, a partir de la descarga atmosférica con las lluvias, es sorprendentemente corto a excepción del potasio (565 años). El valor encontrado para el nitrógeno (112 años) es sorprendentemente comparable con los valores del ecosistema de El Verde y Kade, ya que el rango de deposición de N es muy variable en áreas tropicales.

El valor encontrado para el fósforo (66 años) es relativamente corto, una interpretación de este resultado es muy crítica ya que la contaminación de las muestras de agua de lluvia con insectos y restos vegetales es frecuente y casi imposible de controlar.

Cuadro 2: Ingreso y egreso de elementos químicos en el ecosistema (kg/ha y año) y su relación.

	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Al	Na
San Eusebio									
Ingreso	9.1	1.1	2.6	5.56	5.20	0.90	0.23	2.40	3.26
Egreso	5.1	0.26	2.2	1.60	0.60	0.26	0.09	1.00	1.30
Relación	1.78	4.23	1.18	3.48	8.67	3.46	2.56	2.40	1.79
El Verde (11)	0.30	0.72	—	0.77	1.45	—	—	—	—
Sta. Fé (5)	—	1.43	1.02	0.18	0.11	0.30	1.43	—	1.54

Cuadro 3: Reserva de elementos químicos en la vegetación y otros compartimentos (kg/ha), el ingreso atmosférico (kg/ha y año) y la relación entre reserva vegetal e "input".

	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Al	Na
San Eusebio									
Reserva vegetación	1 107	66	1 469	899	254	74	42.5	189	15
M. Muerta	58	3.5	28	86	15	1.2	4.2	6.4	0.7
Mantillo	583	29.2	59	216	55	192	14.8	245	7.2
Suelo (0-120 cm)	27 197	6 424	934	1 859	449	203	217	17 217	188
Ingreso	9.9	1	2.6	5.6	5.2	0.9	0.2	0.2	3.3
Relación reserva vegetal - ingreso									
San Eusebio	112	66	565	161	49	82	183	79	4.5
El Verde (11)	123	—	—	—	9.6	—	—	—	—
Sta. Fé (5)	—	394	368	192	127	—	—	—	—
Kade (10)	112	252	44	154	26	—	—	—	—

La tasa de renovación encontrada para el Na (4.5 años) no es un valor realista, si bien los ingresos con las lluvias son altos por la relativa cercanía de la costa del mar del Caribe (aprox. 200 km), la absorción de este elemento por las plantas no es selectiva pues el Na no es esencial para su desarrollo.

La utilización e interpretación de la relación vegetación-ingreso es, del punto ecológico de la regeneración y sucesión natural de los ecosistemas, de gran importancia. La regeneración de una vegetación forestal secundaria, después de la pérdida del bosque a causa de su utilización por el hombre o por catástrofes naturales, depende de las características del suelo y la disponibilidad de elementos nutritivos y de los ingresos atmosféricos con las lluvias. Los lapsos encontrados para "San Eusebio" son favorables. La repercusión y la tala del bosque deben verse desde otro punto de vista: en la región montañosa de los Andes existen suficientes ejemplos de los efectos catastróficos de la erosión de los suelos después de la desaparición de la cubierta vegetal.

Relación reserva-tasa de transformación en la vegetación (vegetation store-turnover ratio)

Los valores encontrados para esta relación en San Eusebio y otros ecosistemas forestales tropicales para los elementos nutritivos N, P, K, Ca y Mg se presentan en el Cuadro 4. Los resultados encontrados para los diferentes elementos químicos en los pocos lugares donde se han conducido estudios, son bastante similares. El lapso para que los elementos inicien un nuevo ciclo en el ecosistema de San Eusebio oscila entre 6 (P) y 11 años (K). Los valores para el nitrógeno son sorprendentemente similares en los ecosistemas estudiados, variando entre 5.6 y 6.7 años.

La interpretación de este índice es de interés desde el punto ecológico de la renovación y repetición natural de los ecosistemas. Una premisa de su utilización está ligada a bosques siempre verdes; la caducifolia implica que con la pérdida (generalmente anual) de las hojas se acorta su vida y así se acelera el ciclo de renovación de los elementos nutritivos. El índice en discusión está relacionado indirectamente con la tasa de descomposición de los residuos vegetales en el suelo; cuanto mayor sea la velocidad de este proceso, tanto más rápido se liberan los elementos y pueden ser absorbidos nuevamente por las plantas.

Modelos de los ciclos biogeoquímicos

Para el análisis del ecosistema es necesario determinar los compartimentos y los límites entre ellos; ello implica que tanto en el campo, en las mediciones, como en el modelo existe una definición exacta.

En el estudio realizado se considera como límite superior del ecosistema la superficie de los árboles más altos del rodal, determinándose así la superficie de los ingresos atmosféricos en el ecosistema. Aquí se encuentra una equivalencia con otros estudios (5, 11). Como límite inferior del ecosistema se considera la profundidad de raíces observadas, distribuidas intensivamente hasta 60 cm y extensivamente hasta los 120 cm. Este límite importante para determinar los egresos del ecosistema difiere mucho entre los diferentes estudios realizados, dependiendo de las metas de los estudios, de la estructura del suelo, la distribución de raíces, etc.; algunos autores incluso analizan los egresos del suelo no directamente dentro del ecosistema sino en las cuencas hidrográficas respectivas. Los límites laterales del ecosistema no están definidos, ya que se supone que el transporte lateral se compensa con ingresos y egresos laterales equiparables.

Como compartimentos del ecosistema se consideran el bosque o la vegetación, la capa de mantillo y el suelo mineral. La decisión de los límites de estos dos últimos no es problemática; en la capa de mantillo se observan en forma clara los horizontes de los residuos recientes (L), en descomposición (F) y transformados en materiales húmicos (H): en el suelo mineral se consideraron las capas 0-20; 20-40; 40-60; 60-90 y 90-120 cm. En el compartimento del "bosque" se consideran todos los componentes de la vegetación, aunque aquí se pueden también diferenciar compartimentos más detallados (6). Como un compartimento *sui generis* para el ecosistema estudiado se considera la madera muerta por su abundancia, además entre el momento de la muerte de los árboles y su proceso de descomposición no existen límites definidos.

Los componentes dinámicos del ecosistema están unidos a los medios de transporte de los elementos químicos. En la parte izquierda (Figura 1, 2) del modelo se consideran los procesos de transferencia con los residuos vegetales, en la derecha las transferencias con el agua. En el modelo no se consideran transportes de materiales sólidos (polvos, materiales de erosión) ya que ellos son translocados y medidos con el agua. No se midieron transportes de gases, sólo en el caso del N se suponen fuentes de ganancia o pérdida en esta forma.

Los procesos de crecimiento y retención de elementos químicos en el ecosistema tampoco se estudiaron en detalle, pues se considera que el bosque se encuentra en su estado clímax (steady state); esta simplificación es válida en función del bosque primario senil encontrado; esta decisión ahorra, por otro lado, las mediciones complicadas y a corto plazo inexactas del desarrollo del rodal, la flora edáfica y especialmente de las raíces finas en el suelo.

Una limitación notable en el estudio realizado es la falta de la cuantificación de los elementos químicos y los procesos de transporte con la macro- y microfauna del ecosistema. Estos aspectos han sido hasta ahora poco estudiados (5, 9, 15), una integración total de los aspectos a estudiar es difícil, y casi imposible.

Nitrógeno

El modelo del nitrógeno se presenta en detalle en la Figura 1. De las reservas totales del ecosistema sólo se encuentra el 4% en la vegetación. La reserva en la capa de mantillo y especialmente en el suelo mineral es bastante elevada, incluso a profundidades de más de 60 cm. Como fue discutido en otro artículo (6), la acumulación de materia orgánica, y con ella del nitrógeno, es elevada, en los suelos de la región del estudio, alcanzando valores de 5.5% C (0.45% N) y es *sui generis* de los suelos montanos. Ello es explicable por la localización de la zona y las interacciones entre el clima y el suelo; con el aumento de la altura se regulan favorablemente los procesos de producción y descomposición de la materia orgánica, resultando su acumulación y así la del nitrógeno. La importante reserva del N en el suelo implica una estabilidad del ecosistema, especialmente al pensar en la utilización o destrucción de la vegetación por el hombre o por catástrofes naturales.

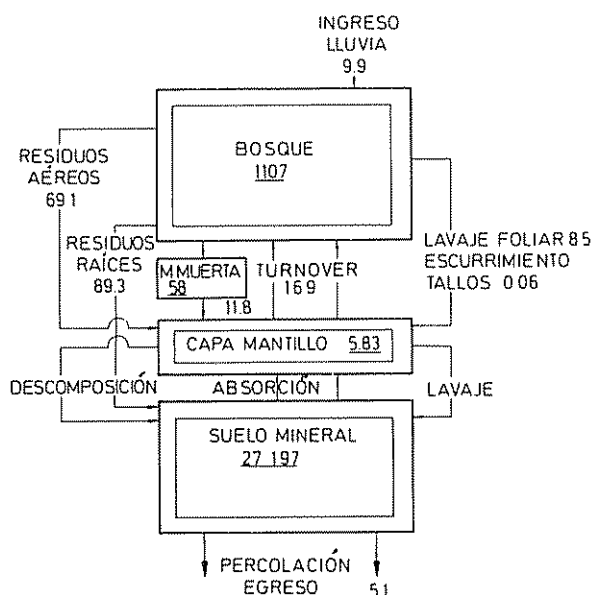


Fig. 1. Modelo del ciclo del nitrógeno en el ecosistema forestal de San Eusebio (Dimensiones: compartimentos kg/ha, transferencias kg/ha y año).

El proceso de "turnover" del N en la vegetación es bastante alto, aunque comparable a los otros estudios realizados en áreas tropicales. Aquí se debe mencionar nuevamente que este valor depende o puede estar influido por la posible fijación de N desde la atmósfera (4, 12). La tasa de renovación del N en el ecosistema es de sólo 6.5 años. En función del ingreso anual registrado (9.9 kg/ha y año) se puede llenar la reserva encontrada en la vegetación en 112 años. Las pérdidas de N del ecosistema son más bajas que las ganancias, y estos resultados son regulados seguramente por los valores bajos de pH del suelo (pH 3.5 - 4.0), las temperaturas reinantes (en 5 cm de profundidad siempre $< 12^{\circ}\text{C}$) y con ello el proceso de nitrificación con velocidad reducida. No se midieron pérdidas gaseosas de N; ellas son factibles en las épocas de mayor pluviosidad cuando en el subsuelo resultan condiciones anaeróbicas.

Fósforo

Las reservas del P son bastante altas y se encuentran acumuladas en casi su totalidad (99%) en el suelo. La vegetación acumula, sin embargo, suficiente P para lograr una dinámica adecuada con un "turnover" del 10% de la reserva y una tasa de renovación de 66 años, aunque como se ha indicado, los valores del ingreso pueden haber sido influidos por contaminación. Las reservas en el suelo dependen notoriamente de las condiciones del sitio forestal (6), disminuyendo con el grado de hidromorfismo. Por otro lado, es importante indicar que las reservas de P en el suelo, si bien disminuyen con la profundidad del mismo, están gobernadas especialmente por el pH (distribución de fosfatos de calcio, aluminio y hierro) y las concreciones de Fe y Mn (fosfatos ocluidos).

Potasio, calcio y magnesio

Al utilizar el modelo básico del ciclo de los elementos químicos presentado para el N y con los valores sumarizados en los Cuadros 1 y 4, se pueden construir los modelos de los otros elementos en estudio. Para los elementos nutritivos K, Ca y Mg se estudiaron las reservas en el suelo en forma cambiante; las reservas totales son desconocidas, y de menor interés.

Las reservas de K en la vegetación alcanzan un valor más alto que en el suelo, resultando así el elemento limitante de la estabilidad del ecosistema, especialmente al pensar en una utilización o destrucción de la vegetación; la sucesión natural forestal dependerá notablemente del K. Esta situación se agrava al encontrar que la relación entre la reserva (1 469 kg/ha) y el ingreso (2.6 kg/ha y año) es muy elevada, necesiándose 565 años para su recuperación. En el

Cuadro 4: Índice de reserva – “turnover” en la vegetación de diferentes ecosistemas forestales tropicales.

	N	P	K	Ca	Mg
San Eusebio	6.55	6.36	10.5	7.35	8.5
El Verde (11)	5.59	—	—	—	—
Sta. Fé (5)	—	42.0	—	22.4	24.6
Costa Marfil (1)	6.67	—	—	—	—
Kade (10)	6.67	9.6	2.8	6.6	4.3

“turnover” participa en forma notable el escurrimiento foliar. Los valores de ganancia y pérdida del ecosistema son casi comparables, resultando un estado estático (steady state) del K en el ecosistema.

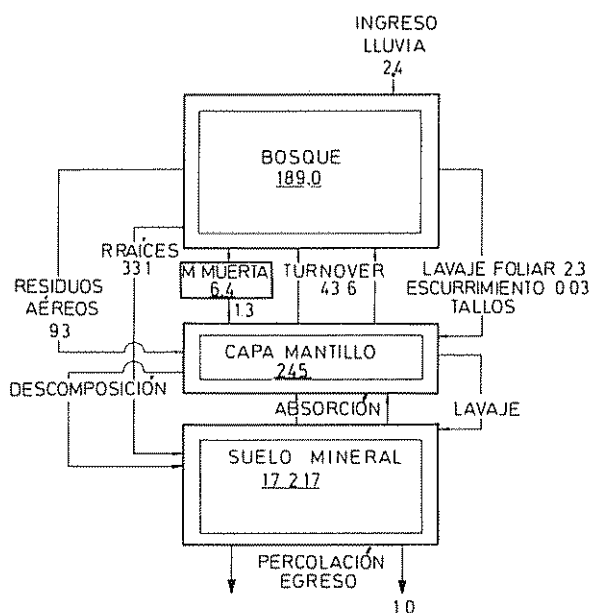
Las reservas de Ca y Mg en la vegetación alcanzan el 29 y 33 por ciento del total del ecosistema respectivamente. La dinámica de estos elementos, especialmente su ingreso anual, asegura su ciclo tanto en el ecosistema actual como en fases de regeneración de la vegetación natural.

Aluminio

Los valores para el modelo matemático de los otros elementos estudiados se pueden observar en el Cuadro 3. Aquí resulta de notable interés el modelo del aluminio, presentado igualmente por separado en la Figura 2. Con 17 200 kg/ha en 120 cm el Al al-

canza la mayor reserva (82%) de los elementos acumulados en el complejo de intercambio catiónico del suelo. Ello se debe, sin duda, a la fuerte acidez del suelo (pH entre 3.5 y 4.0 en toda la profundidad estudiada) (4). Así, este elemento juega un papel importante dentro del ecosistema, lo cual implica un empobrecimiento de las bases y una estabilidad del complejo orgánico-mineral del suelo (enlaces entre Al y ácidos húmicos).

El ciclo del Al es igualmente interesante desde el punto de vista de los procesos de transferencia de este elemento no nutritivo para las plantas. Las aguas de lluvia tienen una concentración promedio de 0.157 mg Al/l, alcanzándose un ingreso de 2.4 kg/ha y año; como fuentes de origen se consideran la industria petroquímica y la erosión del suelo (13). Dentro del rodal, inclusive aumenta la concentración de Al a 0.19 mg/l y alcanza su mayor concentración después de pasar la capa de mantillo a 20 cm de profundidad del suelo (1.65 mg/l). En 90 cm de profundidad se determinó una concentración de 0.18 mg/l, resultando así un egreso de 1 kg/ha y año. Este comportamiento indica que el Al es absorbido en forma pasiva por las plantas, es excretado parcialmente por las hojas, participa dentro de los procesos de descomposición de los residuos vegetales, es movible en el suelo y retenido específicamente en el subsuelo, seguramente en el complejo de intercambio catiónico o asociado a algún quelato. Estos aspectos son de gran importancia para estudios futuros del funcionamiento de los ecosistemas en suelos ácidos.



Resumen

En función de un modelo básico para evaluar el ciclo biogeoquímico se presentan los detalles del ciclo de los elementos químicos N, P, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Al y Na para el ecosistema forestal montano de San Eusebio en Venezuela.

Como límite superior del ecosistema – línea de ingresos – se considera la atmósfera, como límite inferior – línea de egresos – la capa de percolación

Fig. 2. Modelo del ciclo del aluminio en el ecosistema forestal de San Eusebio (Dimensiones: compartimentos kg/ha, transferencias kg/ha y año).

del suelo a 120 cm de profundidad. Las reservas minerales fueron determinadas en los compartimentos vegetación, madera muerta, capa de mantillo y suelo mineral. Los procesos de transporte medidos están asociados a la producción de residuos vegetales aéreos, radicales y leña muerta y con el agua que pasa a través del ecosistema.

Para describir la dinámica del ecosistema se utilizaron los parámetros:

- índice de transformación en la vegetación
- índice de ingresos — egresos en el ecosistema
- índice ingresos — reserva en la vegetación
- índice reserva — transformación en la vegetación.

Los elementos nitrógeno y fósforo se caracterizan por grandes reservas orgánicas en el suelo y una dinámica elevada. El potasio es el elemento determinante de la capacidad de regeneración del ecosistema, lo siguen el magnesio y el calcio. El aluminio presenta un ciclo muy importante en el ecosistema, por estar enlazado a las grandes reservas en el suelo, en forma cambiante. Los resultados se discuten en relación con las fuentes de ingreso de los elementos, el clima de la región y las características ácidas del suelo.

Literatura citada

1. BERNHARD—REVERSAT, F.: Etude de la litière et de sa contribution au cycle des éléments minéraux en forêt ombrofile. *Oecologia Plantarum* 5:247-266. 1970.
2. ELLENBERG, H. Integrated experimental ecology. 214 p., Berlin, Springer Verlag.
3. FASSBENDER, H. W. y GRIMM, U. Ciclos biogeoquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. II. Producción y descomposición de residuos vegetales. *Turrialba* 31(1):39-47. 1981.
4. FURMAN, T. E. The nodular mycorrhizae of *Podocarpus rospigliosii*. *American Journal of Botany* 57(8):910-915. 1970.
5. GOLLEY, F. B. *et al.* Mineral cycling in a tropical moist forest system. University of Georgia Press, Athens. 1975. 245 p.
6. GRIMM, U. Y FASSBENDER, H. W. Ciclos biogeoquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. I. Inventario de las reservas orgánicas y minerales (N, P, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Al, Na). *Turrialba* 31(1):27-37. 1981.
7. GRIMM, U. y FASSBENDER, H. W. Ciclos biogeoquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. III. Ciclo hidrológico. *Turrialba*. Vol. 31(2):89-99. 1981.
8. JORDAN, C. F. y KLINE, J. R. Mineral cycling: Some basic concepts and their application in a tropical rain forest. *Annual Review of Ecology and Systematics* 3:33-50. 1972.
9. KLINGE, H. Bilanzierung von Hauptnährstoffen im Ökosystem eines tropischen Regenwaldes in Manáos. *Biogeographica* 7:59-77. 1977.
10. NYE, P. H. The relative importance of fallows and soils in storing plant nutrients in Ghana. *J. West Afr. Science Association* 4:31-60. 1958.
11. ODUM, H. T. y PIGEON, R. F. A tropical rain forest. U. S. Atomic Energy Commission, Washington D. C. 1970. s.p.
12. RUINEN, J. Occurrence of *Beijerinckia* sp. in the "phyllosphere". *Nature* 177:220-221. 1956.
13. STEINHARDT, U. y FASSBENDER, H. W. Características y composición química de las lluvias de los Andes Occidentales de Venezuela. *Turrialba* 29:175-182. 1979.
14. ULRICH, B. *et al.* Input, Output und interner Umsatz von chemischen Elementen bei einem Buche- und bei einem Fichtenbestand. *Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie, Göttingen*. 17-28. 1976.
15. UNESCO. Tropical forest ecosystems. Paris. 683 p. 1978.