

## Indicadores eficientes de salud edáfica

\*JERSON GARITA-CAMBRONERO<sup>1,3</sup>, ADRIANA DUARTE-MADRIGAL<sup>4</sup> y AXEL P. RETANA-SALAZAR<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Escuela de Biología, Universidad de Costa Rica, 2060.*

<sup>2</sup> *Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA), Universidad de Costa Rica, 2060.*

<sup>3</sup> *Centro de Investigación en Biología Celular y Molecular (CIBCM), Universidad de Costa Rica, 2060, San Pedro, San José, Costa Rica.*

<sup>4</sup> *Facultad de Microbiología, Universidad de Costa Rica, 2060*

---

**RESUMEN:** En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en campo al comparar dos sistemas edáficos. Uno de ellos con exposición a agroquímicos y otro en una reserva forestal urbana libre de contaminantes agrícolas. Los resultados se asemejan a algunos obtenidos en Norte América y Japón, pero difieren de los datos de Europa. Estos datos se utilizan como otra muestra para desarrollar la generalización del patrón de las comunidades edáficas, para obtener un resultado más universal. Se utiliza la teoría entrópica para la cuantificación de los factores bióticos de la comunidad. Se discute el uso de gremios funcionales como posibles bioindicadores de salud edáfica, con este fin se propone el uso del flujo energético entre niveles tróficos y la abundancia de taxa. Se propone la modificación de las fórmulas de Brooks y Wiley para la descripción de factores entrópicos de las comunidades para obtener el valor entrópico de los gremios funcionales.

**PALABRAS CLAVE:** gremios funcionales, Collembola, entropía, nivel trófico, salud edáfica

**ABSTRACT:** In this paper we compare two types of soil, one affected by the agrochemicals use, and the other one was a free-pollution urban forest reserve. The results were similar to some studies in North America and Japan, but they were different to the data obtained in Europe. Also the data were used for the formulation of a generalized pattern in the soil communities. The biotic factors of the community were quantified using the entropic theory. We discussed the possible use of the functional-guild as soil-health bioindicators and we proposed the use of the energy flux and the abundance of the taxa to determinate this. Some variants to the Brooks and Wiley equations used in the description of the entropic factors into the communities were made to obtain the value of the entropy for the functional-guild estimations.

**KEY WORDS:** functional-guild, Collembola, entropy, trophic level, soil health

---

### INTRODUCCIÓN

Gisin (1943) postula que los colémbolos son artrópodos primitivos. Esta posición fue respaldada por otros autores que consideraron el hábito edáfico como una consecuencia de su ancestría, ya que muchos de los grupos de artrópodos menos derivados son animales de

suelo. De una forma más acertada otros autores han propuesto que la conquista del medio edáfico en realidad corresponde a una derivación del grupo (Christensen 1964).

Estas dos vertientes opuestas en interpretación, se convierten en un factor excelente de discusión académica, sin embargo, al conjuntar las investigaciones aplicadas de los colémbolos

como bioindicadores de salud edáfica desarrolladas en los últimos 30 años de estudios (van Straalen 1997), podemos obtener extrapolaciones de valor interpretativo en evolución.

Los grupos que manifiestan sensibilidad como indicadores de salud ecológica, tales como los efemerópteros, los tricópteros y los odonatos, suelen considerarse grupos ancestrales con respecto a sus adelfotaxa, sin embargo es importante señalar que las adaptaciones finas a medios de vida especializados son en realidad derivaciones importantes de los grupos que las exhiben y es esto lo que hace que sirvan de bioindicadores ya que los patrones básicos presentados por los ancestros se ven fuertemente modificados en muchos casos, proporcionando un ajuste fino al medio en que se desarrollan, por lo que cualquier modificación puede perturbar su existencia y en consecuencia esa sensibilidad es la que consideraremos para nuestro beneficio. En el caso inverso, la argumentación es la misma, ya que una especie que ha logrado modificar su plan básico para sobrevivir en medios contaminados manifiesta una respuesta adaptativa al cambio del medio que la convierte en un bioindicador.

Los diferentes taxa manifiestan una ecología particular por dos factores (Brooks & Wiley 1986):

- 1- esta ecología es la misma que la ecología de sus ancestros o
- 2- esta ecología es una versión modificada de la ecología ancestral

En forma pionera se está efectuando investigación a gran escala de la importancia de los colémbolos como indicadores de salud edáfica en los trópicos. Nuestros primeros resultados no se ajustan en su totalidad a los obtenidos en estudios similares en Europa (Kanal 2004), pero si ha sido posible establecer una relación directa entre los factores bióticos

y abióticos que indican la perturbación del suelo, de donde se desprende un nuevo índice para cuantificar la salud del suelo.

## MATERIALES Y MÉTODO

Se tomaron muestras en dos tipos de suelo en el área metropolitana de San José, Costa Rica entre las fechas 13-IV-2002 al 20-V-2002, para obtener muestras de ambas estaciones, como representante de un suelo no alterado se escogió la Reserva Forestal Leonel Oviedo, Escuela de Biología, Universidad de Costa Rica debido a que durante más de tres décadas a sido un sistema protegido y en ausencia absoluta de aplicaciones de químicos que afecten el suelo. Como representante de un suelo alterado se utilizó el Vivero "La Bonita", San José, en el cual las aplicaciones de químicos sobre el suelo y plantas son semanales, con rotaciones clásicas de control químico.

Se efectuaron 12 muestreos en cada sitio que indicaran la variación por sitio y por semana. Se tomaron muestras aleatorias simples con un volumen de suelo en cada caso de 2000 cm<sup>3</sup>, con un barreno de dimensiones 20x20x5 cm. El tamaño de la muestra se estimó a través de la construcción de la curva de especies de colémbolos (Southwood 1978). La muestra se tomó hasta una profundidad de 5 cm en el suelo debido a que es la zona de mayor riqueza de colémbolos (Gupta & Yeates 1997). Se utilizó los parámetros de descripción de la comunidad en función de la entropía adaptados a los gremios funcionales (Brooks & Wiley 1986), y el índice de riqueza de especies adaptado a altos taxa (Gupta & Yeates 1997).

Las muestras en cada caso se dejaron en reposo durante 24 horas, para aminorar el efecto temporalmente negativo que la toma de la muestra pueda causar sobre la vitalidad de los microartropodos.

La extracción de los microartópodos se realizó en el Museo de Insectos de la Universidad de

Costa Rica, mediante el uso de embudos de Berlese-Tullgren (Mound & Marullo 1996, Southwood 1978). Las muestras se expusieron durante 96 horas a una temperatura de 30° C, con bombillos de 60 V, mantenidos a la mitad de la potencia y colocados a 25 cm de la superficie de la muestra, mantenidas en un cuarto cerrado. Los especímenes se recolectaron en recipientes colocados en la boca distal del embudo, provistos con alcohol 70%.

Los especímenes se separaron inicialmente mediante el uso de estereoscopio y fueron colocados en viales de 3 dracmas con la debida rotulación. Se montaron los especímenes en láminas fijas en medio de montaje para la posterior identificación al microscopio (Mound & Marullo 1996).

Los datos obtenidos se analizaron mediante pruebas de bondad de ajuste que determinan los valores probabilísticos críticos de significancia. Se utilizaron los estadísticos entrópicos para comunidades y poblaciones determinados por Brooks y Wiley (1986), para determinar los flujos energéticos teóricos.

Los resultados obtenidos fueron demostrados matemáticamente y corroborados con los datos publicados por Gupta y Yates (1997) para Alemania, Japón y Australia, validando la metodología, matemáticamente demostrada.

## RESULTADOS DE CAMPO

Una tabla de contingencia para las familias en común determina que existen diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en la abundancia real de ambas familias en ambos tratamientos.

La misma prueba estadística aplicada al total de especímenes recolectados de ambas familias demuestra que hay una diferencia significativa aún mayor ( $p < 0,001$ ), por su parte una comparación entre el número de taxa hallados en cada tipo de suelo no evidencia diferencias, sin embargo el índice de riqueza de taxa indica con claridad que el sitio de suelo no perturbado ( $SR=1,33$ ) es mucho más rico que el suelo perturbado ( $SR=0,49$ ), ya que el suelo disturbado evidencia tan solo un 36,84% de los taxa presentes en el suelo no disturbado.

Esto determina que la diferencia en cuanto a flujo de energía en este caso particular entre el suelo no disturbado y el disturbado es de un 12,5%. Esto puede parecer despreciable, sin embargo si se toma en cuenta que de un nivel trófico a otro la energía útil que pasa es en promedio teórico de un 10%, entonces, el suelo disturbado está perdiendo una cantidad de energía superior a la necesaria para sostener un nivel de la pirámide trófica.

**Cuadro 1:** Familias de Collembola y número de individuos hallados en un suelo no disturbado y un suelo perturbado de la Meseta Central de Costa Rica. San José, Costa Rica. Reserva Biológica Leonel Oviedo, Universidad de Costa Rica.

Familias	Número de individuos en suelo no perturbado	Número de individuos en suelo perturbado
Neanuridae	446	73
Entomobryidae	362	36
Hypogastruridae	143	-
Isotomidae	33	-
Onychiuridae	10	-
Total de individuos	994	109

## DESARROLLO TEÓRICO

En forma teórica sabemos que un sistema con mayor número de especies es más entrópico que uno con bajo número de especies, sin embargo esto se ve afectado por el número de individuos de cada especie (Brooks & Wiley 1986).

**Cuadro 2:** Valores calculados para los estadísticos entrópicos del gremio de los colémbolos para un suelo sin disturbio y otro disturbado. San José. Costa Rica.

Estadísticos suelo no disturbado	Estadísticos suelo disturbado
H=0,48	H=0,42
E=0,0168	E=0,0136
Q <sub>E</sub> =0,983	Q <sub>E</sub> =0,986

Nuestra primer inquietud práctica era cual sería el comportamiento de la entropía pero no en la comunidad como lo proponen Brooks y Wiley (1986) sino en un gremio (o sección funcional de la comunidad). En este caso debemos asumir que la relación de las especies del gremio con el medio circundante será equienergética, ya que al pertenecer todas las especies al mismo sistema de relación con el medio sus relaciones internas serán nulas y la única que aportará energía será el medio a las especies y estas al siguiente escalón de la pirámide en el sistema.

Si se tienen  $n$  poblaciones suponemos que interactúan todas por igual con el medio ya que al pertenecer todas al mismo nivel trófico, todas obtendrán del medio la misma proporción energética, de tal forma que lo único que puede alterar la cantidad de energía obtenida es el número de individuos en cada población, siendo que obtendrán más energía del medio aquellas que manifiesten un mayor índice reproductivo, con lo que la entropía se convierte en un escalar del crecimiento de la población (Demetrius 2000).

Se determina que cuando el nivel de energía es una proporción constante, entonces la entropía mantiene una proporcionalidad directa con él, así la proporción de individuos por especie,

siendo el flujo energético una constante, entonces permite suponer la variación de la proporción de individuos de la especie con respecto a un flujo de energía sin alterar la proporcionalidad de los datos reales.

Esta inferencia tiene los siguientes efectos:

a) altera el estimador de desorden comunitario, convirtiéndolo en máximo desorden, en consecuencia el estimador de orden es nulo;

b) el indicador comunitario de estabilidad no se ve afectado, ya que la constante teórica de flujo de energía afecta todos los miembros de la ecuación sin alterar el factor general;

c) se ve afectado ligeramente el factor individual de estabilidad.

### Entropía y estructura de la comunidad:

Brooks y Wiley (1986) definen utilizando los parámetros de Pimm (1982) una serie de descriptores de las comunidades que logran unificar criterios como la diversidad con el flujo de energía entre las poblaciones de la comunidad. Esto le da una nueva perspectiva al asunto de la diversidad porque si bien es cierto que la diversidad puede ser engañosa en términos de definir comunidades y sistemas ecológicos, existen parámetros importantes medidos a través de ella.

Lo principal es la determinación de la estructura taxonómica de la comunidad que nos permite establecer cambios cualitativos en la comunidad, pero aunado a esto es importante medir algunos parámetros que describan la comunidad en estudio. Los parámetros que incluyen sistemas energéticos son mejores desde el punto de vista de la información que nos proporcionan, la cual no es tan solo descriptiva, sino que nos permite cuantificar la

cantidad de energía utilizada por cada descriptor de la comunidad.

En forma teórica sabemos que la entropía de la comunidad se ve alterada por factores como el número de especies que la constituyen, el número de individuos por especie la cantidad de interacciones entre los grupos funcionales (gremios funcionales) de la comunidad.

Lo idóneo es trabajar a nivel de especies, sin embargo aquí hemos trabajado a nivel de familias, que es uno de los taxa de más corriente manejo, con el fin de poder probar que los grandes taxa pueden arrojar información valiosa a nivel ambiental, con lo que se hace más accesible el uso del grupo como indicador. El uso de niveles específicos en nuestras latitudes se convierte en un problema doble porque la mayor parte de las especies halladas son nuevas, en consecuencia se desconoce su biología lo que las inhabilita para ser utilizadas como indicadores, el otro inconveniente es que las poblaciones de microartrópodos del suelo se están comportando como indicadores en su composición global, y sobre todo su diversidad (van Straalen 1997), esto se complementa con los datos de Monge-Nájera et al. (2000), que establece después de más de 20 años de investigación en líquenes que en el neotrópico el factor determinante de estos organismos como indicadores es su composición de especies, más que la determinación de especies particulares.

Debemos aclarar antes de continuar que los colémbolos como tales, o al menos los que se utilizan en este tipo de estudios no constituyen una comunidad, y su consideración ecológica de esta forma sería un error de magnitud sorprendente, que podría traer consecuencias nefastas en la interpretación ecológica de la funcionalidad del grupo.

Los Collembola deben considerarse, al menos mientras no se incluyan especies que no sean

descomponedoras, o que ayuden a esta función, como un gremio (Root 1967, Feisinger 1976) o parte importante de un gremio, su función primordial en el suelo es la remoción del suelo, y el enriquecimiento del mismo al ayudar con la degradación de la materia orgánica, desde este punto de vista pertenecen a la base de la cadena trófica, junto con hongos, bacterias, y otros artrópodos, constituyendo el gremio funcional de los descomponedores.

Podemos estudiar en forma aislada la contribución de los colémbolos a este gremio funcional, y entonces es posible mediante el uso de la teoría ecológica de flujo energético, calcular la cantidad de energía que reciben estos microartrópodos del medio en que subsisten, con lo que, mediante extrapolación matemática podemos utilizar los parámetros establecidos por Brooks y Wiley (1986) para describir la función ecológica de este gremio funcional.

**Constante de flujo energético:** Según lo establecido por la teoría de flujo energético entre los niveles de cualquier ecosistema (Krebs 1985) se establece que la energía que cualquier nivel trófico es capaz de obtener del nivel inmediato anterior es del 10%. Tomando en cuenta que en el caso de los colémbolos estos pertenecen al primer nivel trófico, entonces tomarán del medio que será el 100% de energía la décima parte, por lo que la proporción de flujo energético estimada para el gremio será de 1/10.

Si esto es real entonces podemos inferir que cuando se estudia gremios en forma independiente el flujo de energía será el obtenido por su nivel trófico, el cual estará determinado por diez a la potencia negativa de su respectivo nivel trófico, de tal forma que el flujo teórico de energía será calculado por  $10^{-n}$  donde  $n$  = nivel trófico.

Utilizando esta conjetura matemática hemos propuesto el cálculo de los estadísticos

entrópicos del gremio funcional, para evaluar su utilidad en la descripción de este segmento comunitario y su valor comparativo entre situaciones edáficas de sitios perturbados y no perturbados.

**Forma de evaluación de la entropía para gremios funcionales:** Brooks y Wiley (1986) cuando hacen su propuesta de evaluación de la entropía en poblaciones, donde se evalúa la diversidad genotípica y la entropía en las comunidades, dependiente del flujo de energía entre las especies, lo que obliga a una relación de cadena trófica.

Tanto en la exposición de Brooks y Wiley (1986) así como en la revisión de Demetrius (2000), no aparece la forma de evaluar la entropía en los niveles conformados por diversas poblaciones pero que no interactúan como cadena trófica, dado que todas pertenecen al mismo nivel trófico, en cuyo caso son parte de un gremio funcional, una de las principales entidades ecológicas en la cadena trófica.

En vista de esta carencia se postula la forma de utilizar la entropía como una forma de medida de los gremios. Para este desarrollo es necesario postular lo siguiente:

- a) Los gremios están constituidos por poblaciones de diferentes especies pero no conforman una comunidad.
- b) No conforman una comunidad porque las poblaciones de las diversas especies que interactúan no forman parte de una cadena trófica ya que no hay flujo de energía entre ellas.
- c) Existe competencia entre las poblaciones que conforman un gremio funcional.
- d) La competencia redundante en la obtención de nuevos caracteres de las poblaciones que le permite sobrevivir.
- e) Podemos asumir que en condiciones totalmente similares la especie o especies que alcancen el mayor índice reproductivo, serán

las que compiten con mayor eficiencia en las condiciones del momento.

Es fácil concluir que para las poblaciones lo que determina la entropía es la diversidad de genotipos presentes y en consecuencia la energía representada por ellos en la estructura poblacional, mientras que para una comunidad la variación en las poblaciones es el factor determinante de la entropía aunado al flujo de energía existente entre poblaciones de diferentes niveles tróficos.

Para un gremio funcional la variación de poblaciones es válida pero no así el flujo de energía entre ellas, ya que todas pertenecen al mismo nivel trófico, por lo tanto el factor energético en este caso sería el aportado por el propio nivel trófico a sus constituyentes. Como se determinó anteriormente este factor es una constante para cada nivel según la teoría de flujo de energía, en consecuencia por regla matemática una constante introducida como producto o razón en una productoria, sumatoria, integral o derivada es externada como un factor común de la operación, esto modifica las fórmulas de Brooks y Wiley (1986) para comunidades como se muestra en el cuadro 3.

#### DEMOSTRACIÓN DE LA CONJETURA:

$$H_1 > H_2 \Rightarrow SS_1 > SS_2$$

El indicador H determina la variación de la dinámica del suelo, con respecto al flujo de energía teórico del nivel trófico al que pertenecen los organismos estudiados. En este caso al trabajar con Collembola que pertenece al grupo de los descomponedores, se estima la entropía en función del flujo energético determinado para este nivel (Krebs 1985).

De aquí que aquel suelo que manifieste mayor dinamismo será en consecuencia el que mantenga mayor flujo energético y en consecuencia mayor calidad de suelo o mayor salud edáfica.

Sin embargo, es necesario determinar que la relación obtenida en forma directa entre H y Ss, es decir entre la entropía relativa del nivel trófico representado por el taxón x y la salud del suelo (Ss) es una relación que se cumple en cualquier momento, para evitar el destino de todo parámetro biológico que es la reiteración con aplicaciones correctas o incorrectas del mismo que lo corroboren o rechacen, en función de casos empíricos y no en función de una determinación matemática del mismo.

El factor calculado es H en función de datos empíricos, así para el suelo no disturbado la abundancia de taxa es mayor (t), el número de

los taxa a un mismo nivel trófico, por lo que según se estableció anteriormente por la propiedad homogénea de la sumatoria (Apostol 1978).

$$-\sum(kp_i \log_2 kp_i)$$

Donde k es el flujo de energía en el nivel trófico determinado, siendo este valor el índice estadístico de entropía del gremio  $T_t$ , para los taxa t.

Cumpléndose las anteriores condiciones entonces si  $H_1 > H_2$ , entonces el nivel de entropía baja al bajar el número de componentes del sistema, o si en un sistema H comparable con otro, si en uno de ellos las

**Cuadro 3:** Descriptores de la estructura de la comunidad en términos de la medida estadística de la entropía propuestos por Brooks & Wiley (1986) y los descriptores adaptados al estudio de gremios funcionales.

Término	Fórmula para comunidades	Fórmula para gremios
Diversidad entrópica	$H = -\sum(x_i n_i / xn) \log_2(x_i n_i / xn)$	$H = -\sum 10^{-n} (n_i/n) \log_2 10^{-n} (n_i/n)$
Uniformidad	$E = H_i / H_{max}$	$E = H_i / H_{max}$
Orden de la composición de especies (taxa)	$Q_E = 1 - E$	$Q_E = 1 - E$

individuos totales es mayor (N), mientras que el número de individuos por taxa (n) guarda una proporción variable con respecto a N, pero debe cumplirse que la dominancia sea mayor en el suelo disturbado, tal como lo establece Gupta y Yeates (1997), al cumplirse estas condiciones entonces:

i- existe un grupo con mayor índice de dominancia que otro comparable  $\approx$  el suelo con mayor índice de dominancia está más perturbado que el que manifiesta menor índice de dominancia (Gupta & Yeates 1997).

ii- el número de especímenes para los demás taxa manifiesta una proporción menor de individuos.

iii- esta baja en las proporciones con respecto a una proporción alta del grupo de mayor dominancia altera el factor  $p_i$  con lo que se altera el índice de diversidad (Brooks & Wiley 1986).

iv- el factor flujo de energía se mantiene constante al pertenecer todos los miembros de

proporciones  $n/N$  se convierte en despreciables con respecto al  $n/N$  de un factor dominante entonces el sistema se simplifica y baja su nivel entrópico (así un sistema de n elementos manifiesta un menor nivel entrópico que uno de  $n+1$  elementos en los cuales todos participan en forma similar (Brooks & Wiley 1986)).

Siendo esto cierto entonces  $H_{nd} > H_d$ , siendo  $nd$ =no disturbado y  $d$ =disturbado, siendo  $H = -\sum kp_i \log_2 kp_i$ , entonces por definición por recurrencia de la sumatoria si  $a_i = kp_i \log_2 kp_i$ , entonces  $\sum_{i=1}^1 a_i = a_1$ , entonces si  $\sum_{i=1}^n a_i = a_n$  para  $n \geq 1$  entonces  $\sum_{i=1}^{n+1} a_i = (\sum_{i=1}^n a_i) + a_{n+1}$ , y al repetir esto se comprueba para todo x en R, y por la propiedad asociativa de la suma (axioma 2, Apostol 1978), entonces es cierto que  $\sum_{i=1}^n a_i = a_1 + \dots + a_n$ , y por simple sustitución de términos se obtiene que es cierto para cualquier  $kp_i \log_2 kp_i$ , y por lo determinado antes entonces si  $H_{nd} > H_d$ , entonces  $S_{S_{nd}} > S_{S_d}$ .

## DISCUSIÓN

El estadístico H (entropía) es el que manifiesta mayor variación. La mayor entropía está presente en el sistema no disturbado, por lo que es evidente que a mayor número de taxa y de individuos, mayor entropía, con lo que los sistemas altamente dinámicos parecen estar más saludables, con lo que los flujos energéticos fluyen de una forma más apropiada y rápida.

La definición en términos matemáticos derivada de estos resultados sería:

Para todo suelo descrito por H y Ss, donde H=entropía, Ss=salud del suelo, entonces

$$H_1 > H_2 \Rightarrow Ss_1 > Ss_2$$

Los factores entrópicos ligados a la cadena trófica carecen de aplicabilidad en el estudio de los gremios funcionales como indicadores de salud edáfica. Por otra parte hay que resaltar el hecho de que los textos hablan de comunidades edáficas y en la mayor parte de los casos estamos tratando con gremios funcionales, los cuales actúan como indicadores de salud edáfica de una forma eficiente.

Los otros dos factores edáficos de importancia son el equilibrio, el cual es menor en el sitio no disturbado, lo cual coincide con la mayor entropía, y este resultado estará íntimamente ligado al ordenamiento de la composición de taxa que es ligeramente mayor (en el orden de la tercera cifra significativa) en el sitio disturbado, lo cual sigue siendo armónico con el primer resultado de la entropía del sistema.

Estos parámetros se ven respaldados por los estimadores convencionales mencionados en la literatura como la riqueza de especies, y la diferencia en la frecuencia de cada taxa. Es evidente que hay diferencias significativas en todos los niveles de análisis pudiendo concluir que la cantidad absoluta de individuos, como las frecuencias por taxa estudiado y la riqueza de taxa son indicadores junto con la entropía de

la salud del suelo, manifestándose que a mayor diversidad y cantidad de individuos mayor entropía del medio y en consecuencia el flujo de energía es más dinámico, lo que se refleja en suelos de mayor o menor salud.

Esto se observa con facilidad al determinar por teoría de flujos entre niveles tróficos que la cantidad de energía que percibe cada nivel es constante, por lo tanto la alteración entrópica está sujeta a la cantidad de individuos y de taxa, por lo que el tamaño de las poblaciones y la riqueza de taxa serán determinantes en la salud edáfica, modificando la dinámica de la energética edáfica, y en consecuencia se puede determinar que los factores bióticos son fundamentales en la dinámica energética de los sistemas.

Debemos considerar que esta estrecha relación de los colémbolos con la energética del suelo, puede ser una presión lo suficientemente fuerte como para predecir que el grupo evolutivamente más exitoso, es el de los hemiedáficos, que son los que ecológicamente habitan el sector de impacto primario en la dinámica energética del suelo, ya que ahí se lleva a cabo la descomposición primaria de la materia orgánica que llega a él, y en consecuencia es donde se necesita mayor actividad, favoreciendo el florecimiento de grupos específicos en esta zona ecológica.

Por último, debemos establecer que según indican los datos, los mejores indicadores son los de composición y no los cualitativos asociados a taxa particulares, sin embargo, aunque es difícil establecer una relación estrecha por parte de un taxón con un medio no perturbado o perturbado, si es posible asegurar que de los taxa más comunes y abundantes como los son Neanuridae y Entomobryidae, ninguna actúa como un buen indicador de perturbación y es más bien su cambio en abundancia lo que puede ser indicativo de un cambio de salud edáfica.

Como se puede notar en los resultados expuestos en el cuadro 2, existe una marcada diferencia de abundancia entre ambos sitios de muestreo, esto mismo sucede en los datos expuestos por van Straalen (1997) y Gupta (1997) para Alemania, Japón y Australia. La misma tendencia a una mayor dominancia evidenciada en el sitio de mayor disturbio contra el sitio no disturbado que se observa en nuestros datos, es la misma tendencia informada por los autores antes mencionados. Este comportamiento de los datos similar en múltiples regiones en las que se han efectuado estudios con comunidades y en especial con Collembola, indica que 1-) el comportamiento de estos artrópodos no varía con la latitud, 2-) que la composición de especies puede variar de un lugar a otro, pero las tendencias no, 3-) en consecuencia los resultados obtenidos en cualquiera de los sitios son fácilmente extrapolables a cualquier latitud que manifieste el mismo comportamiento, por lo que, 4-) los resultados obtenidos de los datos en Costa Rica acerca del análisis entrópico, serán aplicables en otras latitudes y viceversa, ya que al efectuar comparaciones con los datos publicados para latitudes como Alemania, Japón y Australia el comportamiento es similar. Esto con respecto a los datos cuantitativos, por su parte en lo referente a los datos cualitativos, varias familias de Collembola conforman un conjunto intersección entre nuestro país y los estudios de otras latitudes, pero no sucede igual al nivel de especie. Debe destacarse que la familia Entomobryidae es en sí un grupo de alta diversidad y por lo tanto de presencia regular en todos los sitios, por lo que este taxón al nivel de familia es inútil como indicador, en cuanto a la composición de especies es un grupo difícil por su poco conocimiento en los trópicos americanos, el exceso de especies nuevas y el desconocimiento absoluto de sus biología dificulta el poder utilizarlas como indicadores.

Esta realidad determina que los trabajos en esta área deben dirigirse inicialmente al uso de los altos taxa y su importancia en la indicación de la salud edáfica, los estudios a nivel específico pierden validez interpretativa de momento, hasta que no logremos colecciones y trabajos serios en la taxonomía de este grupo que permita asociar especies con variaciones morfológicas reales y su presencia en diversos sitios con diferente estado de disturbio.

Los datos mostrados en este trabajo demuestran que la identificación a nivel de familia y un correcto tratamiento puede ser de mucha utilidad en la determinación de la salud edáfica, y en la realidad actual del neotrópico es más valiosa esta indicación correctamente manejada que centenares de datos no comparables por datar solo un taxón de dispersión muy alta, y en consecuencia de presencia en todos aquellos sitios disturbados o no.

El utilizar cualquiera de estos taxa, sin consideraciones profundas del ciclo energético del suelo en que se hallan, puede llevar a errores de gran dimensión en estudios de este tipo en el trópico.

#### AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA) de la Universidad de Costa Rica por el apoyo brindado a este proyecto. A José Antonio Vargas por la revisión del manuscrito y el aporte de ideas. A Said Amed Retana-Salazar, por su colaboración en la revisión y facilitación de literatura matemática, al Museo de Insectos de la Universidad de Costa Rica por el préstamo de sus instalaciones y C. Guillén por la identificación de los organismos.

#### REFERENCIAS

**Apostol TM. 1978.** *Caculus*. Blaisdell Publishing Co. Ms. p 48-49.

- Brooks DR, Wiley EO. 1986.** Evolution as Entropy: Toward a Unified Theory of Biology, Chicago Univ. Press.
- Christiansen K. 1964.** Bionomics of Collembola. Annual Review of Entomology 9, 147-178.
- Demetrius L. 2000.** Thermodynamics and Evolution (Review). J.theor. Biol. 206:1-16
- Feinsinger P. 1976.** Organization of a tropical guild of nectarivorous birds. Ecol. Monogr. 46:257-291.
- Gisin H. 1943.** Okologie und lebensgemeinschaften der Collembolen im Schweizerischen Exkursionsgebiet Basels. Revue Suisse de Zoologie 50:131-224
- Gupta VVSR, Yeates GW. 1997.** Soil Microfauna as Bioindicators of Soil Health. In: Pankhurst, C.E., Double, B.M. and Gupta, V.V.S.R. eds. Biological Indicators of Soil Health. CAB International, Wallingford, UK, pp201-233.
- Kanal A. 2004.** Effects of fertilization and edaphic properties on soil-associated collembola in crop rotation. Agronomy Research. 2 (2): 153-118.
- Krebs CJ.1985.** Ecology: The experimental analysis of distribution and abundance, 3ª Edición, Harper & Row, NY, pp 570.
- Mound LA, Marullo R. 1996.** The thrips of Central and South America: An Introduction (Insecta: Thysanoptera). Mem. Entomol. 487 p.
- Palacios-Vargas JG. 1990.** Diagnósis y clave para determinar las familias de los Collembola de la Región Neotropical. Manuales y Guías para el Estudio de Microartrópodos 1. México D.F. 15 p.
- Pimm SL. 1982.** Food Webs. London: Chapman and Hall.
- Root RB. 1967.** The niche exploitation pattern of the blue-gray gnatcatcher. Ecol. Monogr. 37:317-350.
- Southwood TRE. 1978.** Ecological Methods: with particular reference to the study of Insects Populations. 2ª Ed. Chapman & Hall Publ. London. 524p.
- Straalen NM (van). 1997.** Community Structure of soil Arthropods as Bioindicators of Soil Health. In: Pankhurst, C.E., Double, B.M. and Gupta, V.V.S.R. eds. Biological Indicators of Soil Health. CAB International, Wallingford, UK, pp 235-264.

Recibido: 7 Octubre 2005

Aceptado: 20 Enero 2005