

DIVERSIDAD SHANNON

Eduardo Somarriba¹

INTRODUCCIÓN

El estudio de la diversidad es un tema central en ecología de comunidades y de ecosistemas (Magurran, 1988); sus conceptos y herramientas se utilizan en el estudio de policultivos y en sistemas agroforestales (un tipo de policultivo), tales como los huertos caseños, cultivos perennes con sombra, agro-bosques y barbechos enriquecidos con frutales y maderables.

El índice de Shannon es uno de los más comúnmente usados en ecología (Greig-Smith, 1983) y en agroforestería (ver artículo de Rojas *et al.* en este volumen). En este artículo se muestra cómo se genera y cómo se calcula este índice y se discute su utilización como herramienta del análisis agroforestal.

EL ÍNDICE SHANNON (H)

Este índice fue desarrollado para medir la cantidad de información que se puede transmitir en un código, por ejemplo, en las señales telefónicas (Shannon y Weaver, 1949). La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$H = - \sum p_i \log p_i$$

Donde p_i representa la proporción (o abundancia relativa) de cada especie en la población y "log" es la abreviatura del logaritmo (la base del logaritmo no importa, puede ser base 10 (decimal), base 2 (binaria) o base "e" = 2.7182..., la base de los logaritmos naturales, la más utilizada actualmente). La sumatoria (Σ) es sobre las "S" especies ($i = 1, 2, \dots, S$) de la población. Si llamamos n_i al número de individuos de la especie "i" y N a la población total de la colección, entonces $p_i = n_i/N$. El tamaño de la población (N) se calcula sumando los individuos de todas las especies, es decir, $N = \Sigma n_i$. Del signo negativo vamos a hablar luego.

¿QUÉ MIDE EL ÍNDICE SHANNON?

Veamos un ejemplo agroforestal. El inventario botánico de 1000 m² de un cafetal indica que existe un

total de 10 árboles de sombra, pertenecientes a tres diferentes especies. Así, tenemos dos individuos de especie 1 ($n_1 = 2$), dos individuos de especie 2 ($n_2 = 2$) y seis de especie 3 ($n_3 = 6$).

¿Cuál es la probabilidad de que un individuo seleccionado al azar pertenezca a la especie 1? Una estimación de esta probabilidad es simplemente la proporción de individuos de especie 1 en el cafetal: $p_1 = n_1/N = 2/10 = 1/5 = 0.20$. Es decir, 1 de cada 5. ¿Y la probabilidad de que dos individuos seleccionados al azar pertenezcan a la especie 1? Aquí necesitamos un poco de teoría estadística. La probabilidad de que dos individuos seleccionados al azar pertenezcan a la misma especie es igual al producto de las probabilidades individuales de pertenecer a dicha especie. Entonces, la probabilidad $p_1 * p_1 = (p_1)^2 = 0.2 * 0.2 = 0.04$. En el caso del cafetal, podemos preguntar ¿cuál es la probabilidad de obtener una muestra de diez árboles tal que dos individuos pertenezcan a la especie 1, dos a la especie 2 y seis a la especie 3?. Aplicando el razonamiento anterior esta probabilidad se calcula como:

$$(p_1)^2 * (p_2)^2 * (p_3)^6 = (n_1/N)^2 * (n_2/N)^2 * (n_3/N)^6$$

Notemos que el exponente de cada término es igual al número de individuos de cada especie (n_i) en la población. Entonces, en general, la probabilidad de seleccionar una muestra del cafetal que contenga las tres especies en las proporciones exactas en que existen en la población es:

$$(p_1)^{n_1} * (p_2)^{n_2} * (p_3)^{n_3}$$

Este razonamiento se puede extender a cafetales con más o con menos especies de sombra. El valor de esta expresión depende de N, el tamaño de la población, lo que impide comparar directamente las probabilidades calculadas para dos cafetales con diferentes poblaciones. Para hacer esto, calculamos

¹ CATIE, Turrialba, Costa Rica. esomarri@catie.ac.cr

el promedio geométrico² de esta probabilidad y se obtiene:

$$[(p_1)^{n_1}]^{1/N} * [(p_2)^{n_2}]^{1/N} * [(p_3)^{n_3}]^{1/N}$$

Las reglas de operación de potencias indican que si un número (z), elevado a la potencia (a) es nuevamente elevado a la potencia (b), el resultado es el número (z) elevado a la multiplicación de a*b. Entonces, podemos re-escribir la ecuación anterior como:

$$(p_1)^{n_1/N} * (p_2)^{n_2/N} * (p_3)^{n_3/N}$$

pero hemos visto anteriormente que $(n_1/N) = p_1$; $(n_2/N) = p_2$ y $(n_3/N) = p_3$, por lo que re-escribimos:

$$(p_1)^{p_1} * (p_2)^{p_2} * (p_3)^{p_3}$$

Para evitar los exponentes y productos, tomamos el logaritmo (natural) y obtenemos:

$$p_1 * \log p_1 + p_2 * \log p_2 + p_3 * \log p_3$$

Si llamamos Q al resultado de esta suma y utilizamos el signo de sumatoria, obtenemos:

$$Q = \sum p_i \log p_i, \text{ con } i = 1,2,3$$

Esta fórmula, que es el índice de Shannon presentado anteriormente solo que con signo positivo, mide la probabilidad de obtener una muestra de cafetal de 10 árboles de sombra, de los cuales dos pertenecen a especie 1, dos a especie 2 y seis a especie 3. ¿De donde sale el signo negativo? El signo deriva de una transformación adicional de esta probabilidad: el recíproco³. Si llamamos H a esta transformación, tendremos:

$$H = 1/Q = Q^{-1}$$

En términos informales, si Q mide la probabilidad de obtener algo conocido (la composición de especies y

sus abundancias relativas en una muestra), H mide el "complemento", la incertidumbre (lo desconocido) o diversidad de la muestra.

Ahora podemos dar una interpretación a la fórmula $H = -\sum p_i \log p_i$. El índice de diversidad Shannon mide (el recíproco de) la probabilidad de seleccionar todas las especies en la proporción con que existen en la población, es decir, mide la probabilidad de que una muestra seleccionada al azar de una población infinitamente grande contenga exactamente n_1 individuos de especie 1, n_2 de especie 2, ... y n_s individuos de la especie S (Greig-Smith, 1983; Hill, 1973).

¿CÓMO ES EL COMPORTAMIENTO NUMÉRICO DE ESTE ÍNDICE?

El índice H aumenta a medida que: 1) aumenta la riqueza (el número de especies en el cafetal) y 2) los individuos se distribuyen más homogéneamente entre todas las especies (Cuadro 1). En ese cuadro, el cafetal 1 tiene solo una especie, los cafetales 2, 3 y 4 tienen dos especies, los cafetales 5, 6 y 7 tienen tres especies y los cafetales 8, 9 y 10 tienen cuatro especies. La diversidad es cero cuando sólo se tiene una especie y, cuando hay

Cuadro 1. Diversidad de Shannon (H) del dosel de sombra de cafetales con diferente número de especies (S) y diferentes números de individuos por especie. El tamaño de población es N = 10 árboles de sombra en todos los cafetales.

Cafetal	S 1	S 2	S 3	S 4	H
1	10	-	-	-	0
2	9	1	-	-	0.3251
3	5	5	-	-	0.6931
4	1	9	-	-	0.3251
5	8	1	1	-	0.6390
6	3	3	4	-	1.0889
7	1	1	8	-	0.6390
8	7	1	1	1	0.9404
9	2.5	2.5	2.5	2.5	1.3863
10	1	1	1	7	0.9404

² El promedio aritmético se calcula SUMANDO los valores que toma una variable (por ejemplo, la altura de los diez árboles del cafetal). El promedio geométrico se calcula cuando el lugar de una suma lo que tenemos son MULTIPLICACIONES o productos. Si en un promedio aritmético dividimos la suma entre el número de términos sumados (10 árboles en caso del cafetal) en el promedio geométrico calculamos la raíz enésima ($\sqrt[n]{x}$) del producto. En la probabilidad del cafetal estamos multiplicando tres términos, por lo que la media geométrica se obtiene calculando la raíz cúbica del producto. Calcular la raíz cuadrada de un número (x) es equivalente a elevar ese número (x) a la potencia (1/2), ($\sqrt[n]{x} = x^{1/n}$) si calculamos raíz cúbica es lo mismo que elevarlo a la potencia (1/3) y así para cualquier potencia.

³ Si lanzamos una moneda al aire y llamamos "c" a la probabilidad de que al lanzarla caiga "cara", entonces, el complemento, la probabilidad de que caiga "escudo" (a lo que llamamos "d") es 1-d. Este concepto es válido cuando las probabilidades son ADITIVAS, es decir, SUMAS. Si las probabilidades se obtienen de PRODUCTOS, la resta como complemento no es apropiada y en su lugar tomamos el recíproco, una DIVISIÓN. El recíproco de un número (x) se calcula como 1/x, el cual puede escribirse como x^{-1} , según las reglas de operaciones con potencias.

2 o más especies, es máxima si todas las especies tienen el mismo número de individuos (es decir, cuando las proporciones de todas las especies son iguales, $p_1 = p_2 = \dots = p_s$). Es evidente que dos huertos pueden tener el mismo H con diferentes combinaciones de riquezas y abundancias relativas, lo cual tiene que ser tomado en cuenta cuando se quiere comparar estadísticamente dos cafetales. Existen estadísticos que permiten probar hipótesis sobre las diferencias de diversidad de dos o más colecciones (Kulvac, 1968). El valor de H se ha calculado en muchos estudios ecológicos, los cuales muestran que H generalmente varía entre 1.5 y 3.5 y que raramente pasa de 4.5 (Magurran, 1988).

La diversidad máxima (H') se puede calcular fácilmente como $H' = \log S$, donde S representa el número de especies de la población. Es evidente que H' no aumenta linealmente con la riqueza (Figura 1), sino que lo hace rápidamente cuando la riqueza aumenta entre 1 y 13 especies, pero luego se "satura" y crece lentamente. Así, $H' = 2.5$ cuando la riqueza es de 12 especies, pero se requieren 148 especies para obtener $H' = 5.0$. El índice H es sensible a bajas riquezas.

La "saturación" del índice Shannon cuando la riqueza es muy elevada reduce su utilidad cuando se quieren comparar bosques tropicales mixtos, huertos caseros, cafetales o cacaotales muy diversificados y agro-bosques o barbechos enriquecidos. Afortunadamente existen soluciones. Se puede aumentar la "sensibilidad" del índice reduciendo la riqueza con que se mide la colección. Por ejemplo, en bosques se puede definir la riqueza no en términos de listas botánicas de especies, sino de "grupos ecológicos" (ejemplo, agrupando las especies en heliófitas pioneras de vida corta, heliófitas pioneras de vida larga, esciófitas de vida larga, etc.). En cafetales, se pueden definir "grupos funcionales" (leña, maderables, cítricos, sombra, musáceas, otros frutales, etc.) en el dosel de sombra y en huertos caseros se puede definir riqueza en términos de las "zonas o áreas del huerto".

APLICACIONES EN AGROFORESTERÍA

Todas las especies (o grupos funcionales) tienen igual peso en el índice de Shannon. Sin embargo, la agroforestería tiene que ver con sistemas manejados para satisfacer las necesidades del administrador de la tierra (producir más, dar sombra, diversificar la producción,

fijar carbono, reducir erosión, etc.) y las especies se seleccionan con este fin. No es lo mismo una especie que otra, ya que los "nombres" importan para el manejo. Por ejemplo, dos cafetales con igual riqueza (digamos, 2 especies) y abundancias relativas pueden diferir grandemente en términos de manejo y valoración por parte del finquero. Por ejemplo, no se maneja igual un cafetal con sombra de *Erythrina poeppigiana* - *Cordia alliodora* que otro con *Citrus sinensis* - *Musa* AAB. Sin embargo, a pesar de que no es posible relacionar el ín-

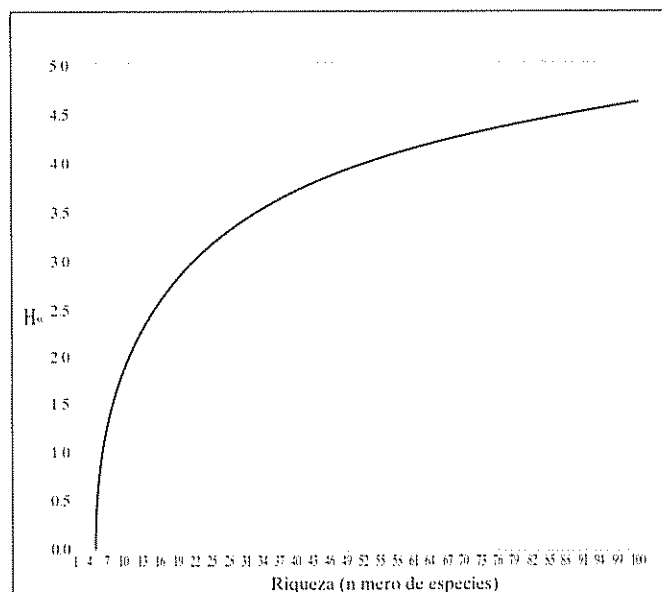


Figura 1 Diversidad máxima [$H' = \log(S)$] del índice de Shannon

dice de diversidad de Shannon con el manejo de los sistemas agroforestales, ecólogos y agroforestales continuarán utilizándolo en sus estudios porque permiten sintetizar mucha información en una sola cifra.

AGRADECIMIENTOS

Se agradecen los valiosos comentarios de Pedro Ferreira, Luis Meléndez y Daniel Marmillod.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

Greig-Smith P (1983) Quantitative plant ecology 3 ed. University of California Press, Berkeley, California, USA pp 163-164
 Hill MO (1973) Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences Ecology 54(2):427-432
 Kulvac S (1968) Information theory and statistics. Dover, New York, USA
 Magurran AE (1988) Ecological diversity and its measurement Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA
 Shannon CE and Weaver W (1949) The mathematical theory of communication University of Illinois Press, Urbana, Illinois USA