

## Holons: Teoría de juegos y genética del maíz.

### Resumen

Un holón es algo que es a la vez un todo y una parte. Es un subsistema de un sistema mayor. El artículo analiza dos subsistemas relacionados con la conservación del maíz criollo. Haciendo uso de la teoría de juegos el artículo elabora un análisis socio-ecológico de la conservación del maíz criollo en las comunidades rurales de Oaxaca. En dichas comunidades la producción de maíz para el autoconsumo es una estrategia de los hogares que brinda seguridad alimentaria. En este artículo se desarrolla un modelo económico sobre la selección de semillas y un modelo biológico sobre la migración de los transgenes contenidos en las variedades comerciales de maíz. También se elaboran escenarios prospectivos.

**Palabras clave:** teoría de juegos, recursos comunales, selección genética, sistemas socio-ecológicos

### Abstract

The paper studies the conservation of native maize in rural areas of Oaxaca, Mexico. In rural Mexico and particularly in Oaxaca, maize production for auto-consumption is an important household strategy for food security. Using game theory the paper develops a socio-ecological model for the study of native corn conservation. An economic model on seed selection and a biological model on genetic drift are integrated. Some prospective scenarios are presented.

**Key words:** game theory, genetics, common-pool resources, socio-ecological systems.

### 1. Introducción

Al menos dos distintos estudios han identificado la contaminación de maíz criollo por maíz transgénico en la Sierra Norte de Oaxaca (Quist y Chapela, 2001; Alvarez-Buylla, et al., 2009). El principal hallazgo de estas investigaciones es que el maíz criollo puede efectivamente estar contaminado por la migración de transgenes de variedades de maíz biotecnológicamente modificadas (Alvarez-Buylla, et al., 2009). Ambos estudios, el primero llevado a cabo por la Universidad de Berkeley y el segundo por la Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), levantaron muestras en varias parcelas de la Sierra Juárez de Oaxaca y de tiendas comunitarias de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) Quist y Chapela (2001) además utilizan controles de Cuzco, Perú.

La presencia del transgen promotor 35S (p-35S) proveniente del virus del mosaico de la coliflor (CaMV) en las muestras de DICONSA hace necesario el monitoreo de la ayuda alimentaria para evitar la contaminación del maíz criollo. El CaMV es un pararetrovirus de todas las plantas crucíferas (col, brocoli, coliflor y otras). El genoma es una doble cadena de ADN (ácido desoxirribonucleico) circular de 8-kbp. Su importancia se debe al promotor de su ADN ribosómico 35S, que es activo constitutivamente en la mayoría de los tejidos de las plantas, por lo que ha sido muy utilizado como promotor en casi todos los cultivos transgénicos comerciales y los que están siendo evaluados en el campo (EcuRed).

Asimismo, la secuencia de ADN T-NOS del *Agrobacterium tumefaciens* fue encontrado en dichas muestras. *Agrobacterium tumefaciens* es un patógeno de plantas con la capacidad de integrar establemente parte de su material genético dentro del genoma de su hospedero (Tzfira y Citovsky, 2000).

## 2.Holons

El estudio de los comunes puede involucrar varios niveles de análisis. El Marco de Análisis y Desarrollo Institucional (IAD por sus siglas en inglés) funciona como un mapa cartográfico que puede ser presentado a diversas escalas. Para distintos niveles de orientación se requieren distintos mapas. Por ejemplo, en un ambiente urbano las escalas pueden ir de la calle, al vecindario, a la ciudad, a la región, al país, etc. De la misma manera, el IAD mapea las decisiones humanas que son resultado de distintas capas que incluyen, por un lado, los componentes biofísicos; y por otro, las estructuras compuestas por más personas, como son la familia, las comunidades, las empresas, las industrias, las naciones, etc. Cada una de estos componentes (holons) es un sistema en sí mismo y forma parte de un sistema mayor, configurando un sistema complejo adaptativo. El IAD permite diseccionar dichos sistemas en sus componentes y obtener conclusiones para distintos niveles de análisis espacial, temporal e institucional. Las arenas de acción se encuentran ligadas a través de los distintos niveles de análisis, donde cada conjunto de normas, reglas, leyes y demás acuerdos institucionales surgen de otro conjunto de acuerdos

institucionales en un nivel superior. Asimismo, el hacer cumplir dichas reglas, normas y leyes en niveles superiores dependerá de la capacidad de hacerlas cumplir en niveles inferiores.

En el estudio de los recursos comunes Kiser y Ostrom (1982) distinguen tres niveles de análisis que se vinculan y retroalimentan:

- **Nivel operacional:** Se refiere a las reglas y condiciones exógenas que afectan las decisiones del día a día de los participantes.
- **Nivel de Acción Colectiva:** Son las reglas que afectan las actividades operacionales y resultados en determinar qué actores son elegibles de determinadas reglas y cuáles pueden cambiarlas.
- **Nivel Constitucional:** Se refiere a las reglas que afectan el nivel operacional del día a día y a la elegibilidad de los actores y que al mismo tiempo se retroalimentan del nivel operacional. Dada la soberanía de los Estados, el nivel institucional más elevado es el constitucional. Los acuerdos internacionales son válidos al interior de los Estados en cuanto tengan rango constitucional.

En este artículo se incluye un nivel de análisis por debajo del operacional que considera la biología del maíz y que debería informar las características biofísicas de nuestro caso, retro-alimentar la situación de acción y los resultados en el nivel operacional y de ahí la situación de acción en el nivel constitucional.

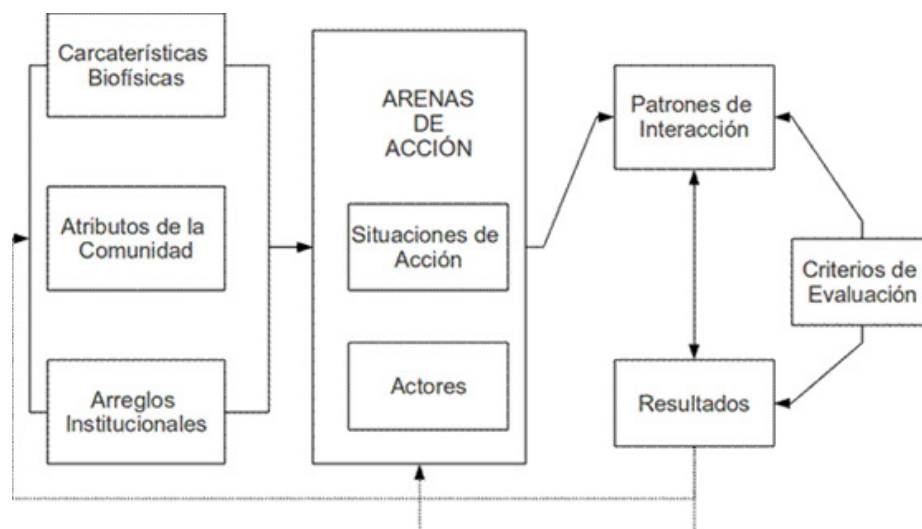


Figura 1. Marco de Análisis y Desarrollo Institucional (IAD). Fuente: Ostrom, 2010

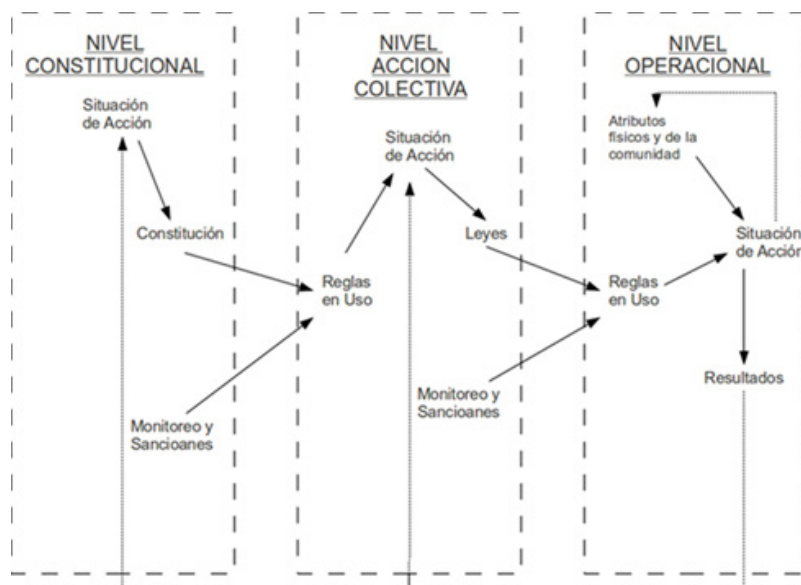


Figura 2. Vinculación de Niveles de Análisis Fuente: Kiser y Ostrom (1982)

### 3. Dinámica Evolutiva

La Dinámica Evolutiva es un nuevo campo del conocimiento que estudia los procesos evolutivos en el contexto de ecuaciones matemáticas. La formulación original de la teoría de la evolución trata sobre la evolución genética, así como sobre el origen y adaptación de especies. Recientemente el pensamiento evolucionista se ha expandido a todas las áreas de la biología y a otras disciplinas de las ciencias de la vida. Dondequiera que la información se reproduce hay evolución. Las mutaciones son causadas por errores en la transmisión de información, resultando en distintos tipos de mensaje (Nowak, 2006).

Las investigaciones de Ronald Fisher, J.B.S. Haldane y Sewall Wright sobre biología matemática unifican la genética Mendeliana y la evolución Darwiniana. Su trabajo introdujo conceptos fundamentales como evolución, selección y mutación dentro de modelos matemáticos. Por su parte, John Maynard Smith tomó prestada la teoría de juegos de la economía y ciencia política y la aplicó a la biología fundando el campo de teoría de juegos evolutiva (Nowak, 2006).

El presente artículo fusiona dos modelos de economía y biología matemática para estudiar la difusión del maíz transgénico y la potencial migración de sus genes. Ambos modelos utilizan teoría de juegos. El objetivo es demostrar la complejidad del presente problema. Metodológicamente el artículo utiliza el concepto de holon acuñado por Arthur Koes-

ler. Se pueden imaginar subsistemas que representan diversas escalas. Para distintos niveles de orientación se requieren distintos mapas. Para estudiar la interacción del maíz transgénico con las variedades criollas será necesario mapear las decisiones humanas que son resultado de distintas capas que incluyen, por un lado, los componentes biofísicos; y por otro, las estructuras compuestas por más personas, como son la familia, las comunidades, las empresas, las industrias, las naciones, etc. Cada una de estas componentes o holons es un sistema en sí mismo y forma parte de un sistema mayor, configurando un sistema complejo adaptativo.

### 4. Modelo Económico

Sean A y B dos variedades distintas de maíz. Sea  $\pi(A)$  y  $\pi(B)$  las funciones beneficio de dos granjeros:  $\pi(A)=pY(A)-cA$  y  $\pi(B)=pY(B)-cB$ . Donde  $p$  es el precio del maíz;  $Y$  la tecnología agrícola; y  $c$  el costo marginal. Cada granjero debe decidir qué variedad de maíz utilizar:

Podemos esperar tres posibles escenarios.

Tabla 1. Modelo de decisión de los granjeros

		Granjero 1	
		A	B
Granjero 2	A	$\pi(A), \pi(A)$	$\pi(A), \pi(B)$
	B	$\pi(B), \pi(A)$	$\pi(B), \pi(B)$

### Escenario 1:

$\pi(A) > \pi(B)$ . El equilibrio de Nash será (A,A).

### Escenario 2:

$\pi(A) < \pi(B)$ . El equilibrio de Nash será (B,B).

### Escenario 3:

$\pi(A) = \pi(B)$ . No hay un equilibrio de Nash.

Ahora suponga B es una variedad de maíz transgénico y el gobierno trata de controlar su uso mediante un impuesto.

### Escenario 4:

La función beneficio será  $\pi(B) = pY(B) - cB - tB$ . Para que el equilibrio sea (A,A) y los granjeros tengan incentivos suficientes para dejar de usar maíz transgénico el nivel de t tiene que ser tal que  $\pi(A) < \pi(B)$ .

## 5. Modelo Biológico

La teoría de juegos a través del modelo de “guerra de desgaste” puede brindar interesantes intuiciones acerca de la interacción entre genes. El modelo fue introducido a la biología por el teórico Maynard Smith (1974), para explicar la lucha entre animales por una presa. El ejemplo clásico es la interacción entre halcones y palomas. Un ejemplo alternativo puede ser la competencia por una presa. Imagine el cadáver de una ballena en una playa del ártico y dos tropas de osos buscando comida. La ballena es más carne de la que una sola familia de osos polares podría consumir. No obstante, la tropa de osos que primero llegue (o encuentre) el cadáver tendrá que pelear con otras familias de osos polares que lleguen (o encuentren) el cadáver después de ellos. Si permiten que la segunda o tercera o cuarta familia se acerquen al cadáver y se alimenten, corren el riesgo de ser expulsados de su posición como propietarios del cadáver. Cada vez que una nueva tropa de osos llega, los propietarios tendrán que pelear para conservar su derecho a alimentarse de la ballena o tendrán que abandonar el cadáver si la tropa en competencia es suficientemente fuerte para convertirse en un nuevo propietario. ¿Cuántas familias podrán alimentarse de una sola ballena? La sobrevivencia del más apto o la aptitud darwiniana como lo establece Smith (1982) es la regla que determina cuántas familias de osos tienen la oportunidad

de alimentarse de un cadáver. Las estrategias dominantes (como se conocen en economía) son llamadas estrategias evolutivamente estables (EEE). En forma sencilla, la Figura 1 ejemplifica el juego que enfrentan dos tropas de osos. Siendo Q el cadáver de la ballena. La estrategia dominante de ambas tropas es de pelear mientras Q sea positiva. Ambas tropas recibirán Q/2.

Este juego puede ser aplicado a la interacción

Tabla 2. Guerra de desgaste en una playa del ártic

Con cualquier $Q > 0$ la estrategia dominante es a competir			
		Tropa 1	
		Pelear	Abandonar
Tropa 2	Pelear	Q/2, Q/2	Q, 0
	Abandonar	0, Q	0,0

de los transgenes p-35S y TNOS con las variedades criollas de maíz. Supongamos una planta recibe el polen de dos variedades de maíz, una criolla y otra que contenga uno de los dos transgenes. Al momento de la polinización el pistilo tendría que seleccionar entre uno de estos pólenes. La Figura 2 muestra dicha interacción. Se utiliza únicamente el trasngen p-35S por simplicidad y se ubica como un gen predador. Dos plantas con material genético criollo podrían compartir recursos y reproducirse. Una planta criolla frente a una transgénica tendería a ser derrotada. Dos plantas transgénicas no podrían sobrevivir conjuntamente por más de una generación. Por lo pronto se eliminan los efectos de red.

La teoría de juegos puede ser aplicado a la interacción de los transgenes p-35S y TNOS con las variedades criollas de maíz. Supongamos una planta recibe el polen de dos variedades de maíz, una criolla y otra que contenga uno de los dos transgenes. Al momento de la polinización el pistilo tendría que seleccionar entre uno de estos pólenes. La Figura 2 muestra dicha interacción. Se utiliza únicamente el trasngen p-35S por simplicidad y se ubica como un gen predador. Dos plantas con material genético criollo podrían compartir recursos y reproducirse. Una planta criolla frente a una transgénica tendería a ser derrotada. Dos plantas transgénicas no podrían sobrevivir conjuntamente por más de una generación. La Estrategia Evolutivamente Estable (EEE) en este caso será (criollo, criollo).

Tabla 3. Polinización del maíz

Con cualquier $Q > 0$ la estrategia evolutivamente estable sería (criollo, criollo)			
		Planta 1	
		criollo	p-35S
Planta 2	criollo	Q/2, Q/2	Q, 0
	p-35S	0, Q	0,0

## Mutación

A partir del modelo propuesto por Martin Nowak (2006), consideremos dos tipos de maíz A y B.  $\mu_i$  es la probabilidad de que la reproducción de un tipo de espécimen lleve la reproducción del otro. Es decir,  $\mu_1$  será la tasa de mutación de A a B; y  $\mu_2$  la tasa de mutación de B a A. Sean  $x$  y  $y$  las frecuencias de A y B respectivamente. Tenemos:

$$\dot{x} = x(1 - \mu_1) + y\mu_2 - \phi x$$

$$\dot{y} = x\mu_1 + y(1 - \mu_2) - \phi y$$

Supongamos A y B tienen la misma capacidad de adaptación ( $a=b=1$ ), la capacidad de adaptación promedio de la población es constante y dada por  $\phi = 1$ . Tomando en cuenta que  $x+y=1$  el sistema de ecuaciones se ve reducido a

$$\dot{x} = \mu_2 - x(\mu_1 + \mu_2)$$

La frecuencia de A convergirá al equilibrio estable.

$$x^* = \frac{\mu_2}{\mu_1 + \mu_2}$$

Bajo estas condiciones la mutación lleva a la coexistencia de los dos tipos de maíz A y B. La proporción relativa de A y B en equilibrio depende de las tasas de mutación.

Supongamos A es el maíz criollo y B el maíz transgénico. ¿Cuál de las dos variedades de maíz prevalecerá? Depende de las tasas de mutación  $\mu_1$  y  $\mu_2$ :

### Escenario 1:

si  $\mu_1 = \mu_2$  entonces  $x^* = y^*$

### Escenario 2:

si  $\mu_1 > \mu_2$  entonces  $x^* < y^*$ . Es decir, habrá una mayor proporción de maíz transgénico.

### Escenario 3:

si  $\mu_1 < \mu_2$  entonces  $x^* > y^*$ . Es decir habrá una mayor proporción de maíz criollo.

## 6. Discusión

A partir del modelo aquí presentado la proporción de maíz transgénico dependerá de la tasa de mutación  $\mu_2$  y del beneficio económico de sembrar dicha variedad de maíz  $\pi(B)$ ; esto en términos relativos a la tasa de mutación y al beneficio económico reportado por el maíz criollo,  $\mu_1$  y  $\pi(A)$  respectivamente. Es decir, el resultado estará determinado por parámetros biológicos y económicos. En este sentido, podemos encontrar nueve resultados distintos:

Tabla 4. Posibles combinaciones de variables socio-ecológicas

Parámetros económicos	Parámetros genéticos
$\pi(A) > \pi(B)$ .	$\mu_1 = \mu_2$
	$\mu_1 > \mu_2$
	$\mu_1 < \mu_2$
$\pi(A) < \pi(B)$ .	$\mu_1 = \mu_2$
	$\mu_1 > \mu_2$
	$\mu_1 < \mu_2$
$\pi(A) = \pi(B)$	$\mu_1 = \mu_2$
	$\mu_1 > \mu_2$
	$\mu_1 < \mu_2$

## 7. Conclusiones

La Cruzada Nacional contra el Hambre (CNcH) es una política pública del Gobierno Federal de México, cuyo propósito es reducir los cordones de pobreza extrema y carencia de alimentos a través de ayuda alimentaria, principalmente maíz.

Entre las características socioeconómicas de los beneficiarios de la Cruzada se encuentra población en condiciones de pobreza multidimensional extrema con carencia de acceso a la alimentación. Los objetivos que persigue la estrategia son los siguientes:

- Cero hambre a partir de una alimentación y nutrición adecuada de personas en pobreza alimentaria;
- Eliminar la desnutrición infantil aguda y mejorar los indicadores de peso y talla de la niñez;

- Aumentar la producción de alimentos y el ingreso de los campesinos y pequeños productores agrícolas;

- Minimizar las pérdidas post-cosecha y de alimentos durante su almacenamiento, transporte, distribución y comercialización, y

- Promover la participación comunitaria para la erradicación del hambre.

El objetivo general del Programa es: Minimizar la desnutrición a través de la instrumentación de procedimientos organizativos, educativos, administrativos y productivos sobre el uso y tipo de alimentos para lograr alcanzar una alimentación correcta. De este objetivo general se desprenden los objetivos específicos los cuales son:

- 1.Asegurar una alimentación sana a través de acciones educativas.

- 2.Promover acciones de salud e higiene.

- 3.Aportar conocimientos en el área de educación nutricional para lograr una alimentación correcta y mejores prácticas de higiene individual y colectiva.

- 4.Brindar apoyo de vigilancia alimentaria a: Mujeres embarazadas y en periodo de lactancia; niñas y niños de seis a ocho meses en periodo de ablactación y de ocho a doce meses en periodo de alimentación inicial.

Dicho programa puede causar serias distorsiones en la selección de semillas de los campesinos en detrimento del maíz criollo y nativo, e impulsar la migración de transgenes en caso de que, como se ha demostrado en ocasiones anteriores, el maíz utilizado en la Cruzada sea transgénico.

En este sentido, es de gran importancia apuntar a la necesidad de incluir criterios de conservación del maíz en la política social y hacer un monitoreo continuo sobre el uso y posible migración de maíz transgénico.

## 8.Bibliografía

Nowak Martin (2006) "Evolutionary Dynamics. Exploring the equations of life.", ed Harvard University Press.

Ostrom, V., Tiebout, C., and Warren, R. (1961). "The Organization of Government in Metropolitan

Areas: A Theoretical Inquiry." American Political Science Review, 55(4): 831-42.

Ostrom, E. (2005). Understanding Institutional Diversity. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.

Ostrom, E. (2010). Beyond markets and states: Polycentric governance of complex economic systems. American Economic Review, 100:641-672.

Ostrom, E., Gardner, R., and Walker, J. (2006). Rules, games & Common-Pool Resources. The University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan.

Smith, John. Evolution and the Theory of Games. Cambridge University Press, 1982.

Smith, Maynard. "The Theory of Games and the Evolution of Animal Conflict." Journal of Theoretical Biology 47 (1974): 209-21.

TZFIRA, T. and CITOVSKEY, V. From host recognition to T-DNA integration: the function of bacterial and plant genes in the Agrobacterium-plant cell interaction. En: Molecular Plant Pathology. Vol. 1, No. 4 (2000); p. 202-212. [ Links ]

TZFIRA, T.; VAIDYA, M. and CITOVSKEY, V. Increasing plant susceptibility to Agrobacterium infection by overexpression of the Arabidopsis nuclear protein VIP1. En: Proceedings of the National Academy of Sciences USA . Vol. 99, No.16 (2002); p. 10435-10440.

**Dr. Manuel Gerardo Chávez Ángeles**

Universidad de la Sierra Sur (UNISIS)  
Universidad Intercultural del Estado de Puebla (UIEP)  
manuelchavezangeles@hotmail.com, mchavez@unsis.edu.mx