

FACTORES DETERMINANTES DE LA PRODUCTIVIDAD DE SOJA EN LA ARGENTINA

F.E. Bert y E.H. Satorre

RESUMEN

En este artículo se discuten los factores que determinan la productividad de soja en la Argentina y, en especial, en la Región Pampeana. Se hacen comparaciones con maíz, el segundo cultivo en términos de área ocupada luego de la soja. Se distinguen entre factores ambientales y de manejo. Entre los factores ambientales que más afectan la productividad de soja (y maíz) se destacan las lluvias a fines de primavera y durante el verano (las temperaturas en menor medida) y las características de los suelos (profundidad, propiedades químicas, etc.). La interacción entre clima (principalmente lluvias) y suelos puede ser un gran determinante de la productividad. El factor de manejo de mayor impacto en la productividad es la estructura (fecha de siembra, genética y distancia entre surcos), que condiciona el rinde potencial. Una correcta inoculación y la fertilización con fósforo también son determinantes para evitar limitaciones nutricionales. Finalmente, las prácticas de manejo tendientes a proteger al cultivo de adversidades (plagas, malezas y enfermedades) pueden ser importantes bajo ciertas condiciones. Hay interacciones entre el ambiente y las decisiones de manejo; ajustar el manejo a las condiciones ambientales permite aumentar y estabilizar la productividad.

Palabras clave. Soja, maíz, Región Pampeana, ambientes, manejo.

ABSTRACT

In this article we discuss the factors defining soybean productivity in Argentina and, mainly, in the Pampas region. We make comparisons with maize, the second crop in terms of occupied land. We distinguish between environmental and management factors. Among the environmental factors that most affect soybean productivity are rains at the end of spring and during the summer (temperatures in lower extent) and soils characteristics (depth, chemical properties). The interaction between climate (mainly rains) and soil is an important driver of productivity. The management factor with highest impact on productivity is structure (combination of planting date, genetic and row spacing), which affects potential yields. A proper inoculation and fertilization with phosphorous also are critical to avoid nutritional limitations. Finally, management decisions related with crop protections (insects, weeds, and diseases) may be important under specific conditions. There are interactions between the environment and management decisions; tailoring crop management to each environment may allow increasing and stabilizing production.

Key words. Soybean, maize, Pampas region, environmental, management.

Introducción y objetivo

La agricultura es el principal uso extensivo de la tierra en la Argentina. Actualmente (campana agrícola 2010/11), el área ocupada por cultivos agrícolas de grano (cereales y oleaginosos) en el país cubre 33,0 millones de hectáreas (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP); <http://www.sii.gov.ar>). El área con estos cultivos aumentó significativamente desde mediados de 1990: pasó de 16,7 millones de hectáreas en 1994/

Cátedra de Cerealicultura, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires – CONICET. Av. San Martín 4453, Ciudad de Buenos Aires (CP C1417DSE). fbert@agro.uba.ar

95 a los 33,0 millones actuales. La Región Pampeana (provincias de Buenos Aires, Entre Ríos, Santa Fe, Córdoba y La Pampa) es la principal región agrícola del país; representa alrededor del 82% de la superficie agrícola total y produce alrededor del 88% del volumen (toneladas) total (MAGyP).

Los principales cultivos de la Región Pampeana son soja, maíz y el doble cultivo trigo-soja de segunda. En la campaña 2011/12, estos cultivos ocuparon aproximadamente el 81% del área agrícola de esta región. La soja, es actualmente el cultivo más importante, tanto en la Región Pampeana como en la Argentina. La expansión de la soja ha sido impresionante: iniciándose su siembra extensiva a principios de los 70, el área nacional (producción) de soja alcanzó 5,1 millones de hectáreas (11 millones de toneladas) en 1990/91, 14,4 millones de hectáreas (38 millones de toneladas) en 2004/05 y 18,8 millones de hectáreas (49 millones de toneladas) en 2010/11 (MAGyP). La producción agrícola en general y la de soja en particular es una fuente de ingresos importantes para la Argentina: en 2011, la producción primaria de cereales representó el 10% de las exportaciones y la de oleaginosas el 7,1% (<http://www.indec.gov.ar>).

La producción de soja se extiende en todo el país, abarcando regiones con características agroecológicas contrastantes. En la Región Pampeana, predominan dos sistemas de producción de soja (Calviño y Monzón, 2009): (i) soja de primera siembra y (ii) soja de segunda siembra. En gran parte de la Región Pampeana, la soja de primera se siembra entre los meses de octubre y noviembre, previo a un período de barbecho desde la cosecha del cultivo estival anterior. Contrariamente, gran parte de la soja de segunda se siembra en diciembre, luego de la cosecha de un cultivo de invierno (*i.e.*, supone la realización de dos cultivos en un año). Ambos cultivos definen su rendimiento durante los meses de verano (con leves diferencias) finalizando su ciclo entre los meses de marzo y mayo. En los últimos años se exploraron sistemas de producción alternativos (ej. soja después de maíz) (Calviño y Monzón, 2009) aunque en la actualidad ocupan áreas muy reducidas.

El avance de la agricultura –y en especial de la soja– respondió a múltiples forzantes. El aumento de las lluvias desde 1950 (Berbery *et al.*, 2006) mejoró la productividad de áreas tradicionalmente agrícolas y permitió la expansión hacia áreas climáticamente marginales (Magrín *et al.*, 2005). Los cambios en el contexto económico global y nacional mejoraron la rentabilidad de la agricultura contribuyendo a la expansión de la misma. A escala global la creciente demanda de proteína animal y biocombustibles, mejoró los precios de granos (Lamers *et al.*, 2008). A escala local, las reformas económicas de los 90 y la devaluación de la moneda dispararon ventajas comparativas (Schnepf *et al.*, 2001). Finalmente, la incorporación de dos innovaciones tecnológicas a mediados de los 90 –siembra directa y variedades de soja tolerantes al herbicida glifosato– fue también un factor crítico en la expansión de agricultura y de la soja (Satorre, 2005; Bert *et al.*, 2011). Estas tecnologías mejoraron la productividad, redujeron los costos y simplificaron el manejo (Qaim y Traxler, 2005; Trigo *et al.*, 2009). Así, la producción actual de soja involucra un amplio rango de tecnologías de procesos e insumos, determinantes importantes de la productividad del cultivo.

En este artículo (y su correspondiente presentación) se discuten y priorizan los principales determinantes de la productividad de soja en la región. La discusión se divide en los factores ambientales y los factores de manejo, eventualmente mencionando interacciones entre ambos. Se recopilan resultados de estudios o análisis de campo que fundamentan la discusión. Aunque el foco es en el cultivo de soja, se realizan evaluaciones comparativas con otros cultivos importantes en relación a los principales factores determinantes del rinde.

Impacto de factores ambientales en la productividad

La productividad del cultivo de soja está estrechamente vinculada a las condiciones meteorológicas antes y durante el ciclo del cultivo y a las características del suelo en donde se cultiva. Las variaciones en las condiciones ambientales (e.g., variabilidad climática inter-anual o heterogeneidad espacial de suelos) pueden explicar una parte importante de las variaciones en el rinde del cultivo. Algunos trabajos encontraron una variabilidad inter-anual de rindes de soja similar a la de maíz y menor a la de trigo o soja de segunda (Borrás *et al.*, 2011). A continuación se discute el impacto de los factores clima y suelo en la determinación de la productividad de soja.

Las lluvias y temperaturas hacia fines de primavera y durante el verano –momento crítico de generación del rinde de soja de primera en los sistemas de producción Pampeanos– son fuertes determinantes de la producción de soja. Calviño y Sadras (1999) destacan la alta relación entre la producción de soja y las lluvias en el período que comprende la generación de vainas y el llenado de granos (R3-R6). Dado que gran parte de la producción se realiza en secano, excepto en los años con lluvias extremas (anegamiento), la variabilidad inter-anual de los rindes de soja está fuertemente asociada a la variabilidad inter-anual de lluvias (Penalba *et al.*, 2007). Las temperaturas también afectan la producción de soja: altas temperaturas máximas (principalmente en enero y febrero) tienen un impacto negativo en los rindes (Penalba *et al.*, 2007). Por su parte, bajas temperaturas mínimas tienen un impacto negativo en la fijación de vainas y llenado de grano (Calviño y Monzón, 2009). Penalba *et al.* (2007) encontraron que la combinación de lluvias totales mensuales y máximas y mínimas mensuales medias pueden explicar más del 60% de las variaciones inter-anales en la producción de soja de la Región Pampeana. En maíz (en siembras tempranas), si bien las variables climáticas que determinan el rinde son similares a las de soja, el momento en que influyen las mismas es diferente dado que el rinde se define antes.

La producción de soja es sensible a las características del suelo. Uno de los atributos de suelo de mayor impacto en la productividad de soja (y los cultivos en general) es la profundidad del mismo. La Figura 1, tomada y adaptada de Sadras y Calviño (2001) muestra la variación de rinde de diferentes cultivos según la profundidad del suelo (en suelos con presencia de tosca): el rinde relativo de soja aumenta desde 0,6 a 1 al variar la profundidad de suelo de 0,3 a 1,2 m. La sensibilidad del resto de los cultivos es algo mayor a la observada para soja. Un efecto negativo similar (aunque de menor magnitud) puede observarse en ambientes con presencia de un horizonte *thapto* entre los 0,3 y 0,6 m: resultados de lotes

de producción en el centro de Buenos Aires durante las últimas 4 campañas (más de 500 lotes en cada campaña) mostraron que el rinde de soja en suelos con presencia de horizonte *thapto* fue entre 20 y 25% menor que en suelos francos sin limitaciones (G. Ropero, Com. pers.). El mismo patrón se observó para maíz. Finalmente, las características químicas de los suelos también pueden afectar marcadamente la producción de soja. La presencia de sales puede limitar fuertemente la producción de soja (y otros cultivos). El manejo de cultivos en suelos con limitantes físicas y químicas es muy relevante dado que el aumento de área de soja ha sido, en parte, sobre este tipo de ambientes.

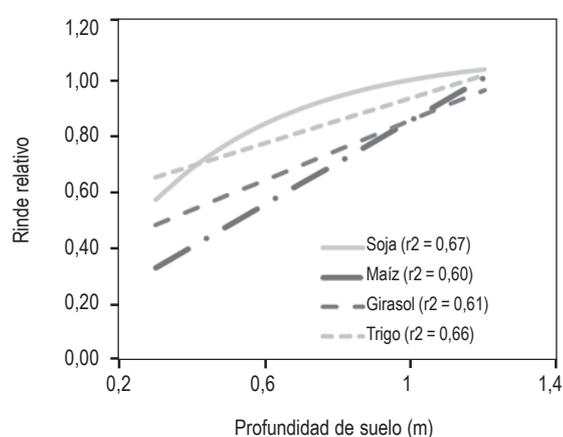


Figura 1. Rinde relativo en función de la profundidad del suelo (tomado y adaptado de Sadras y Calviño 2001).

La interacción entre las condiciones climáticas de la campaña y las características del suelo puede tener un fuerte impacto en la producción de soja. La Figura 2 propone un modelo de interacción entre clima y suelo en el rinde de soja: las diferencias entre ambientes edáficos tiende a atenuarse en años de condiciones climáticas favorables (ej., lluvias adecuadas en verano) y a magnificarse en años con condiciones climáticas desfavorables. Este modelo supone un mismo manejo en los distintos ambientes; el comportamiento podría diferir adaptando el manejo al ambiente (interacción clima x suelo x manejo). Si bien algunos datos empíricos apoyan este modelo conceptual, es necesario continuar explorando este aspecto.

Impacto de factores de manejo en la productividad

La productividad de soja responde fuertemente al manejo. Para entender las respuestas al manejo es útil distinguir diferentes umbrales de productividad; Así, hay decisiones que determinan el *rinde potencial*, el *rinde alcanzable*—dado el potencial y los factores limitantes de cada situación— y el finalmente *logrado* (Rabbinge, 1993). En primer lugar, el *rendimiento potencial* del cultivo está determinado por decisiones relacionadas a la estructura del cultivo (fe-

cha de siembra, genética, densidad y espaciamento entre hileras) que condicionan el ambiente fototérmico que explorará el cultivo. En segundo lugar, el *rendimiento alcanzable* está determinado por decisiones relacionadas al manejo de factores limitantes (ej., agua, nutrientes). Finalmente, el rinde logrado está determinado por decisiones relacionadas al manejo y control de factores reductores del rinde (ej. adversidades bióticas y abióticas). Este esquema es similar en otros cultivos. Se discuten los principales factores de manejo que determinan la productividad de soja de los sistemas agrícolas actuales de la Región Pampeana.

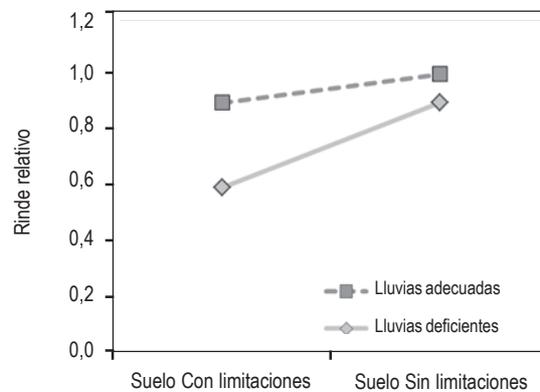


Figura 2. Modelo propuesto para describir la interacción clima y suelo en soja.

La definición de la estructura es el componente de manejo con mayor impacto en la productividad de soja. La selección de la fecha de siembra y variedad (grupo de madurez) define el momento de ocurrencia del período crítico para la generación de rinde y, por ende, el rinde potencial. La ventana óptima de siembra de soja de primera en la Región Pampeana abarca octubre y noviembre. A medida que se demora la siembra dentro de esa ventana y/o se utilizan materiales más largos, es esperable una disminución del rinde potencial por la ocurrencia del período crítico en momentos de condiciones fototérmicas más desfavorables (*i.e.*, días más cortos, menor radiación, menores temperaturas). El mismo comportamiento es esperable en maíz. Sin embargo, frecuentemente los cultivos exploran limitaciones hídricas en la Región Pampeana que alejan el rinde alcanzable del potencial. El manejo de la estructura puede contribuir a mitigar el impacto de condiciones hídricas desfavorables; por ejemplo, la demora de la fecha de siembra mejora el rinde alcanzable en años con lluvias escasas al inicio del verano (Bert *et al.*, 2007). Ensayos durante 2 campañas en el noroeste de Buenos Aires (grupo La Reja) mostraron diferencias de hasta 20% entre diferentes combinaciones de fecha de siembra y grupo de madurez. Las estrategias de mejor resultado variaron entre campañas reflejando una fuerte interacción estructura x ambiente; el ajuste de la estructura al ambiente recibe en la actualidad gran atención ya que tiene un fuerte impacto en la producción.

La soja es un cultivo con altos requerimientos de nutricionales. Las decisiones relacionadas al manejo de las limitaciones de nutrientes tienen un alto impacto en los sistemas de producción Pampeanos actuales. En general, el Nitrógeno (N) es uno de los macronutrientes más limitantes para la producción de granos en la Región Pampeana. En soja, la fijación biológica (a través de la inoculación de la semilla con bacterias de la familia *Rhizobiaceae*) puede aportar una gran proporción del N total (ej., más del 50%), principalmente durante el período de crecimiento de los frutos, cuando los requerimientos se hacen máximos. En la Argentina, si bien la inoculación es una práctica frecuente, no siempre la calidad del proceso es óptima pudiendo llevar en casos a limitaciones de N.

El fósforo (P) es uno de los nutrientes que frecuentemente más limita la producción de soja en la Región Pampeana. Por una lado, la soja tiene altos requerimientos de este nutriente (8 kg/absorbidos por tonelada de grano producido). Por otro lado, la disponibilidad de este nutriente ha disminuido marcadamente durante los últimos años (García, 2001). De esta manera, al igual que en maíz, es frecuente encontrar respuestas a la fertilización con P en los sistemas de producción Pampeanos. Las respuestas a la fertilización con P pueden alcanzar hasta el 10-15% en situaciones de suelos con bajos niveles de P (ej., menores de 5 ppm según Bray y Kurtz I). A su vez, puede haber interacciones entre la respuesta al P y la inoculación (Díaz-Zorita *et al.*, 2010). Diferentes modelos –basados en el concepto de umbral– han sido ajustados para diagnosticar las necesidades de fertilización con P (Fig. 3). La fertilización con P en soja se ha convertido en una práctica frecuente en las últimas campañas (principalmente el agregado como «arrancador») aunque las dosis utilizadas son aun relativamente bajas. En este sentido, la relación P removido/P aplicado continua siendo alta (aprox. 4,5) para la soja en la Argentina (F. García, comunic. pers.).

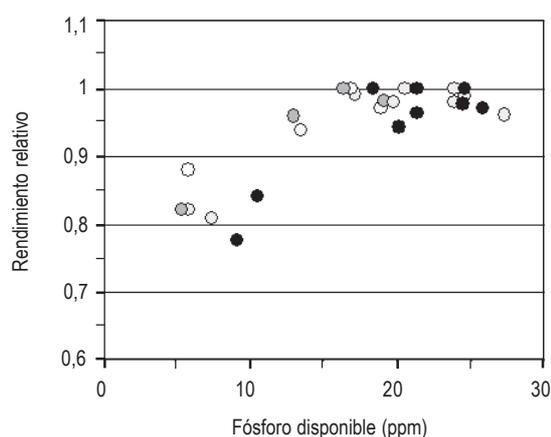


Figura 3. Rendimiento relativo y P disponible (ppm) de ensayos en el Centro de Buenos Aires durante las campañas 1999/00 a 2002/03. El P disponible resulta de la suma del P del suelo (Bray y Kurtz I) y el P aportado por el fertilizante. El aporte de P del fertilizante se calcula en base al grado del mismo y a un factor de recuperación (P que queda disponible en el suelo) de 0,6 (asumiendo que se distribuye en los primeros 10 cm de suelo, donde la densidad aparente es de 1 g/cm³). Datos de E. Satorre, comunicación personal.

Uno de los factores de manejo más determinantes de la producción de soja en la actualidad es el control de adversidades, en especial de malezas. La incorporación de variedades de soja resistentes al herbicida glifosato a mediados de los 90 mejoró y simplificó el manejo de malezas, reduciendo los costos y aumentando la eficacia de los tratamientos (Trigo y Cap, 2003). Durante varios años el sistema de control de malezas se centró en el uso de glifosato. Sin embargo, la aparición de malezas tolerantes o resistentes a este herbicida (ej., sorgo de Alepo resistente, *Conyza* sp., *Commelina erecta*, etc.) en los últimos años aumentó la complejidad de las decisiones de control de malezas en soja. La presencia de malezas problemáticas está llevando al uso de un mayor número de herbicidas (de distintos modos de acción), de mayores dosis y de un mayor número de aplicaciones. En muchos casos las estrategias de control son ineficientes (ej., con *Conyza*) lo cual genera reducciones de rinde tanto por pérdida de área, como por competencia y por problemas a la cosecha.

Finalmente, las plagas y enfermedades son determinantes de la producción de soja, aunque su manejo es relativamente más simple que el de malezas. En los últimos años se observaron cambios en relación a las plagas más frecuentes. Los principales cambios tienen que ver con la aparición de trips y arañuelas, plagas asociadas a condiciones hídricas adversas. A estas plagas se le suman las tradicionales: orugas defoliadoras o desgranadoras y chinches. La reciente aparición de nuevos insecticidas (e.g., reguladores del crecimiento, diamidas) contribuye a mejorar el control de plagas, aumentando la residualidad y disminuyendo el impacto en el ambiente. Con respecto a las enfermedades, numerosas experiencias en los últimos años marcan que las mismas pueden reducir la producción y que, por lo tanto, hay respuestas a la aplicación de fungicidas. Ante las condiciones climáticas más frecuentes de la Región Pampeana es normal alcanzar niveles de enfermedades cuyo control puede redundar en 200-300 kg/ha extra. El uso de fungicidas ha sido más frecuente en las últimas campañas aunque la adopción de esta tecnología aparece asociada a las condiciones climáticas de la campaña.

Comentarios finales

En este artículo se discutieron los factores determinantes del rinde de soja, el principal cultivo de la Argentina. El ambiente, definido aquí como las condiciones climáticas (principalmente lluvias) que experimenta el cultivo y las características del suelo, son el principal factor determinante de la productividad de soja y los principales cultivos de grano en la Argentina. Las variaciones en estos factores y las interacciones entre ellos (ej., clima x suelo) pueden explicar una gran proporción (ej., más de 50-60%) de la variabilidad espacial y temporal en la productividad de los cultivos. El resto de la productividad está condicionado por decisiones de manejo de los cultivos. El factor de manejo con mayor impacto es la estructura (lo mismo es válido para maíz). Sin embargo, una correcta inoculación y fertilización con P son determinantes en los sistemas de producción actuales de soja (Díaz-Zorita *et al.*, 2010). El manejo de adversidades puede tener un gran impacto bajo situaciones particulares (ej., en situaciones muy favorables para el desarrollo de una enfermedad). Si bien se analizaron de manera separada, adaptar el manejo (ej., estructura) a las condiciones del ambiente es clave en la definición de la productividad.

BIBLIOGRAFÍA

- Berbery, E.H.; M.E. Doyle y V. Barros. 2006. Tendencias regionales en la precipitación. Pages 67-92 In: V. Barros; R. Clarke and P. Silva Días, editors. El cambio climático en la Cuenca del Plata. CONICET, Buenos Aires.
- Bert, F.; G. Podestá; S. Rovere; A. Menéndez; M. North; E. Tataara; C. Laciana; E. Weber and F. Ruiz Toranzo. 2011. An Agent Based Model to Simulate Structural and Land Use Changes in Agricultural Systems of the Argentine Pampas. *Ecological Modeling* 222: 3486-3499.
- Bert, F.B.; G.P. Podestá; E.H. Satorre and C.D. Messina. 2007. Usability of climate information on decisions related to soybean production systems of the Argentinean Pampas. *Climate Research* 33: 123-134.
- Borrás, L.; S. Muñoz y M. Sánchez. 2011. Variabilidad de los rendimientos de cultivos de Trigo, Soja y Maíz en el Sudeste de Córdoba. Maíz en siembra directa. AAPRESID.
- Calviño, P.A. and J.P. Monzón. 2009. Farming systems of Argentina: Yield constraints and risk management. Crop physiology: Applications for genetic improvement and agronomy. Elsevier Academic Press, San Diego, California.
- Calviño, P.A. and V.O. Sadras. 1999. Interannual variation in soybean yield: interaction among rainfall, soil depth and crop management. *Field Crops Research* 63: 237-246.
- Díaz-Zorita, M.; J. Aranguren; R. Aguilar y E. Satorre. 2010. Fertilización fosfatada e inoculación de soja en vertisoles. *Ciencia del Suelo* 28: 215-222.
- García, F. 2001. Balance de fósforo en los suelos de la región Pampeana. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 9:1:3.
- Lamers, P.; K. McCormick and J.A. Hilbert. 2008. The emerging liquid biofuel market in Argentina: Implications for domestic demand and international trade. *Energy Policy* 36: 1479-1490.
- Magrín, G.; M. Travasso and G. Rodríguez. 2005. Changes in Climate and Crop Production During the 20th Century in Argentina. *Climatic Change* 72: 229-249.
- Penalba, O.C.; M.L. Bettolli and W.M. Vargas. 2007. The impact of climate variability on soybean yields in Argentina. Multivariate regression. *Meteorological Applications* 14: 3-14.
- Qaim, M. and G. Traxler. 2005. Roundup Ready soybeans in Argentina: farm level and aggregate welfare effects. *Agricultural Economics* 32: 73-86.
- Rabbinge, R. 1993. The ecological background of food production. Pages 2-29 in C.F.S. 177, editor. Crop Protection and Sustainable Agriculture. John Wiley and Sons, Chichester, UK.
- Sadras, V. and P. Calviño. 2001. Quantification of grain yield response to soil depth in soybean, maize, sunflower and wheat. *Agronomy Journal* 93: 577-583.
- Satorre, E.H. 2005. Cambios tecnológicos en la agricultura argentina actual. *Ciencia Hoy* 15: 24-31.
- Schnepf, R.D.; E. Dohlman and C. Bolling. 2001. Agriculture in Brazil and Argentina: Developments and prospects for major field crops. Page 85 Economic Research Service Agriculture and Trade Report. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Trigo, E.J.; E. Cap; V. Malach and F. Villarreal. 2009. The case of zero-tillage technology in Argentina. International Food Policy Research Institute.
- Trigo, E.J. and E.J. Cap. 2003. The impact of the introduction of transgenic crops in Argentinean agriculture. *AgBioForum* 6: 87-94.