

Modelado de distribución de las especies argentinas de *Smallanthus* (Asteraceae), el género del “yacón”: un cultivo potencial para la agricultura familiar

Vitali, Maira Soledad^{1,3} & Liliana Katinas^{1,2}

¹División Plantas Vasculares, Museo de La Plata, Paseo del Bosque s/n, 1900 La Plata, Buenos Aires, Argentina; ²Laboratorio de Morfología Comparada de Espermatófitas (LAMCE), Cátedra de Morfología Vegetal, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, calle 60 y 119, 1900 La Plata, Buenos Aires, Argentina; ³vitali@fcnym.unlp.edu.ar

Vitali, Maira Soledad; Liliana Katinas (2015) Modelado de distribución de las especies argentinas de *Smallanthus* (Asteraceae), el género del “yacón”: un cultivo potencial para la agricultura familiar. Rev. Fac. Agron. Vol 114 (Núm. Esp. 1): 110-121

Smallanthus connatus (este de Argentina) y *S. macroscyphus* (noroeste de Argentina), dos especies pertenecientes al género del yacón (Asteraceae), poseen un importante valor alimenticio y medicinal que, junto con su poca exigencia de crecimiento, constituyen cultivos potenciales para la agricultura familiar. Se llevó a cabo un estudio biogeográfico de distribución potencial mediante el método de Máxima Entropía en ambas especies, que permite analizar los factores ecológicos que las afectan y hallar áreas potenciales donde las especies aún no han sido muestreadas y que podrían considerarse como áreas de cultivo. Los resultados fueron estadísticamente significativos e indican que la estacionalidad del clima y las temperaturas promedio anuales son variables que afectan la distribución de ambas especies. La distribución de *Smallanthus macroscyphus* también depende de la estacionalidad de las precipitaciones y la de *S. connatus* de la temperatura en el mes más frío. Estos factores que limitan la distribución de estas especies deberían tenerse en cuenta al momento de planificar áreas para su cultivo.

Palabras clave: Compositae; *Smallanthus connatus*; *Smallanthus macroscyphus*; modelado de nicho; Maxent.

Vitali, Maira Soledad; Liliana Katinas (2015) Modeling the geographic distribution of the Argentine species of *Smallanthus* (Asteraceae), the “yacón” genus: a potential crop suitable for family farming. Rev. Fac. Agron. Vol 114 (Núm. Esp. 1): 110-121

Smallanthus connatus (eastern Argentina) and *S. macroscyphus* (northwestern Argentina), two species belonging to the yacón genus (Asteraceae), have an important nutritive and medicinal value which, together with their low requirements, constitute potential crops for family farming. A modeling of the potential geographic distribution of both species using the Maximum Entropy method was carried out. This method allows analyzing the environmental requirements of species and predict by mapping the areas where these requirements are met, and thus can assist in identifying areas for their cultivation. The results were statistically significant and indicate that temperature seasonality and mean annual temperature range are the most important variables affecting the distribution of the two species. The distribution of *Smallanthus macroscyphus* is also affected by the precipitation seasonality, whereas the minimum temperature of the coldest month affects the distribution of *S. connatus*. These distribution constraints should be taken into account when planning farming areas.

Key words: Compositae; *Smallanthus connatus*; *Smallanthus macroscyphus*; niche modeling; Maxent

Recibido: 11/04/2015

Aceptado: 26/08/2015

Disponible on line: 01/10/2015

ISSN 0041-8676 - ISSN (on line) 1669-9513, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, Argentina

INTRODUCCIÓN

La región Andina ha sido la cuna de una gran cantidad de plantas con raíces o tubérculos comestibles que fueron utilizados por sus habitantes desde la época precolombina. Ejemplo de ello son la ahípa [*Pachyrhizus ahípa* (Weddell) Parodi], la arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* Bancroft), la oca (*Oxalis tuberosa* Molina), la papa (*Solanum tuberosum* L.), el ulluco (*Ullucus tuberosus* Caldas), y el yacón [*Smallanthus sonchifolius* (Poeppig) Robinson]. Esta última especie pertenece al género americano *Smallanthus* Mackenzie con varias especies promisorias por sus diferentes usos y sus propiedades medicinales.

Smallanthus (Asteraceae), comprende 23 especies que se distribuyen desde los Estados Unidos hasta el centro-este de Argentina, con la mayor diversidad en Perú y México. El género se define por su hábito herbáceo, arbustivo o arbóreo, hojas opuestas trinervadas, receptáculo paleáceo, corolas del radio externamente pilosas en la base, papus ausente, cípselas marginales parcialmente cubiertas por las filarias internas del involucreo (Fig. 1) y raíces tuberosas (Fig. 2) (Vitali et al., 2015).

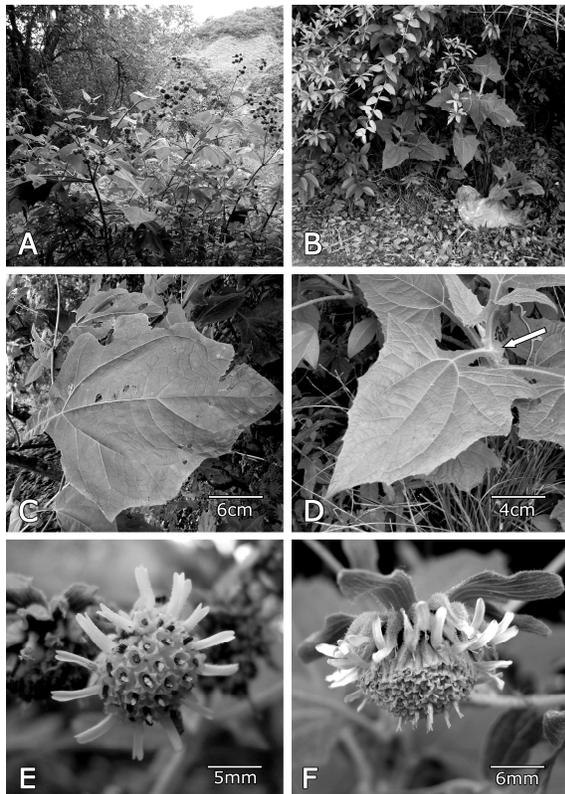


Figura 1. Características morfológicas de *Smallanthus macroscyphus* (Baker) A. Grau ex Sáenz y *S. connatus* (Sprengel) Robinson. A, C, E. *S. macroscyphus* A. Hábito. C. Detalle de hoja (con pecíolo alado connado en la base). E. Detalle del capítulo. Fotografías tomadas en Chicoana, Salta, por Diego G. Gutiérrez. B, D, F. *S. connatus* B. Hábito y tipo de

ambiente (disturbado, borde de camino). D. Detalle de hoja (la flecha blanca muestra el pecíolo alado connado en la base). F. Detalle del capítulo. Fotografías tomadas en el "camino negro" cerca de Punta Lara, Buenos Aires, por Diego G. Gutiérrez.

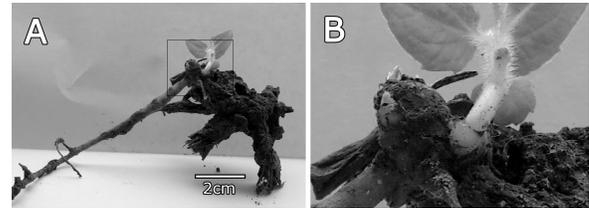


Figura 2. Raíz de *Smallanthus connatus* (cultivada), B detalle (zoom) de la región cuello-corona. Fotografía tomada por Maira Vitali.

A pesar de sus más de 20 especies ha sido sólo una de estas, *Smallanthus sonchifolius* (yacón), la que ha recibido amplia atención a nivel mundial. La capacidad del yacón de colonizar rápidamente áreas libres de vegetación podría ser una de las razones principales por las que esta planta se asoció desde épocas antiguas con los habitantes andinos. La agricultura típica del área de roza y quema en ciertos ambientes andinos que dejaba amplios espacios libres, proveyó al yacón del nicho perfecto para su crecimiento. Pronto los agricultores descubrieron las propiedades del yacón, el cual pasó de ser una maleza a una planta cultivada, propagada mediante la región cuello-corona, i.e., una porción superior de las raíces con una porción inferior del tallo (Grau & Rea, 1997) (Fig. 2B).

Hay dos factores que hacen del yacón un cultivo de gran relevancia: su valor comestible y sus propiedades medicinales. Las raíces tuberosas del yacón tienen sabor dulce y una textura tal que llevan a su consumo en forma cruda. Su uso se ha extendido por todo el mundo, con una gran variedad de productos derivados de sus raíces, como harinas, jugos, purés y endulzantes. Las hojas secas se consumen como té (Choque Delgado et al., 2013), siendo Brasil y Japón los mayores productores del "té de yacón" (Seminario et al., 2003). En contraste con otros cultivos tuberosos que poseen un gran contenido de almidón, el yacón contiene fructooligosacáridos, inulina y compuestos fenólicos que aumentan el crecimiento de bifidobacterias en el colon, mejoran la absorción de minerales y el metabolismo gastrointestinal, y juegan un rol fundamental en la regulación del colesterol. Por ello, el yacón ha sido incluido dentro de los alimentos funcionales (Choque Delgado et al., 2013). Se ha demostrado también el efecto hipoglucémico de extractos de hojas de yacón (Aybar et al., 2001), en el tratamiento de problemas renales y como prebiótico (Lachman et al., 2003). Hojas y raíces del yacón son actualmente utilizadas en la zona del altiplano por personas que padecen trastornos digestivos, renales y diabetes (Sánchez & Genta, 2007). A pesar de la importancia de este cultivo, sólo recientemente se han

realizado estudios integrales del género *Smallanthus* (Vitali, 2014; Vitali & Viera Barreto, 2014; Vitali et al., 2015). Actualmente en nuestro país crecen en forma natural dos especies de *Smallanthus*: *S. macroscyphus* (Baker) A. Grau ex Sáenz en las Yungas del noroeste de Argentina y Bolivia, en Misiones y en el sudeste de Brasil y Paraguay y *S. connatus* (Sprengel) Robinson [antes conocida como *Polymnia connata* (Sprengel) Blake] en el este de Argentina, sur de Brasil, Paraguay y Uruguay (Fig. 3).

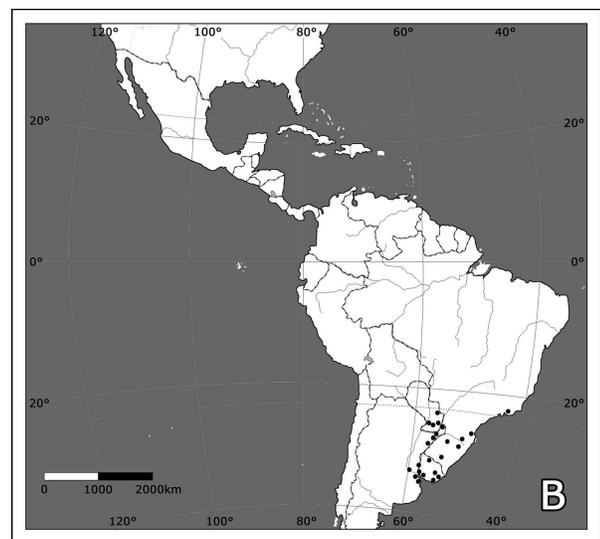
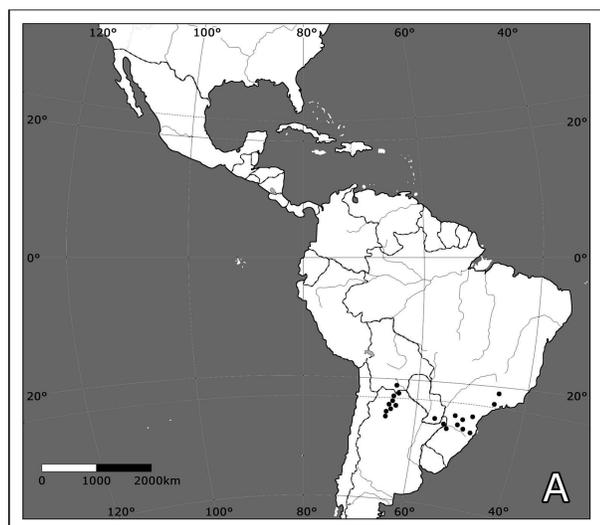


Figura 3. Distribución geográfica actual de las dos especies en estudio. A. *Smallanthus macroscyphus*. B. *S. connatus*.

Algunos autores (Grau & Rea, 1997) han postulado que también *S. sonchifolius*, el yacón, habitó en el pasado áreas extensas del noroeste argentino pero actualmente solo existe en cultivos familiares de algunas localidades de Salta y Jujuy, donde se

consideró en algún momento que estarían en peligro de extinción (Zardini, 1991). Sin embargo, actualmente existen distintas iniciativas para su conservación por ejemplo, en estaciones del INTA en Salta, Universidad de Tucumán y Universidad de Buenos Aires (Grau & Rea, 1997; Clausen et al., 2008).

Smallanthus macroscyphus y *S. connatus* muestran una clara preferencia por los ambientes modificados, como barrancas de ríos, terrenos baldíos, bordes de caminos, claros de vegetación y campos de cultivo abandonados. Estas estrategias de colonización muestran por qué especies de este género se han asociado en forma natural desde épocas tempranas con el hombre.

Ambas especies, al igual que el yacón, presentan raíces tuberosas que almacenan compuestos bioactivos como fructooligosacáridos, ácido kaurenico y derivados. Se ha sugerido que con estos compuestos se podrían elaborar preparados fitoterápicos análogos a los provenientes del yacón, o estas especies utilizarse en cruzamientos con el yacón para mejorar su rendimiento o mejorar el contenido de compuestos bioactivos (Coll Aráoz et al., 2010; Ebber, 2011). Algunas investigaciones demuestran que *S. connatus* tiene un contenido de inulina muy superior al del yacón (Kinupp, 2007) (Tabla 1). Estas y otras especies podrían tener también algún tipo de valor aún no investigado, por ejemplo, su uso como alimento funcional en ganadería. Un dato interesante es que, si las condiciones de crecimiento son óptimas, el crecimiento de *S. macroscyphus* y *S. connatus* es rápido a partir de coronas y semillas y no requiere de cuidados especiales, factores que llevaron a considerarlas primero como malezas como es el caso de *S. connatus* en la provincia de Buenos Aires.

Estos alimentos con importantes propiedades nutritivas y medicinales, con muy pocos requerimientos ecológicos para su desarrollo y de fácil propagación, requieren un foco de atención como potenciales cultivos no convencionales. Podrían por ejemplo establecerse en áreas con deficiencias nutricionales donde pueden formar parte de las agriculturas familiares. La agricultura familiar es la que tiene como uso prioritario la fuerza de trabajo familiar, con acceso limitado a recursos de tierra y capital así como uso de múltiples estrategias de supervivencia y de generación de ingresos (Secretaría General de la Comunidad Andina, 2011). Según Rapoport & Ladio (1999) en numerosas comunidades rurales o suburbanas el uso de plantas silvestres está sufriendo un proceso de abandono. Estos autores afirman que diversos factores sociológicos y ecológicos contribuyen al abandono de estos recursos naturales. Entre estos factores se destacan la falta de hábitos alimenticios que en las antiguas sociedades tradicionales eran transmitidos oralmente, y el desconocimiento en la identificación de plantas ruderales que estarían disponibles para su consumo (Carneiro, 2004). Según Dam (1984) es necesaria una fuerte campaña educativa para cambiar los hábitos alimenticios, posibilitando el aprovechamiento de recursos más nutritivos y que pueden ser obtenidos de plantas locales. Estas plantas pueden cultivarse a escalas locales (dado su crecimiento rápido y de bajo costo), y también convertirse en una fuente laboral de explotación local

Tabla 1. Usos de las especies de *Smallanthus* (Asteraceae) nativas de Argentina con la fuente de información de donde se obtuvieron los datos, la distribución geográfica y sus nombres vulgares.

| Especie | Usos | Fuente de información | Distribución | Nombre vulgar |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| <i>S. connatus</i> (Sprengel) Robinson | Hojas: hipoglucemiante. Raíces: hipoglucemiante, analgésica, antitumoral, anti-HIV, antimicrobiana, antiinflamatoria. Semillas: combustible. | Bibliografía: Coll Aráoz et al. (2012), Vitali et al. (2015) | Brasil, Paraguay, Uruguay y Argentina | Girasolcito, jaguarete, ka'a, yacón-gaúcho, yacón-nativo |
| <i>S. macroscyphus</i> (Baker) A. Grau ex Sáenz | Hipoglucemiante, antitumoral, antimicrobiano, antifúngico, antiinflamatorio | Bibliografía: Cabrera et al. (2006); Ebber (2011) | Argentina , Paraguay, Bolivia y Brasil | Yacón de campo |

(por las condiciones ambientales que el cultivo requiere) para su uso en industrias nacionales tales como la farmacéutica. En la última década se ha prestado mayor atención a estas problemáticas y en diciembre de 2014, año declarado de la Agricultura Familiar, fue sancionada la Ley 27.118 de Reparación histórica de la Agricultura Familiar para la construcción de una nueva ruralidad en la Argentina la cual fue promulgada en enero de 2015. La aplicación de dicha Ley permitirá mejorar las condiciones de vida y de trabajo de los agricultores familiares de nuestro país.

Asimismo, el cambio climático y la crisis mundial de alimentos llevan a mirar con atención la vulnerabilidad, insostenibilidad e inequidad social de la agricultura y la producción de alimentos. La amenaza del cambio climático global ha causado preocupación entre los científicos ya que los factores climáticos indispensables para el crecimiento de los cultivos, como precipitación y temperatura, se verán severamente afectados e impactarán en la producción agrícola (Altieri & Nicholls, 2009). Los múltiples beneficios que genera la práctica de la agricultura familiar contribuyen no sólo a la seguridad y soberanía alimentaria de los países sino también a la conservación de la biodiversidad y a la mitigación y adaptación al cambio climático. En este contexto, especies de *Smallanthus* exhaustivamente analizadas en su composición química y en su utilidad, no se han investigado desde el punto de vista biogeográfico. ¿Dónde podrían encontrarse ejemplares de *Smallanthus* que aún no se han colectado? ¿Cuáles son los ambientes propicios para el cultivo de estas especies? ¿Podría ampliarse el rango actual de distribución de estas especies para su uso agrícola? ¿Sus altos (estenoicas) o bajos (euricoicas) requerimientos ecológicos afectan su amplia (euricoras) o restringida (estenocoras) distribución geográfica? Estos son algunos de los interrogantes que no tienen aún respuesta. El objetivo de este trabajo es un intento de responder estas preguntas mediante la aplicación del enfoque biogeográfico de modelado de nicho

ecológico usando Maxent. Este método permite analizar los factores ecológicos climáticos asociados a distintas poblaciones de determinada especie y que las influyen en distintos grados y modos. Esta información posibilita proyectar a nivel geográfico el área que ocupa o que puede ocupar la especie, es decir permite hallar las áreas potenciales donde las especies aún no han sido muestreadas (Peterson, 2001, 2006). De esta manera se identificarán posibles áreas de distribución para *Smallanthus macroscyphus* y *S. connatus* con el objeto de estimar lugares potenciales para su cultivo.

METODOLOGÍA

La taxonomía de las dos especies argentinas en estudio, *Smallanthus macroscyphus* y *S. connatus*, corresponde a Vitali et al. (2015).

Como área de estudio para el modelado de nicho se considerará todo el territorio de la Argentina. Para modelar las distribuciones potenciales de las especies, se aplicará el método de Máxima Entropía (Maxent) (Phillips et al., 2006) mediante el programa Maxent versión 3.2 (<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>), dado que sólo requiere registros de presencia de las especies, y resulta más eficiente que otros métodos similares (Elith & Graham, 2006). Maxent genera, a partir del área de estudio, una distribución de probabilidad de ocurrencia para la especie, sobre la base de registros puntuales y variables climáticas. Los registros de localidades se obtuvieron de bibliografía específica, especímenes de herbario, colecciones a campo y base de datos disponibles online (GBIF, <http://www.gbif.org/>). Se generó una base de datos de 93 localidades georreferenciadas para ambas especies, 36 para *S. macroscyphus* y 57 para *S. connatus*. Las capas de variables climáticas fueron obtenidas de la base de datos Worldclim (Hijmans et al., 2005) que usa las 19 variables de Bioclim (Busby, 1991) (Tabla 2).

Tabla 2. Los 19 parámetros climáticos usados en el modelado.

| Número de variable | Descripción de la variable |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------|
| BIO1 | Temperatura promedio anual |
| BIO2 | El promedio mensual de los rangos diurnos (temp max – temp min) |
| BIO3 | Isotermalidad (BIO1/BIO7) * 100 |
| BIO4 | Estacionalidad en temperatura (desviación estándar * 100) |
| BIO5 | Temperatura máxima en el mes más caluroso |
| BIO6 | Temperatura mínima en el mes más frío |
| BIO7 | Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6) |
| BIO8 | Temperatura promedio del trimestre más húmedo |
| BIO9 | Temperatura promedio del trimestre más seco |
| BIO10 | Temperatura promedio del trimestre más caluroso |
| BIO11 | Temperatura promedio del trimestre más frío |
| BIO12 | Precipitación anual |
| BIO13 | Precipitación en el mes más húmedo |
| BIO14 | Precipitación en el mes más seco |
| BIO15 | Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación) |
| BIO16 | Precipitación en el trimestre más húmedo |
| BIO17 | Precipitación en el trimestre más seco |
| BIO18 | Precipitación en el trimestre más caluroso |
| BIO19 | Precipitación en el trimestre más frío |

Estas variables fueron importadas al programa Maxent y a partir de esta información se modeló la distribución natural potencial de las especies en un mapa. Posteriormente se analizó la contribución porcentual de cada variable al modelo. Se aplicó el test de Jackknife para AUC (*Area Under the Curve*) para medir la importancia de cada variable en el desarrollo del modelo. Se efectuó el análisis de Curva Operada por el Receptor (ROC, *Receiver Operating Curve*) para la cual el área bajo la curva (AUC) es considerada un indicador efectivo del comportamiento del modelo (Manel et al., 2001). Según este análisis, un modelo es considerado como bueno si la línea de prueba se ubica cerca del tope superior izquierdo, dado que tiene mayor capacidad de predecir las presencias contenidas en la muestra de prueba de datos. Se obtiene una curva de sensibilidad vs. especificidad con un rango de valores desde 0,5 (al azar) a 1,0 (discriminación perfecta). Usualmente valores de AUC de 0,5-0,7 = confiabilidad baja, 0,7-0,9 = aplicación útil del modelo, mayor que 0,9 = confiabilidad alta del modelo. Se analizaron las curvas de respuesta correspondientes a las variables que resultaron con los valores más altos de Jackknife. Estas curvas muestran como cada variable climática cambia la probabilidad de presencia de la especie manteniendo el resto de las variables en su valor promedio.

RESULTADOS

Predicción de la distribución de *Smallanthus macroscyphus* y *S. connatus*

Se obtuvo la distribución potencial de cada una de las especies muestreadas con las condiciones bioclimáticas que mejor se adaptan a su nicho ecológico (Fig. 4).

La distribución para *S. macroscyphus* resultó más amplia respecto del área conocida que ocupa actualmente. Existe un 70-90 % de probabilidad de hallar individuos de esta especie en departamentos centrales de las provincias de Jujuy, Salta, y Tucumán, y un 50 % de encontrarla en el noroeste de Santiago del Estero y noreste de Catamarca, provincias donde hasta ahora no ha sido colectada de acuerdo a la información de material de herbario y a la bibliografía (Freire et al., 2005, 2012), y también en el norte de Jujuy más allá de la línea de las Yungas. En el caso de *S. connatus*, también se amplía su área de distribución ya que el modelo predice con un 77 % de probabilidad de llegaría hasta la zona de Cabo San Antonio, cerca de Mar de Ajó en la provincia de Buenos Aires. Hasta el momento había sido mencionada para los partidos de Baradero, Beriso, Ensenada, Isla Martín García, La Plata, Magdalena, Punta Indio, Quilmes, San Fernando y Tigre (Cabrera et al., 2000; Vitali et al., 2015; obs. pers.); la localidad más austral de la provincia en que fue colectada es Punta Piedras, cerca de Verónica (partido de Punta Indio). También existe un 50 % de probabilidad de hallar esta especie en gran parte del territorio de la provincia de Entre Ríos y de Corrientes.

Contribución de las variables climáticas al modelo

Las dos variables que más contribuyeron al modelo Maxent para *S. macroscyphus* fueron Bio 19 (22,9 %) y Bio 18 (20,4 %), seis variables contribuyeron con valores menores de porcentaje (Tabla 3) y el resto de las variables tuvieron un 0% de contribución.

Las dos variables que más contribuyeron al modelo para *S. connatus* fueron Bio 4 (40,4 %) y Bio 14 (32,1 %), 10 variables contribuyeron con valores menores de porcentaje (Tabla 4) y el resto de las variables tuvieron un 0% de contribución.

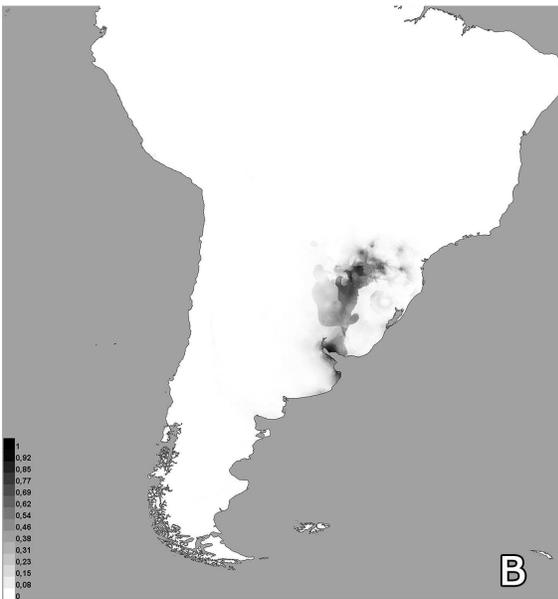
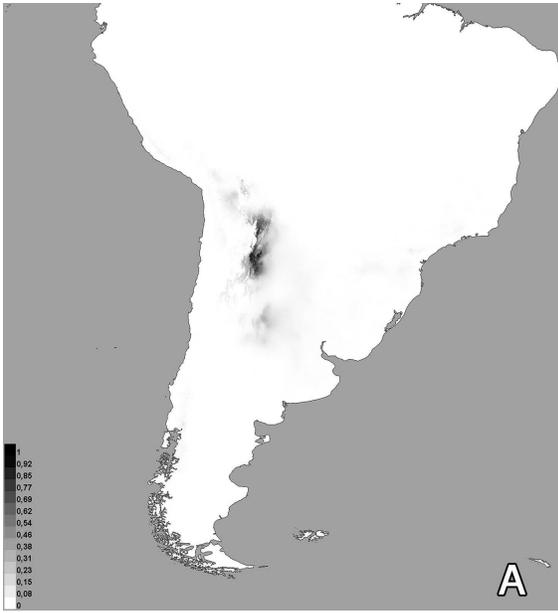


Figura 4. Distribución geográfica potencial resultante de la aplicación del método Maxent. A. *Smalanthus macroscyphus*. B. *S. connatus*. El color negro indica áreas con una alta probabilidad de ocurrencia de las especies, los tonos de grises del más oscuro al más claro indican mayor a menor probabilidad de ocurrencia respectivamente, y el color blanco significa que esas áreas no son apropiadas para la ocurrencia de las especies.

Tabla 3. Porcentaje de contribución relativa al modelo Maxent de las variables climáticas para *S. macroscyphus*.

| Variable | Contribución porcentual |
|----------|-------------------------|
| Bio 19 | 22,9 |
| Bio 18 | 20,4 |
| Bio 15 | 10 |
| Bio 5 | 9,7 |
| Bio 7 | 0,9 |
| Bio 6 | 0,9 |
| Bio 8 | 0,1 |
| Bio 3 | 0,1 |

Tabla 4. Porcentaje de contribución relativa al modelo Maxent de las variables climáticas para *S. connatus*.

| Variable | Contribución porcentual |
|----------|-------------------------|
| Bio 4 | 40,4 |
| Bio 14 | 32,1 |
| Bio 7 | 10,5 |
| Bio 8 | 5,1 |
| Bio 9 | 4,3 |
| Bio 3 | 2,3 |
| Bio 15 | 1,9 |
| Bio 10 | 1,4 |
| Bio 5 | 1 |
| Bio 17 | 0,6 |
| Bio 2 | 0,4 |
| Bio 6 | 0,1 |

Comportamiento del modelo (ROC) y estimación de las variables más importantes (Jackknife)

La evaluación del comportamiento del modelo mediante el análisis ROC aplicado a ambas especies determinó que la línea de prueba es de 0,998 para *S. macroscyphus*, y de 0,987 para *S. connatus*, lo que indica una alta confiabilidad del comportamiento del modelo.

Las variables que por sí solas predijeron de manera más efectiva, es decir con los valores más altos, la distribución de los datos (Jackknife AUC) (Fig. 5) para *S. macroscyphus* fueron la estacionalidad en temperatura (Bio 4) = 0,97, la isothermalidad (Bio 3) = 0,96 y la estacionalidad de la precipitación (Bio 15) = 0,95. En el caso de *S. connatus* las variables con mayores valores fueron el rango anual de temperatura (Bio 7) = 0,94, la estacionalidad en temperatura (Bio 4) = 0,94 y la temperatura mínima en el más frío (Bio 6) = 0,93.

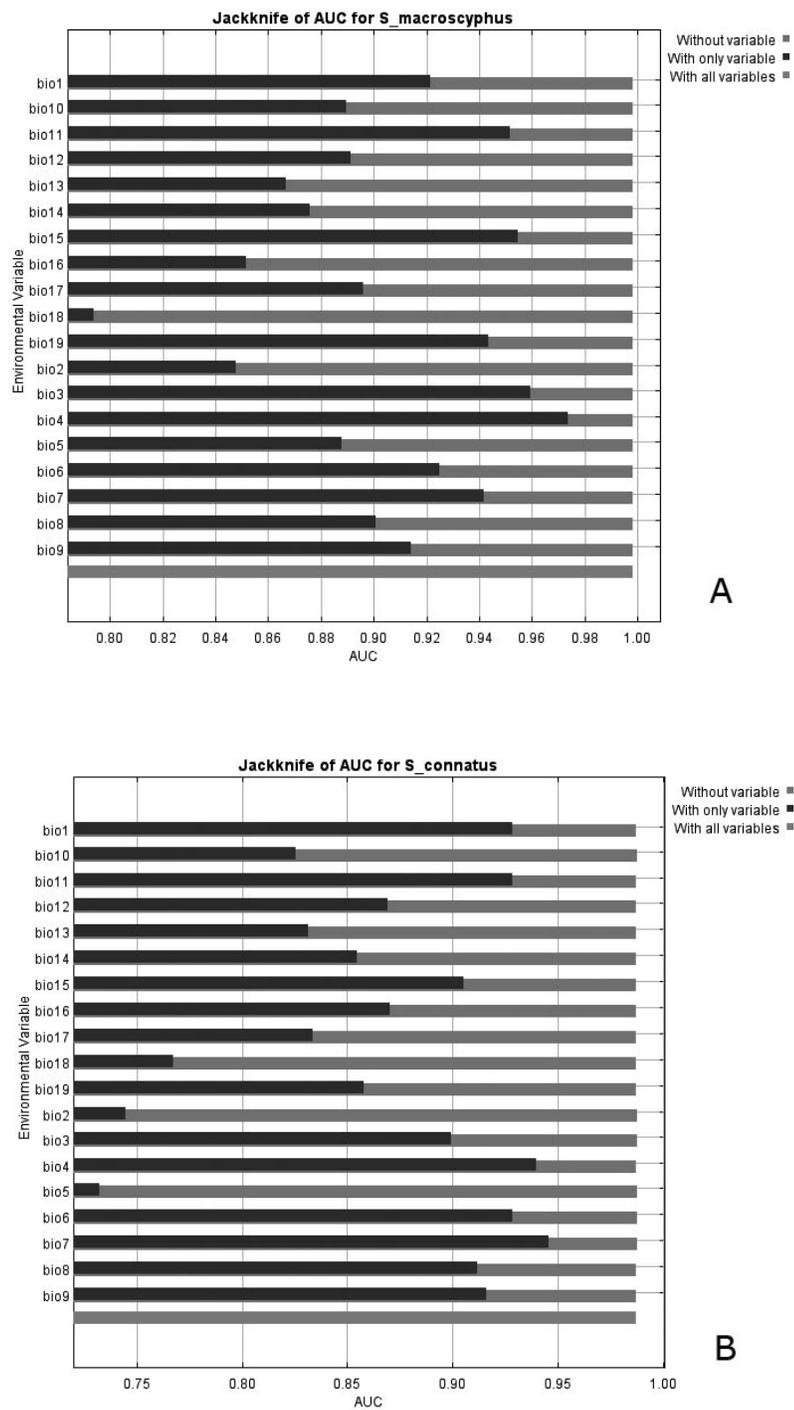


Figura 5. Test de Jackknife (AUC) de la importancia de las variables climáticas (barras oscuras) en el modelado Maxent en relación a todas las variables (barra inferior). A. *Smallanthus macroscyphus*. B. *S. connatus*. La longitud de la barra gris oscuro muestra el grado de estimación de la importancia de cada variable en la distribución de las especies.

Curvas de respuesta de las variables más importantes

Para *S. macroscyphus* la probabilidad de presencia de esta especie se mantiene constante con una probabilidad de 0,66 con los cambios de isothermalidad (Bio 3; Fig. 6 A). La probabilidad de presencia respecto de la estacionalidad en temperatura (Bio 4; Fig. 6 B) en las curvas de respuesta, aumenta de 0 hasta hacerse máxima (0,67) con valores relativamente medios de estacionalidad mientras que con valores mayores vuelve a disminuir. Finalmente para la estacionalidad de la precipitación (Bio 15; Fig. 6 C) la probabilidad de presencia es muy baja con valores bajos de estacionalidad y aumenta gradualmente hasta hacerse máxima (0,86) con valores de estacionalidad altos.

Para *S. connatus* se observa en las curvas de respuesta que la probabilidad de presencia máxima (0,62) respecto de la estacionalidad de temperatura (Bio 4; Fig. 6 D) se mantiene constante hasta valores relativamente medios y por sobre estos valores la probabilidad disminuye abruptamente hasta hacerse 0. En el caso de la temperatura mínima en el mes más frío (Bio 6; Fig. 6 E) la probabilidad de presencia de la especie se hace máxima a los 0°C y gradualmente disminuye hasta llegar a un valor mínimo después de los 23 °C.

La probabilidad de presencia de esta especie se mantiene prácticamente en 0 cuando el rango anual de temperatura (Bio 7; Fig. 6 F) está entre los 5° C y 10° C, por encima de estos valores la probabilidad comienza a

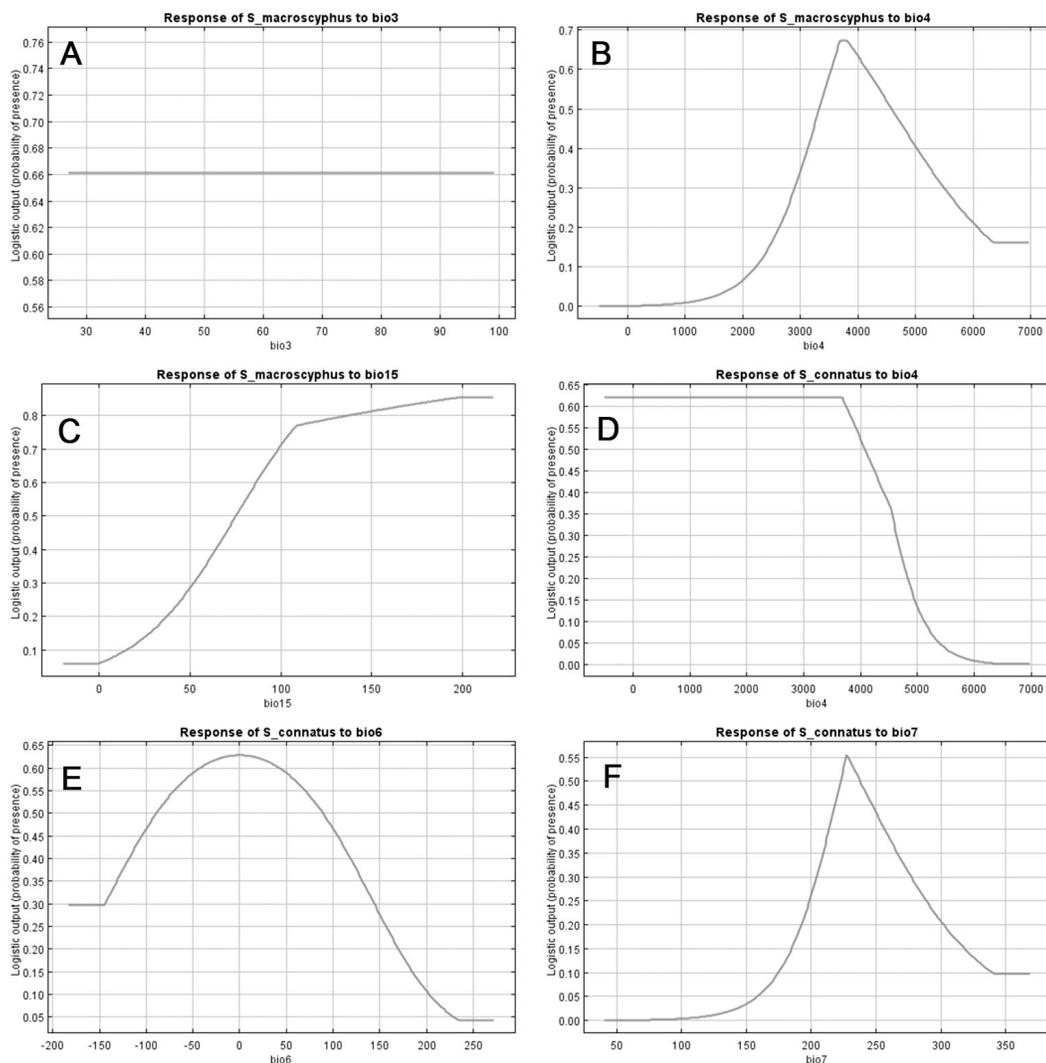


Figura 6. Curvas de respuesta del Maxent de las variables seleccionadas de acuerdo a los resultados de Jackknife que indican cuáles son aquellas variables que más afectan la distribución de las especies en estudio. A-C. *Smallanthus macroscyphus*. A. Isothermalidad (Bio 3, expresada en %). B. Estacionalidad en temperatura (Bio 4, expresada en %). C. Estacionalidad de la precipitación (Bio 15, expresada en mm3). D-F. *S. connatus*. D. Estacionalidad en temperatura (Bio 4, expresada en %). E. Temperatura mínima en el mes más frío (Bio 6, expresada en °C x 10). F. Rango anual de temperatura (Bio 7, expresada en °C x 10). El eje X indica la variación del valor climático y el eje Y indica la probabilidad de hallar la especie de interés en un área de acuerdo al valor del parámetro.

aumentar haciéndose máxima (0,55) cerca de los 23° C, y a valores superiores de temperatura disminuye progresivamente.

Muchas curvas de respuesta dieron como resultado líneas horizontales, es decir que no importa cuánto se modifique la variable, la presencia de la especie se mantiene constante (siempre teniendo en cuenta que las otras variables se mantienen en su valor promedio). Estas variables fueron: 1) para *Smallanthus macroscyphus* con valores de 0,66 las Bio 1, Bio 2, Bio 3, Bio 9, Bio 10, Bio 11, Bio 12, Bio 13, Bio 14, y Bio 17; y 2) para *S. connatus* con valores de 0,53 las Bio 1, Bio 5, Bio 11, Bio 12, Bio 13, Bio 14, Bio 16, Bio 17, Bio 18 y Bio 19.

DISCUSIÓN

El modelado de nicho ecológico, aplicado por primera vez al género *Smallanthus*, ha mostrado áreas potenciales donde poblaciones de *Smallanthus macroscyphus* y *S. connatus* no han sido aún halladas pero que cumplirían con los requerimientos ecológicos de estas especies. De este modo, se amplía el área posible de cultivo para estas especies, respondiendo a las preguntas planteadas en la Introducción de este trabajo.

¿Dónde podrían encontrarse ejemplares de *Smallanthus* que aún no se han colectado?

Los resultados indican altas probabilidades (77 %) de una ampliación de la distribución espacial de ambas especies en nuevas áreas de Jujuy, Salta y Tucumán para el caso de *S. macroscyphus*, y más hacia el sur por gran parte de la costa bonaerense en la provincia de Buenos Aires para *S. connatus*. La extensión de distribución de ambas especies es aún más amplia si se considera una probabilidad del 50 %, en áreas por fuera de la zona de las Yungas, alejada de su distribución típica de bosque montano donde llega hasta los 2200 m de altitud para *S. macroscyphus*, y gran parte de la región mesopotámica para *S. connatus*. En estas áreas se hallarían entonces las condiciones apropiadas para el crecimiento de las especies.

¿Cuáles son los ambientes propicios para el cultivo de estas especies?

De acuerdo a los resultados, el factor climático que influye en la distribución de *S. macroscyphus* y *S. connatus* es la estacionalidad de la temperatura (Bio 4, medida como la desviación estándar de las temperaturas promedio mensuales expresada como un porcentaje de la media anual), aunque las afecta de distintas formas. En el caso de *S. macroscyphus*, los climatogramas de la región de las Yungas, bajo un clima subtropical serrano cálido y húmedo, muestran temperaturas medias entre 15-20°C con marcadas amplitudes térmicas diarias y anuales. Por ejemplo para Yungas de Jujuy, las temperaturas máximas medias son de 23,5°C y las mínimas de 10°C (Cabrera, 1976). *Smallanthus macroscyphus* aumenta su probabilidad de presencia con valores intermedios de estacionalidad (Fig. 6, A). El otro factor climático que afecta la distribución de esta especie es la isothermalidad (Bio 3),

que indica cuán grande es la oscilación de temperatura día-noche en comparación con la oscilación verano-invierno. Un valor de 100 representaría un sitio donde el rango de temperatura diurna es igual al rango de temperatura anual; un valor de 50 indica un lugar donde el rango diurno de temperatura es la mitad del rango anual de temperatura (Williams, 2007). El rango anual de temperatura en las Yungas va de más de 40°C en el verano a unos 10°C en el invierno. Según la curva de respuesta, a medida que la isothermalidad cambia y el resto de las variables se mantienen en su valor promedio, la probabilidad de presencia de *S. macroscyphus* es constante. En cambio, cuando se analiza esta variable independiente de las otras, la distribución muestra un pico máximo en un valor de 55, lo que implicaría una temperatura óptima de 20-25°C para su crecimiento. Esto coincide con las isothermas de 18°-22°C que atraviesan el área. Se sabe que para el yacón (*S. sonchifolius*), que ocupa áreas muy parecidas a las de *S. macroscyphus* hay daño de las partes aéreas a -1°C y que la temperatura óptima para su desarrollo ronda entre los 18-25°C, tolerando aún mayores temperaturas (arriba de 40°C) (Grau & Rea, 1997).

Otra variable es la estacionalidad de la precipitación (Bio 15, medida como la desviación estándar de la precipitación mensual, expresada como porcentaje de la media anual). La precipitación anual en las Yungas es del orden de 900-1.000 mm³, alcanzando en algunos parajes los 1.300 mm³. Las lluvias se concentran a lo largo de cinco a seis meses y son preferentemente en el verano, mientras que los inviernos son muy secos (mayo a septiembre). Durante los meses más fríos, la condensación y captación del agua de las neblinas que caracterizan a estas selvas nubladas, compensan en parte la ausencia de lluvias. La curva de respuesta para esta variable muestra un ascenso gradual hacia los mayores valores de estacionalidad, indicando una preferencia por las condiciones húmedas, es decir las áreas donde la sequía de invierno está más atenuada.

Smallanthus connatus es una especie que habita desde las costas del centro-este de la provincia de Buenos Aires hacia el norte del país, siempre asociada a ambientes higrófilos. Esta distribución incluye las provincias fitogeográficas Pampeana, del Espinal y Paranaense (Cabrera, 1976) donde el clima es de tipo templado. La curva de estacionalidad de temperatura (Bio 4) para esta especie es muy distinta a la de *S. macroscyphus*, pues su presencia se mantiene constante con valores bajos a medios y luego desciende abruptamente a medida que los valores de estacionalidad aumentan, mostrando una preferencia de hábitat donde los cambios de temperatura son moderados. La otra variable que afecta la distribución de esta especie de acuerdo a los valores de Jackknife es el rango anual de temperatura (Bio 7, temperatura máxima en el mes más caluroso – temperatura mínima en el mes más frío), cuyos valores ideales de acuerdo a la curva de respuesta están entre los 20° y 25°C. Para una localidad costera como por ejemplo, Pinamar (provincia de Buenos Aires), el rango anual de temperatura media varía alrededor de los 20°C para los meses de diciembre a marzo, y es de 8,6°-16°C para el resto del año (datos de climate-date.org). A diferencia de *S. macroscyphus*, la variación en las precipitaciones

parece no afectar tanto la distribución de *S. connatus* probablemente por el clima húmedo que predomina en el área de ocupación de esta última. Estas diferencias podrían reflejarse en la morfología de las raíces tuberosas, muy desarrolladas en *S. macroscyphus* (15-30 cm long x 1-3 cm diam), constituyendo así una buena reserva de agua, mientras que son delgadas en *S. connatus* (Fig. 2). Finalmente un tercer factor que parece afectar la distribución de *S. connatus* es la temperatura mínima en el mes más frío (Bio 6). La curva de distribución muestra que las mejores condiciones para la presencia de esta especie son aquellas donde las temperaturas mínimas en los meses de mayo a agosto oscilan en el rango de los -10° y 10°C , recordando que la mínima media por ejemplo para Junín, provincia de Buenos Aires, es de $10,3^{\circ}\text{C}$ y la mínima absoluta es de -6°C (Cabrera, 1976). Las heladas de invierno producen daños en la parte aérea de las plantas de *S. connatus*.

¿Podría ampliarse el rango actual de distribución de estas especies para su uso agrícola?

De acuerdo con los resultados aquí obtenidos podría ampliarse el rango geográfico de las dos especies para su cultivo. Deben aún hacerse pruebas sobre la técnica de cultivo más apropiada para estas especies. Algunos resultados en *S. macroscyphus* (Grau & Slanis, 1996) muestran que a pesar de la gran fertilidad del polen y de la producción de semillas, la dura cubierta de los frutos inhibe en cierto grado la germinación. También las temperaturas relativamente bajas ($12-15^{\circ}\text{C}$) pueden disminuir el grado de germinación de las semillas (Mayta et al., 1995). Las sequías podrían comprometer la productividad como sucede en el yacón (Grau & Rea, 1997), pero deben realizarse estudios para corroborar si esto es así en las especies en estudio. Como ya ha sido mencionado, el yacón se propaga principalmente mediante coronas (Seminario Cunya, 2008), y también este podría ser el método más apropiado para cultivar a estas dos especies aunque recientemente se han realizado trabajos sobre la producción de semillas en el yacón (Manrique et al., 2014).

¿Sus requerimientos ecológicos altos (estenoicas) o bajos (euricoicas) afectan su distribución geográfica amplia (euricoras) o restringida (estenocoras)?

Las curvas de respuesta mostraron que 10 de las 19 variables de Bioclim tomadas en cuenta para realizar el modelado de nicho, se definen como una línea horizontal y por lo tanto no tienen efecto en la probabilidad de presencia de *S. macroscyphus* y de *S. connatus*. Estas variables son distintas para cada especie. La mayoría de las restantes variables muestran curvas amplias que sugieren una buena tolerancia a los factores climáticos.

Estos resultados junto con las observaciones de campo de los lugares de recolección de los individuos, en general ambientes disturbados asociados al hombre, podrían indicar que las dos especies son poco exigentes y toleran bien las variaciones ambientales, es decir que son euricoicas. Sin embargo, los mapas de la Fig. 3 muestran estenocoria, es decir una distribución geográfica relativamente restringida en Argentina que no parece aumentar demasiado en los mapas

obtenidos con el modelado de nicho ecológico (Fig. 4). Esto podría indicar que los factores climáticos arriba mencionados tienen un gran efecto en la distribución de ambas especies pues son clave para su desarrollo y por lo tanto deberían tenerse en cuenta al momento de planificar áreas para su cultivo.

CONCLUSIONES

Smallanthus macroscyphus, del noroeste de Argentina, y *S. connatus*, del este argentino, son dos especies pertenecientes al género del yacón y que, como éste, poseen importantes propiedades medicinales y alimenticias. Ello, sumado a su preferencia por los ambientes antrópicos sugieren la posibilidad de su uso en la agricultura familiar.

A pesar de su escasa exigencia ambiental, la distribución actual y potencial de ambas especies es bastante restringida, indicando que ciertos factores del ambiente establecen un límite importante en su distribución geográfica. De acuerdo con el modelado llevado a cabo aquí, la variación de la temperatura a lo largo del año (estacionalidad e isothermalidad) y las sequías invernales podrían ser los factores que limitan la distribución de *Smallanthus macroscyphus*. Para *S. connatus* la estacionalidad de la temperatura también es uno de los factores climáticos limitantes en su distribución así como rangos anuales de temperatura por fuera de los 20° y 25°C y las bajas temperaturas invernales con las consecuentes heladas. Estos factores deberían entonces tenerse en cuenta al momento de elegir regiones para su potencial cultivo. Estos resultados tienen también relevancia desde el punto de vista de la conservación de biodiversidad si en un futuro se planean áreas para la protección de estas especies teniendo en cuenta, por ejemplo, que se ha postulado a *S. macroscyphus* como uno de los posibles ancestros del yacón (Frías de Fernández et al., 2000). Para finalizar es importante destacar que cualquier modelo exige prudencia en su planteamiento, pues se corren riesgos de interferencias falaces procedentes de aspectos no pertinentes, de distorsiones del modelo o de omisión de características importantes de la realidad como, por ejemplo en este caso, la interacción con factores edáficos, bióticos y antrópicos, además de los climáticos. La función de los modelos no es encontrar respuestas sobre la naturaleza sino proporcionar una hipótesis acerca de la estructura de la misma. En otras palabras, los modelos proporcionan hipótesis plausibles no demostraciones (Crisci, 1985).

Agradecimientos

Agradecemos la lectura crítica del manuscrito a María José Apodaca y a Jorge Crisci, y al editor y revisores por las sugerencias. Este trabajo fue realizado con los subsidios otorgados por la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT).

BIBLIOGRAFÍA

- Altieri, M.A. & C.I. Nicholls.** 2009. Cambio climático y agricultura campesina: Impactos y respuestas adaptativas. LEISA Revista de Agroecología 24: 5-9.
- Aybar, M.J., A.N. Sánchez Riera, A. Grau & S.S. Sánchez.** 2001. Hypoglycemic effect of the water extract of *Smallanthus sonchifolius* (yacón) leaves in normal and diabetic rats. Journal of Ethnopharmacology 74: 125-132.
- Busby, J.R.** 1991. BIOCLIM- a bioclimate analysis and prediction system. En: Nature conservation: cost effective biological surveys and data analysis. Margules, C.R. & M.P. Austin, Eds. CSIRO, Canberra, ACT, Australia, pp. 64-68
- Cabrera, A.L.** 1976. Regiones fitogeográficas Argentinas. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería. Fascículo I. Editorial Acme S.A.C.I., Buenos Aires, Argentina.
- Cabrera, A.L., J.V. Crisci, G. Delucchi, S.E. Freire, D.A. Giuliano, L. Iharlegui, L. Katinas, A.A. Sáenz, G. Sancho & E. Urtubey.** 2000. Catálogo ilustrado de las Compuestas (= Asteraceae) de la provincia de Buenos Aires, Argentina: sistemática, ecología y usos. PROBIOTA 1: 1-136.
- Cabrera, W., A. De Pedro, M. Perotti, A. Grau, C. Catalán, S. Genta & S. Sánchez.** 2006. Actividad hipoglucemiante de las hojas de *Smallanthus macroscyphus*. Identificación del principio activo. XXIII Jornadas Científicas, Asociación de Biología de Tucumán, San Miguel de Tucumán, Argentina. p. 248.
- Carneiro, A.M.** 2004. Espécies ruderais com potencial alimentício em quatro municípios do Rio Grande do Sul. Tese Doutorado. Instituto de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 111 pp.
- Choque Delgado, G.T., W.M.C. Tamashiro, M.R. Maróstica Junior & G.M. Pastore.** 2013. Yacón (*Smallanthus sonchifolius*): a functional food. Plant Foods for Human Nutrition 68: 222-228.
- Clausen, A.M., M.E. Ferrer & M. B. Formica** (eds.) 2008. Informe nacional sobre el estado de los recursos fitogenéticos para la agricultura y la alimentación, Argentina. Comisión de Recursos Genéticos para la Alimentación y la Agricultura, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Argentina. <http://www.fao.org/docrep/013/i1500e/argentina>.
- Coll Aráoz, M.V., M.I. Mercado, A. Grau & C.A.N. Catalán.** 2010. Ent-kaurene derivatives from the root cortex of yacón and other *Smallanthus* species (Heliantheae, Asteraceae). Biochemical Systematics and Ecology 38: 1042-1048.
- Coll Aráoz, M.V., M.I. Mercado, G.I. Ponessa & A. Grau.** 2012. Morfología y anatomía de los órganos vegetativos de *Smallanthus connatus* (Heliantheae: Asteraceae). Lilloa 49: 22-29.
- Crisci, J.V.** 1985. La evolución: un juego ecológico. CIPFE-CED Orione Contribuciones en Biología (Montevideo), Publicación Especial 3: 1-10.
- Dam, A. van.** 1984. ¿Qué comeremos dentro de veinte años? Interciencia 9: 35-36.
- Ebber, S.E.** 2011. Rescate y promoción de cultivos tradicionales de la Región Andina y conservación de la biodiversidad: El yacón segunda etapa. Informe final, Consejo Federal de Inversiones, Salta, Argentina. 74 pp.
- Elith, J. & C. Graham.** 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. Ecography 29: 129-151.
- Freire, S., G. Sancho, E. Urtubey, N. Bayón, L. Katinas, D. Giuliano, D. Gutiérrez, A.A. Sáenz, L. Iharlegui, C. Monti & G. Delucchi.** 2005. Catalogue of Asteraceae of Chacoan plain, Argentina. Compositae Newsletter 43: 1-126.
- Freire, S., N.D. Bayón, C. Monti, D.A. Giuliano, L. Ariza Espinar, A.A. Sáenz, M.V. Perea & G. Delucchi.** 2012. Sinopsis de las Asteraceae de la provincia de Catamarca. Editorial Científica Universitaria de la Universidad Nacional de Catamarca, San Fernando del Valle de Catamarca, Catamarca, Argentina. 253 pp.
- Frías de Fernández, A., M. Caro, M. Lozzia de Canelada & A. Grau.** 2000. Estudio citológico del yacón (*Smallanthus sonchifolius*) y yacón del campo (*Smallanthus macroscyphus*). Lilloa 40: 115-125.
- Grau, A. & A. Slanis.** 1996. Is *Polymnia sylphoides* var. *perennis* a wild ancestor or yacón? Resumos I Congresso Latino Americano de Raízes Tropicais. CERAT-UNESP, São Paulo, Brasil.
- Grau, A. & J. Rea.** 1997. Yacón, *Smallanthus sonchifolius* (Poepp. & Endl.) H. Robinson. En: Andean roots and tubers: Ahipa, arracacha, maca and yacón. Hermann, M. & J. Heller, Eds. Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben/International Plant Genetic Resources Institute, Rome, pp. 199-242.
- Hijmans, R.J., S. Cameron, J. Parra, P. Jones & A. Jarvis.** 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology 25: 1965-1978.
- Kinupp, V.F.** 2007. Plantas alimentícias não-convencionais da região metropolitana de Porto Alegre, RS. Tese Doutorado. Área de Concentração Horticultura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 590 pp.
- Lachman, J., E.C. Fernández & M. Orsák.** 2003. Yacón [*Smallanthus sonchifolia* (Poepp. et Endl.) H. Robinson] chemical composition and use – a review. Plant, Soil and Environment 49: 283-290.
- Manel, S., H. Ceri Williams & S.J. Ormerod.** 2001. Evaluating presence-absence models in ecology: the need to account for prevalence. Journal of Applied Ecology 38: 921-931.
- Manrique, I., R. González, A. Valladolid, R. Blas & L. Lizárraga.** 2014. Producción de semillas en yacón (*Smallanthus sonchifolius* (Poepp. & Endl.)) mediante técnicas de polinización controladas. Ecología Aplicada 13: 135-145.
- Mayta, P., J. Payano, J. Peláez, M. Pérez, M. Pérez, L. Pichardo & L.**
- Meza Zela, G.** 1995. Variedades nativas del Llacon (*Polymnia sonchifolia*) by grafting onto sunflower at Quito, Ecuador. Japanese Journal of Tropical Agriculture 40: 27-28.
- Peterson, A.T.** 2001. Predicting species' geographic distributions based on ecological niche modeling. The Condor 103: 599-605.
- Peterson, A.T.** 2006. Uses and requirements of ecological niche models and related distributional models. Biodiversity Informatics 3: 59-72.

- Phillips, S.J., R.P. Anderson & R.E. Schapire.** 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190: 231-259.
- Rapoport, E.H. & A. Ladio.** 1999. Los bosques andino-patagónicos como fuentes de alimento. *Bosque (Valdivia)* 20: 55-64.
- Sánchez, S. & S. Genta.** 2007. C-13 yacón: Un potencial producto natural para el tratamiento de la diabetes. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas* 5: 162-164.
- Secretaría General de la Comunidad Andina.** 2011. Agricultura familiar agroecológica campesina en la comunidad andina: una opción para mejorar la seguridad alimentaria y conservar la biodiversidad. Agencia Española de Cooperación para el Desarrollo (AECID), Ministerio de Asuntos Exteriores y de Cooperación, Lima, Perú. 54 pp.
- Seminario, J., M.Valderrama & I. Manrique.** 2003. El yacón: fundamentos para el aprovechamiento de un recurso promisorio. Centro Internacional de la Papa (CIP), Universidad Nacional de Cajamarca. Agencia Suiza para el desarrollo y la Cooperación (COSUDE), Lima, Perú. 60 pp.
- Seminario Cunya, J.** 2008. Manejo técnico productivo del cultivo de yacón. Módulo II. La propagación del Yacón. Perúbiodiverso, Lima, Perú. 21 pp.
- Vitali, M.S.** 2014. Revisión sistemática, análisis cladístico y biogeográfico del género *Smallanthus* Mack. (Asteraceae, Millerieae). Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina. 189 pp.
- Vitali, M.S., G. Sancho & L. Katinas.** 2015. A revision of *Smallanthus* (Asteraceae, Millerieae), the “yacón” genus. *Phytotaxa* 214: 1-84.
- Vitali, M.S. & J.N. Viera Barreto.** 2014. Phylogenetic studies in *Smallanthus* (Millerieae, Asteraceae): a contribution from morphology. *Phytotaxa* 159: 77-94.
- Williams, P.** 2007. Species Distribution Modeling. A 2-week laboratory module, University of California, Santa Bárbara, California, USA. 17 pp.
- Zardini, E.** 1991. Ethnobotanical notes on yacon. *Economic Botany* 45: 72-85.