

Análisis espacial del riesgo de establecimiento de *Lymantria dispar* en bosques nativos de Sudamérica

Spatial analyses of risk establishment for *Lymantria dispar* in South American native forests

Guillermo Heit^{a,b*}, Ana Iribarne^a, Walter Sione^{c,d}, Pablo Aceñolaza^c, Pablo Cortese^a

^aSenasa, Dirección de Vigilancia y Monitoreo, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

*Autor de correspondencia: ^bUniversidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, tel.:5445248046, gheit@agro.uba.ar

^cUniversidad Autónoma de Entre Ríos-CONICET, CEREGEO, Entre Ríos, Argentina.

^dUniversidad Nacional de Luján, PRODITEL, Buenos Aires, Argentina.

SUMMARY

Lymantria dispar is a quarantine pest absent in South America. A regional phytosanitary surveillance plan was developed to control this pest due to its high risk of introduction through global commerce. The objective of this study was to estimate the potential distribution ranges of *L. dispar* in a new geographical area, using a deductive approach to prioritize areas for preventive monitoring. In South America, forest susceptibility was evaluated under different climate scenarios. In Argentina a phenology model was simulated. According to historical climatic conditions in South America, the areas with higher risk of establishment are the Andean forests from northern Argentina to Venezuela, the Brazilian Atlantic forest, littoral coastal areas of Uruguay and Argentina and the Mediterranean area of central and southern Chile. Based on estimations of IPCC, the effects of climate change would cause a reduction of the susceptible area to *L. dispar* invasion in future decades. Although there were statistically significant differences among the areas with high risk of invasion, estimated by the two methodological approaches, susceptible areas for preventive monitoring were identified.

Key words: invasive species, climate change, phytosanitary risk.

RESUMEN

Lymantria dispar es una plaga cuarentenaria ausente de Sudamérica, para la que se ha elaborado un plan de vigilancia fitosanitaria regional, debido su elevado riesgo de introducción involuntaria a través del comercio. El objetivo de este trabajo fue estimar la distribución geográfica potencial de *L. dispar* en una nueva área utilizando un enfoque deductivo, a fin de priorizar ambientes en riesgo para su monitoreo preventivo. En Sudamérica se evaluó la susceptibilidad de la cobertura boscosa ante diferentes escenarios climáticos. A escala local, en Argentina, se simuló la fenología potencial de la especie. A base de las condiciones climáticas históricas de Sudamérica, *L. dispar* podría establecerse en los bosques andinos desde el norte de Argentina, hasta Venezuela, la mata atlántica brasileña, áreas costeras litorales de Uruguay y Argentina y el área mediterránea del centro y sur de Chile. Los efectos del cambio climático estimados por el IPCC, provocarían una disminución de este área susceptible en las próximas décadas. Aunque existieron diferencias significativas en la superficie clasificada como de mayor riesgo fitosanitario en las dos escalas de estudio (subcontinental vs. regional), se lograron identificar las principales áreas susceptibles para el monitoreo preventivo de *L. dispar*.

Palabras clave: especie invasora, cambio climático, riesgo fitosanitario.

INTRODUCCIÓN

El fuerte aumento del comercio internacional observado en las últimas décadas ha incrementado la probabilidad de que muchas especies se establezcan fuera de su área de distribución natural (Levine y D'Antonio 2003). *Lymantria dispar* L. (Lepidoptera: Lymantriidae), es una plaga cuarentenaria que, hasta el presente, se encuentra ausente de Sudamérica. La misma es considerada una amenaza fitosanitaria para los bosques nativos y plantaciones forestales de latifoliadas, debido al riesgo potencial de introducción involuntaria de la misma a través del comercio global (Tobin *et al.* 2012).

Este lepidóptero univoltino, defoliador, se asocia a unas 250 especies de hospederos vegetales, fundamentalmente árboles latifoliados, en su actual rango de distribución (Liebhold *et al.* 2000).

El Comité de Sanidad Vegetal del Conosur (COSAVE), ha elaborado un plan de vigilancia fitosanitaria regional, por el que cada uno de los países integrantes, se compromete a establecer un sistema de detección precoz de la especie (COSAVE 2000). En tal sentido, la construcción de un modelo de distribución potencial de la especie, podría auxiliar las tareas de planificación estratégica de los sistemas de vigilancia en cada uno de los países miembros. El objetivo del presente trabajo fue simular la distribución geográfica potencial de

L. dispar, utilizando un enfoque deductivo, a fin de priorizar ambientes en riesgo para el monitoreo preventivo.

MÉTODOS

Se estimó la distribución potencial de *L. dispar* a dos escalas espaciales de estudio. A escala subcontinental se tomó como área de estudio a Sudamérica y a escala regional, se tomó como caso la República Argentina. En ambas escalas de estudio se utilizó un enfoque metodológico deductivo para clasificar los ambientes con riesgo de establecimiento (R), en función de las condiciones climáticas predisponentes (C), la distribución de hospederos vegetales (H) y la accesibilidad para la especie (A). Siendo entonces $R = C \cap H \cap A$ (Soberón y Peterson 2005). El detalle de las variables utilizadas en el análisis se presenta en el cuadro 1.

Estimación de ambientes climáticamente favorables (C). La estimación de los ambientes favorables para el establecimiento de la especie, difirió metodológicamente entre las diferentes escalas de estudio.

A escala subcontinental, se compararon diferentes escenarios climáticos, mediante la utilización de estadísticas meteorológicas mensuales. Se consideró un escenario climático actual, basado las estadísticas meteorológicas históricas 1950-2000. Tres escenarios futuros (décadas de 2040, 2060 y 2080), estimados por *The Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), en función de requerimientos energéticos globales moderados, SERES A1B (Ramírez y Jarvis 2008). Por último, con finalidad metodológica, se construyó un hipotético escenario de disminución de 1 °C en la temperatura media de Sudamérica.

Los parámetros bioecológicos de la especie se obtuvieron del plan de vigilancia de COSAVE (2000), corregidos por Vanhanen *et al.* (2007) (figura 1).

A escala regional, se utilizó una base de datos climáticos con una mayor resolución espacial y menor escala temporal que la utilizada a escala subcontinental (cuadro 1). Esto permitió simular la fenología potencial de la especie, en base a los parámetros del *Gypsy Moth Phenology Model* (GMPHEM, Sheehan 1992), por medio de estadísticas meteorológica de paso diario del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina (Blanco *et al.* 2012).

El modelo GMPHEM utiliza las temperaturas máximas y mínimas diarias para calcular el tiempo térmico requerido en cada estado de desarrollo de la especie. Aunque el modelo ha sido ampliamente utilizado, debemos remarcar que el mismo no incorpora la variabilidad climática de microescala, como así también la variabilidad fenológica (Andersen *et al.* 2001).

En primer lugar, se asumió que los días de frío acumulados en un ambiente dado determinan, la cantidad de cohortes potenciales en que puede dividirse el periodo de eclosión de huevos y se realizó una primera clasificación del ambiente, en función de tal variabilidad. Posteriormente, se realizaron 28 iteraciones del modelo (denominadas cohortes), entre el 1 de julio y el 31 de marzo. Se supuso que cada cohorte de larvas eclosionó 23 días después que la precedente (figura 2). Posteriormente, en función de un modelo aditivo, se clasificaron los ambientes en función de los requerimientos de frío de la especie y la estacionalidad del vuelo de adultos, a menor variabilidad de eclosión de huevos y adultos, mayor riesgo de establecimiento. La fecha estimada de vuelo del 50 % de la población de adultos

Cuadro 1. Base de datos incluida en el análisis.
 Datasets included in analyses.

Variable	Tipo	Fuente	Resolución	Referencia	Área de análisis
Índice de vegetación normalizado máximo mensual	Vegetación	NDVI, MOD13Q1 (2000-2009)	250 m	NASA Land Processes Distributed Active Center	Sudamérica/ Argentina
Tipo de cobertura vegetal	Vegetación	Globcover/ ESA	300 m	Bicheron <i>et al.</i> 2006	Sudamérica/ Argentina
Temperatura media mensual	Climática	Worldclim (1950-2000)	10 km	Hijmans <i>et al.</i> 2005	Sudamérica
Temperatura media mensual (2040, 2060, 2080)	Climática	IPCC, SERES A1B	10 km	Ramírez y Jarvis 2008	Sudamérica
Temperatura media diaria	Climática	Interpolación espacial datos SMN (1990-2009)	4 km	Blanco <i>et al.</i> 2010	Argentina
Distancia al puerto más cercano	Antropogénica	Elaboración propia	4 km	***	Sudamérica/ Argentina

IPCC: The Intergovernmental Panel on Climate Change.

SMN: Servicio Meteorológico Nacional (Argentina).

MOD13Q1: Índice de vegetación MODIS (16 días). ASTER L1B. USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota. 2001 (https://lpdaac.usgs.gov/data_access).

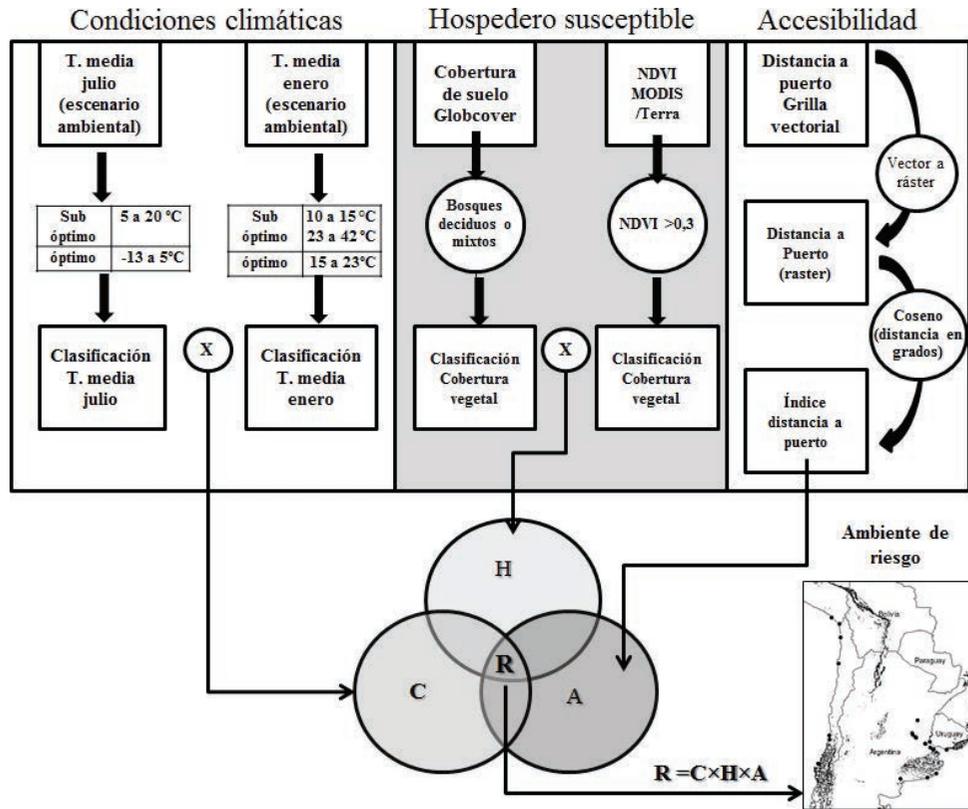


Figura 1. Diagrama general de asociación de variables para el análisis espacial del riesgo de plagas.
 General diagram of spatial association of variables for pest risk analyses.

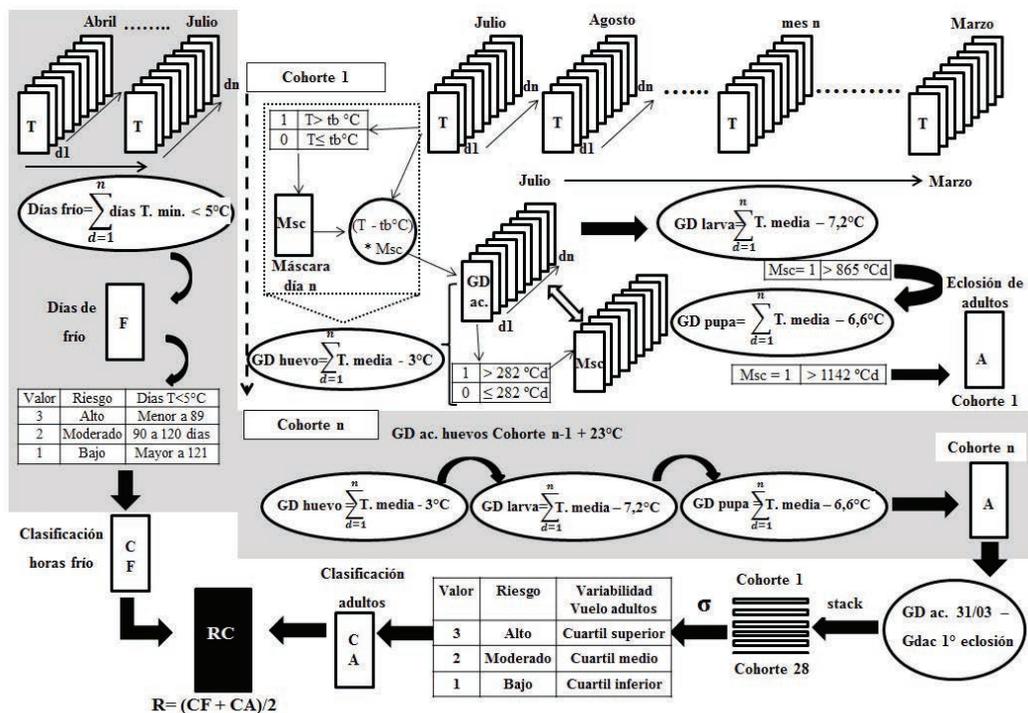


Figura 2. Diagrama general de asociación de variables climáticas diarias para simular la fenología de *L. dispar* en Argentina. Abreviaturas incluidas en el diagrama: T = temperatura media diaria, GD = grados día, Msc.= máscara.
 General diagram of daily climatic variables association to simulate the phenology of *L. dispar* at regional scale. Abbreviations included in the diagram: T = mean daily temperature, GD = degree day, Msc. = mask.

se calculó mediante la consulta espacial de una muestra aleatoria de 20 sitios, por ecorregión, con cobertura vegetal susceptible.

Distribución de hospederos (C). La distribución geográfica de hospederos susceptibles en Sudamérica y Argentina, se discriminó a partir de la capa de cobertura vegetal GLOBCOVER-ESA, al seleccionar las clases que contienen bosques deciduos o mixtos (Sharov *et al.* 1999). Dentro de estas clases, se seleccionaron áreas con NDVI mensual mayor a 0,3, para los meses de octubre a marzo. A fin de descartar celdas con un elevado porcentaje de suelo descubierto en la época de activo crecimiento de especies latifoliadas.

Accesibilidad de L. dispar (A). Zlotina *et al.* (1999) hallaron que las larvas que eclosionan a partir de las oviposiciones de *L. dispar*, pueden ser transportadas por el viento a distancias mayores a 2 km, favorecidas por la formación de hilos de seda. Este mecanismo de dispersión posee impacto en la dispersión a cortas distancias, pero a largas distancias, el mecanismo más frecuente de dispersión, es el transporte antrópico. Entre estos, la vía de introducción más probable de la especie a Sudamérica, la constituye el transporte de masas de huevos viables adheridos a las cubiertas de los barcos o contenedores (Gadgil *et al.* 2000). En este sentido, se consideró como áreas con mayor riesgo de ser inicialmente invadidas, aquellas ubicadas dentro de un radio de 2 km de las instalaciones portuarias. Para el resto de la cobertura boscosa/forestal del subcontinente, se ponderó el riesgo de accesibilidad de la especie, a base del cálculo de una variable de mínima distancia a los potenciales sitios de ingreso (puertos).

Análisis de sensibilidad. Se realizó un análisis de sensibilidad a fin de estimar la estabilidad del modelo, evaluando la variación provocada en los resultados del mismo en función de variaciones sistemáticas sobre los parámetros de entrada. Para ello, se calculó un índice (S) de diferencia media en la superficie de riesgo entre el modelo modificado y el de referencia (modificado de Orán Cáseres *et al.* 2011). Este índice se calculó como:

$$S = \frac{(\sum |P_{ci} \text{ capa original} - P_{ci} \text{ capa modificada}|}{P_{ci} \text{ capa original}} / N^{\circ} \text{ iteraciones.} \quad [1]$$

Dónde:

S = diferencia media en la superficie de riesgo que existe entre el mapa original y el mapa modificado; P = número de pixeles de la categoría ci.

Se realizaron 20 iteraciones del modelo, contemplando en cada una de ellas, modificaciones de un 1 % en los valores de entrada en los parámetros originales de temperatura y NDVI, hasta lograr una modificación global de $\pm 10\%$ en los mismos.

La variabilidad intrínseca de las variables de entrada al modelo fenológico se evaluó mediante la estimación de la raíz del error cuadrático medio (RMSE), de cada pixel, entre el 1 de abril y el 31 de marzo, a base de la fórmula (Liu *et al.* 2009):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}} \quad [2]$$

Dónde:

$X_{obs,i}$ = valor observado en el pixel/momento i

$X_{model,i}$ = valor modelado en el pixel/momento i

n = día calendario entre el 1 abril y el 31 de marzo.

Para el tratamiento de la información se utilizó el software GVSIG® 1.11 y Qgis 1.8.

RESULTADOS

Como puede observarse en la figura 3, con base en las condiciones climáticas históricas de Sudamérica, *L. dispar* podría potencialmente establecerse en los bosques andinos desde el norte de Argentina, hasta Venezuela, la mata atlántica brasileña, áreas costeras litorales de Uruguay y Argentina y área mediterránea húmeda y prehúmeda del centro y sur de Chile.

Según las estimaciones del IPCC, los efectos del cambio climático provocarían una disminución del área susceptible a ser invadida por *L. dispar* en Sudamérica ($P = 0,01$) (figura 3). Se estimó un aumento de la cobertura boscosa con condiciones climáticamente desfavorables para el desarrollo de esta especie de hasta 67.000 km², por cada grado centígrado de incremento de temperatura hacia el 2080. Asimismo es de esperar una disminución del área de moderado riesgo de establecimiento, de 50.000 km²/°C ($P = 0,01$). Sin embargo, se prevé un leve aumento de la superficie considerada de riesgo elevado (4.000 km²/°C, $P = 0,04$) (cuadro 2).

La diferencia media entre las superficies de riesgo estimadas por el modelo de referencia y las variaciones sistemáticas de los parámetros de entrada al mismo, índice S, se muestran en el cuadro 3. En el mismo puede observarse que la clasificación inicial del factor temperatura media mensual y la clasificación de ambientes en función de áreas de aptitud climática (fase 2), son muy sensibles a la modificación planteada en su modelación. El modelo se mostró más estable en las dos primeras fases del análisis utilizando las estadísticas climáticas históricas, que utilizando los escenarios climáticos futuros calculados por el IPCC. La clasificación de coberturas vegetales con aptitud climática para el establecimiento de *L. dispar*, se mostró muy estable a los cambios sistemáticos realizados con cada iteración de análisis de sensibilidad.

Al simular la fenología a escala regional, se encontró que las áreas con mayor susceptibilidad de colonización se hallan distribuidas en las ecorregiones de los Bosques

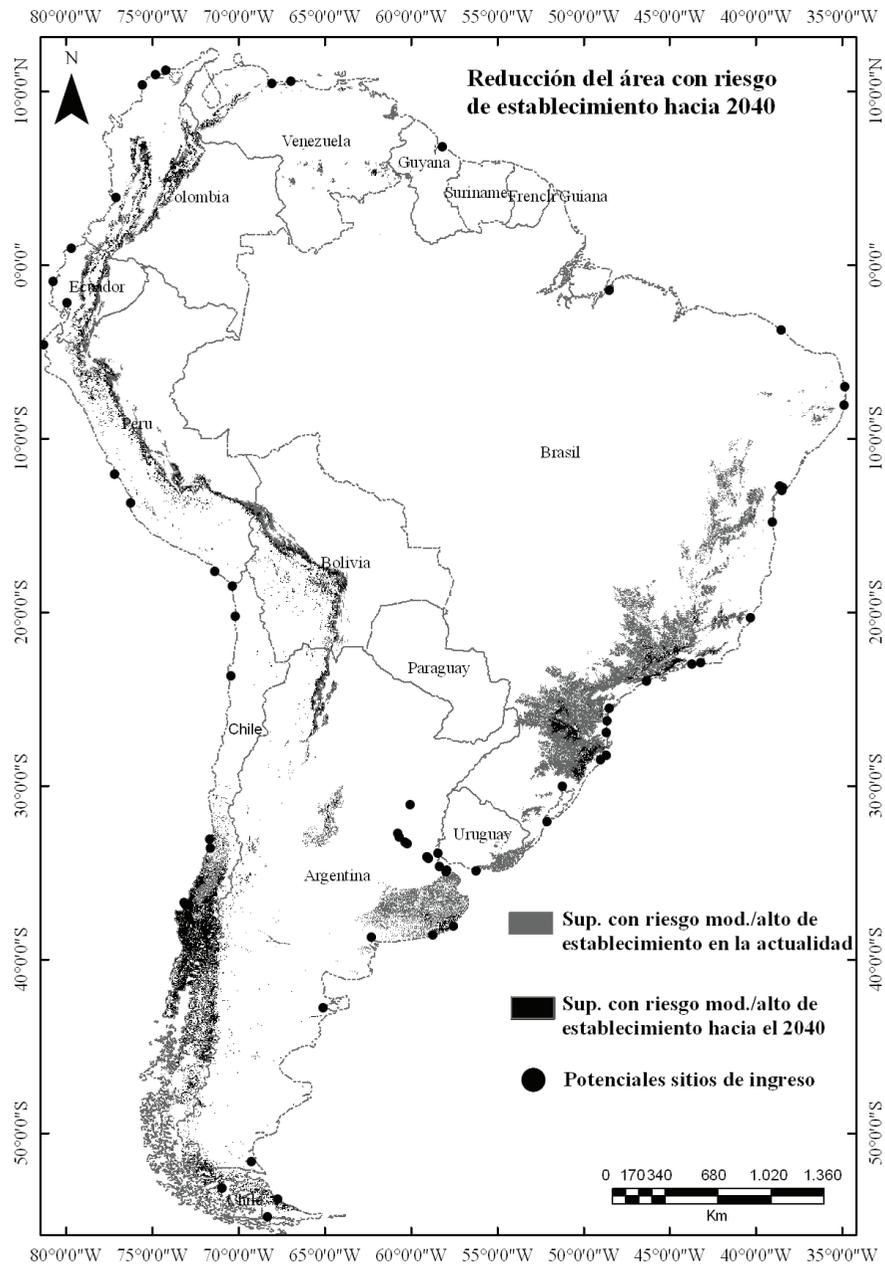


Figura 3. Comparación de las áreas con moderado a elevado riesgo de establecimiento de *L. dispar* en Sudamérica, con base en las estadísticas climáticas históricas y las estimaciones climáticas del IPCC para la década de 2040.

Comparison of areas with moderate to high risk of establishment for *L. dispar* in South America based on historical climatic statistics and IPCC climate projections for the 2040s.

Patagónicos, la Pampa, el Delta del Paraná y la Selva de Yungas (figura 4).

Esta zonificación general del riesgo es similar a la encontrada mediante el análisis espacial a escala subcontinental, pero mostró diferencias estadísticamente significativas en las superficies estimadas para cada una de las categorías de riesgo ($G^2_{(3,0.05)} = 18,03$; $P = 0,0004$). Mediante la simulación fenológica de la especie en Argentina se estimó que la superficie de cobertura boscosa/forestal con moderado a elevado riesgo de establecimiento de *L. dispar* es

un 4 % mayor que la estimada por el modelo deductivo de escala subcontinental y paso mensual, mientras que el área sin riesgo es un 11 % mayor.

Según el modelo fenológico, las ecorregiones que presentarían una mayor superficie categorizada como de elevado riesgo de establecimiento serían los Bosques Patagónicos y la Pampa, con un 44 y 39 % de participación relativa, respectivamente (cuadro 4). Sin embargo, los datos climáticos utilizados para la simulación fenológica presentan un mayor error de estimación intrínseco para la

Cuadro 2. Variación de la superficie potencial con riesgo de establecimiento de *L. dispar*, en función de diferentes escenarios climáticos.
 Variation of the area with potential risk of establishment for *L. dispar*, according to different climate scenarios.

Caracterización de ambientes	Actual	Escenarios futuros			Hipótesis enfriamiento	<i>m</i>	<i>F</i>	<i>P</i>		<i>R</i> ²
		2040	2060	2080						
Δ estimada (°C)	0	+ 1,75	+ 2,15	+ 2,65	- 1					
Sin riesgo	17.622	17.680	17.798	17.799	17.550	67,47	30	0,01	*	0,88
Riesgo bajo	79	56	0	0	65	-20,86	6	0,09	ns	0,55
Riesgo moderado	107	72	0	0	200	-50,65	34	0,01	*	0,89
Riesgo elevado	10	11	21	20	5	4,04	11	0,04	*	0,72

Superficie expresada en unidades de 1.000 km².

Se muestran los resultados de regresión lineal simple por ambiente de riesgo ($\alpha = 0,05$).

Cuadro 3. Análisis de sensibilidad del modelo de riesgo de establecimiento potencial de *L. dispar* a escala subcontinental.
 Sensitivity analyses of potential risk of establishment for *L. dispar* at subcontinental scale.

Factor	Índice S: riesgo elevado		Índice S: riesgo moderado	
	Actual	Escenarios futuros	Actual	Escenarios futuros
Temperatura media enero	28,67	20,41	7,62	2,59
Temperatura media julio	0,81	19,67	8,95	9,59
Fase 2 (*)	3,95	67,82	7,97	20,65
Índice de vegetación	0,90	0,90	0,90	0,90
Fase 3 (**)	4,65	1,82	1,30	1,72

Índice S = diferencia media en la superficie de riesgo entre el modelo modificado y el de referencia. Expresada en porcentaje (%).

*Fase 2 = clasificación climática. **Fase 3 = Clasificación clima y hospedero susceptible.

Cuadro 4. Caracterización del riesgo de establecimiento potencial de *L. dispar* en las principales ecorregiones Argentinas, con cobertura vegetal susceptible y condiciones ambientales óptimas.

Risk characterization of establishment for *L. dispar* in the main ecoregions of Argentina with susceptible vegetation and optimal environmental conditions.

Ecorregión	Caracterización de ambientes de riesgo				RMSE(*)	
	Sin riesgo	Bajo	Moderado	Elevado	□	CV
Selva de yunga	16.736	8.099	14.695	3.616	2,19	13
Chaco seco	430.563	3.868	10.085	2.963	2,29	14
Delta e islas del Paraná	24.784	22	12.996	70	1,80	16
Espinal	286.980	3	4.515	631	2,11	15
Pampa	334.865	4	26.051	19.977	1,79	7
Monte de llanuras y mesetas	366.489	0	490	623	2,46	15
Bosques patagónicos	64.647	488	330	22.137	2,75	23

Superficie expresada en km².

*RMSE = Raíz del error cuadrático medio de la temperatura media diaria entre el 1 de abril y el 31 de marzo. CV = Coeficiente de variación RMSE por ecorregión (expresado en %).

región patagónica que para la pampeana, esto sería debido a la menor densidad de estaciones meteorológicas que presenta la región patagónica.

Los requerimientos de horas de frío (implícitos en el modelo fenológico) tendrían, a nivel regional, una mayor influencia sobre las fechas de eclosión de huevos, que so-

bre la de eclosión de adultos. Esto puede deberse a que las mayores temperaturas imperantes durante el verano en los ambientes de menor latitud (figura 4), reducen el número de días calendario necesarios para completar el estado larval y pupal, disminuyendo en estos ambientes la variabilidad entre las fechas de eclosión de adultos (cuadro 5).

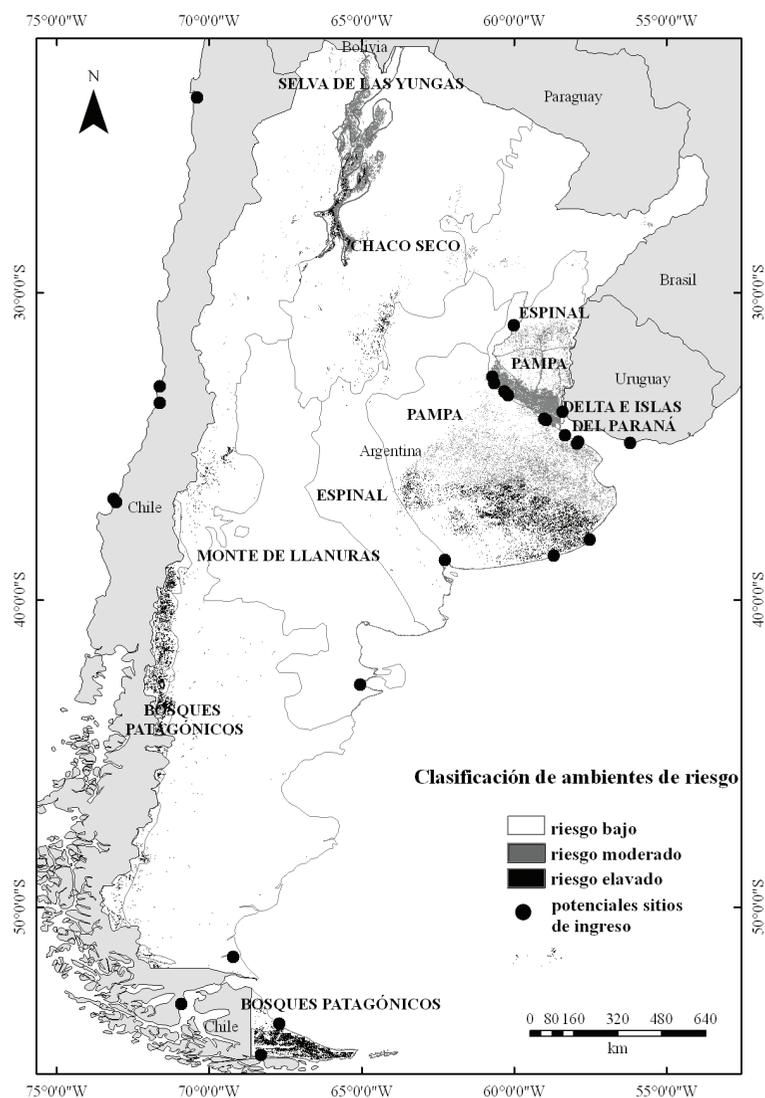


Figura 4. Caracterización de ambientes de riesgo para el establecimiento de *L. dispar* en Argentina según el modelo fenológico de Sheehan (1992).

Characterization of Argentina risk environments for establishment of *L. dispar*, according to the phenological model of Sheehan (1992).

Cuadro 5. Fecha estimada de eclosión del 50 % de los adultos de *L. dispar* en Argentina según el modelo fenológico de Sheehan (1992).

Estimated date of 50 % adult emergence according to the phenological model of Sheehan (1992).

Ecorregión	N° días T.<5°C(*)		N° días EC 50% adultos(**)			
	\bar{x}	S	\bar{x}	S	IC 5%	IC 95%
Selva de yunga	85,6	13,9	242	12,1	236	248
Chaco seco	61,4	16,8	236	16,1	229	243
Delta e islas del Paraná	50,0	5,4	231	19,3	222	240
Espinal	70,0	19,4	228	15,6	221	235
Pampa	37,6	14,6	225	18,5	216	234
Monte de llanuras y mesetas	71,0	11,4	220	11,0	215	225
Bosques patagónicos Norte	106,4	2,0	218	10,8	213	223
Bosques patagónicos Sur	107,5	1,4	232	8,6	228	236

*N° días T.<5°C = N° días con temperatura media menor a 5 °C, entre el 1 de abril y el 30 de julio.

**N° días EC 50% adultos = N° días a eclosión del 50 % de adultos a partir del 1 de julio. n = 20 por ecorregión ($\alpha=0,05$).

DISCUSIÓN

Estos resultados coinciden con los hallados mediante el software CLIMEX (Townsend *et al.* 2007), en la zonificación de ambientes de riesgo climático para el establecimiento de *L. dispar* a nivel subcontinental, y aportan información adicional al incorporar la distribución de coberturas boscosas/forestales susceptibles y el factor de riesgo de dispersión antrópica.

La reducción de la superficie bioclimáticamente óptima para el establecimiento de *L. dispar* en Sudamérica, a base de las estimaciones del IPCC para las próximas décadas, concuerda con los resultados hallados por Gevrey y Worner (2006), quienes determinaron que el factor que más contribuye a explicar los patrones de distribución actual de *L. dispar*, es la temperatura mínima anual. Sin embargo, no concuerdan con las estimaciones de Régnière *et al.* (2009), quienes estimaron que el cambio climático incrementaría el área boscosa susceptible de ser invadida por *L. dispar*, debido al probable aumento de la temperatura imperante durante el verano.

A nivel regional, las coberturas boscosas/forestales de la Patagonia presentan condiciones bioclimáticas óptimas para el establecimiento de *L. dispar*, pero se hallan alejadas de los puertos marítimos, mientras que los rodales de álamos y salicáceas del delta de Paraná, cercanos a los mismos, contarían con condiciones climáticas subóptimas para el desarrollo de esta plaga.

Vercken *et al.* (2011) sostienen que es necesaria la existencia de una densidad poblacional mínima, asociada a una superficie de bosque continuo, para asegurar la persistencia de la especie en el ambiente y su posterior dispersión a nuevas áreas. En tal sentido, algunas áreas bioclimáticamente favorables para el establecimiento de la especie, como por ejemplo la región pampeana, presentan un mosaico de pequeñas superficies forestales que sólo podrían sostener poblaciones dispersas de *L. dispar*, determinando así una baja probabilidad de ocurrencia de brotes poblacionales de la especie en el área.

El modelo fenológico utilizado en este trabajo fue diseñado para la raza europea de *L. dispar*, mientras que el cono sur presentaría un mayor riesgo de introducción de la raza asiática (COSAVE 2000). Considerando que los datos bioecológicos específicos de la raza asiática son escasos, se ha supuesto en este trabajo que existe una similitud suficiente entre ambas razas, que permita suponer que las áreas capaces de sostener poblaciones de la raza europea, lo serían también para la raza asiática. Sin embargo, algunas diferencias entre estas dos razas podría influir en la exactitud de riesgo estimado en este trabajo y por lo tanto, este análisis podría estar subestimando la magnitud del riesgo de establecimiento.

CONCLUSIONES

Aunque existieron diferencias significativas en la superficie clasificada como de mayor riesgo fitosanitario en las dos escalas de estudio (subcontinental vs. regional), se

lograron identificar las principales áreas susceptibles de ser invadidas por *L. dispar*. Esto permitirá coordinar las tareas de monitoreo preventivo de la especie por los países del COSAVE.

Considerando los escenarios de calentamiento global propuestos por la IPCC, la cobertura boscosa susceptible a la colonización por la especie en Sudamérica, sería a futuro significativamente menor que en la actualidad.

REFERENCIAS

- Andresen J, D McCullough, B Potter, C Koller, L Bauer, D Lusch, C Ramm. 2001. Effects of winter temperatures on gypsy moth egg masses in the Great Lakes region of the United States. *Agricultural and Forest Meteorology* 110: 85–100.
- Bicheron P, M Leroy, C Brockmann, U Krämer, B Miras, C Vancutsem. 2006. GLOBCOVER: a 300 m global land cover product for 2005 using ENVISAT MERIS time series. 2nd International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing. Consultado 2 mar. 2012. Disponible en http://due.esrin.esa.int/prjs/Results/131-176-131-25_2007510152728.pdf
- Blanco P, W Sione, L Hardtke, H del Valle, P Aceñolaza, P Zamboni, G Heit, P Horak, P Cortese, R Moschini. 2010. Estimación espacial de variables climáticas en el territorio argentino mediante el uso de software libre. XIV Simposio Internacional de Selper. 8 - 12 Noviembre de 2010. Guanajuato México. s/p.
- COSAVE (Comité de Sanidad Vegetal, UY). 2000. Estándar Regional en Protección Fitosanitaria. Sección III. Medidas Fitosanitarias. 3.10.2 Vigilancia de *Lymantria dispar* Linnaeus (Lepidoptera: Lymantriidae). Consultado 1 jun. 2011. Disponible en <http://www.cosave.org>.
- Gadgil P, L Bulman, R Crabtree, R Watson, J O'Neil, K Glassey. 2000. Significance to New Zealand forestry of contaminants on the external surfaces of shipping containers. *New Zealand Journal of Forestry Science* 30: 341-358.
- Gevrey M, S Worner. 2006. Prediction of Global Distribution of Insect Pest Species in Relation to Climate by Using an Ecological Informatics Method. *Journal of Economic Entomology* 99: 979-986.
- Hijmans R, 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.
- Levine J, C D'Antonio. 2003. Forecasting biological invasions with increasing international trade. *Conservation Biology* 17: 322–326.
- Liebholt A, J Elkinton, D Williams. 2000. What causes outbreaks of the gypsy moth in North America? *Population Ecology*: 257-266.
- Liu C, M White, G Newell. 2009. Assessing the accuracy of species distribution models more thoroughly. XVIII World IMACS/MODSIM Congress. 13-17 julio 2009. Cairns, Australia. Consultado 2 may. 2014. Disponible en http://mssanz.org.au/modsim09/J1/liu_c_J1a.pdf
- Orán Cáceres J, M Gómez, W Plata. 2011. Posibilidades de aplicación de un análisis de sensibilidad secuencial a un modelo basado en técnicas SIG y evaluación multicriterio. Actas del XIII Conferencia Iberoamericana en Sistemas de Información Geográfica. 25-27 mayo de 2011. Toluca, México.

- Consultado 2 may. 2014. Disponible en http://www.inegi.org.mx/eventos/2011/conf_ibero/doc/ET4_18_ORAN.pdf
- Ramirez J, A Jarvis. 2008. High resolution statistically downscaled future climate surfaces. International Center for Tropical Agriculture (CIAT); CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). Cali, Colombia.
- Régnière J, N Vince, K Porter 2009. Climate suitability and management of the gypsy moth invasion into Canada. *Biological Invasions* 11:135–148
- Sharov A, B Pijanowski, A Liebhold, S Gage. 1999. What affects the rate of gypsy moth (Lepidoptera: Lymantriidae) spread: winter temperature or forest susceptibility? *Agricultural and Forest Entomology* 1: 37-45.
- Sheehan K. 1992. User's guide for GMPHEN: Gypsy Moth Phenology Model. Radnor, PA, USA. USDA Forest Service, General Technical Report 158. 29 p.
- Soberón J, T Peterson. 2005. Interpretation of model of fundamental niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics* 2: 1-10
- Tobin P, B Bai, D Eggen, D Leonard. 2012. The ecology, geopolitics, and economics of managing *Lymantria dispar* in the United States. *International Journal of Pest Management* 58:195-210.
- Townsend P, W Richard, C Guojun. 2007. Modeled global invasive potential of Asian gypsy moths, *Lymantria dispar*. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 125: 39–44.
- Vanhanen H, Veteli T, Pailvinen S, Kellomaki S, P Niemala. 2007. Climate change and range shifts in two insect defoliators: gypsy moth and nun moth—a model study. *Silva Fennica* 41: 621–638.
- Vercken E, A Kramer, P Tobin, J Drake. 2011. Critical patch size generated by Allee effect in gypsy moth, *Lymantria dispar* (L.). *Ecology Letters* 14: 179
- Zlotina M, V Mastro, J Elkinton, D Leonard. 1999. Dispersal tendencies of neonate larvae of *Lymantria mathura* and the Asian form of *Lymantria dispar* (Lepidoptera: Lymantriidae). *Environmental Entomology* 28: 240-245.

Recibido: 12.08.13
Aceptado: 10.06.14

