


# Estimación del riesgo por la introducción de plagas cuarentenarias en México a través de la simulación Montecarlo

Ramírez-Guzmán, M. E.\* 

Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Km 36.6, Carretera México-Texcoco. Montecillo, Texcoco, Estado de México. CP: 56230.

\* Autor responsable: martharg@colpos.mx

## Problema

Las plagas cuarentenarias, son aquellas de importancia económica y ambiental que se introducen a un país o que su distribución en el territorio es limitada y provocan efectos negativos sobre la agricultura provocando pérdidas económicas. En países como Nueva Zelanda, la erradicación de la mosca de la fruta o pago por seguro por insecto o ácaro puede llegar a costar en promedio un millón de dólares. En México los costos por vigilancia de 35 plagas de interés cuarentenario, ascendió a 82 millones de dólares en 2017, lo cual significó alrededor de dos millones de dólares por plaga.

Con el propósito de minimizar el riesgo por introducción de dichas plagas, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), definió el riesgo (**R**), como el producto de la probabilidad de introducción de una plaga (**p**), por las consecuencias (**C**) que pueden ser de tipo económico, ambiental, social, político e incluso estético.

En América Latina, en el Análisis de Riesgos de Plagas (**ARP**) es común en medir el nivel de probabilidad y consecuencias por la introducción de plagas mediante la asignación de los niveles: alto, medio y bajo. En consecuencia, para calcular el riesgo, los investigadores acuerdan diferentes combinaciones de los niveles de **p** y **C**, para definir si el riesgo es alto, medio o bajo. Si bien esta manera de estimación es muy valiosa, ya que permite tomar acciones de contención en casos de emergencia fitosanitaria, también es posible generar una estrategia estadística que precise la estimación del riesgo, por lo cual se propone la simulación Montecarlo.

## Solución planteada

A través de la simulación Montecarlo se realizó la estimación de riesgo de introducción de plagas cuarentenarias. Por lo cual, para incorporar la estimación en las Instancias Oficiales, fue necesario la capacitación del personal del Departamento de Análisis de Riesgo de Plagas del Centro Nacional de Referencia Fitosanitaria (CNRF) del SENASICA, México. La capacitación consistió en aprender a manejar @Risk como una herramienta en la elaboración de estudios de ARP cuantitativos. Posteriormente el personal de la

**Cómo citar:** Ramírez-Guzmán, M.E. (2022). Estimación del riesgo por la introducción de plagas cuarentenarias en México a través de la simulación Montecarlo. *Agro-Divulgación*, 2(3).

**Editores académicos:** Dra. Ma. de Lourdes C. Arévalo Galarza y Dr. Jorge Cadena Iñiguez.

*Agro-Divulgación*, 2(3). Mayo-Junio. 2022. pp: 17-24.

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International



Dirección de Sistematización y Análisis Sanitario (DISAS), fue capacitado para elaborar modelos estadísticos de riesgos de plagas y su impacto en la producción y economía agrícola mediante métodos de simulación estadística con R y @Risk, instruyendo en los temas de: **1. Introducción al ARP, 2. Gestión del riesgo, 3. Análisis cuantitativo del riesgo, 4. Evaluación del riesgo con la expansión de Fermi, 5. Estadística descriptiva, 6. Distribuciones continuas y simulación Montecarlo, 7. Distribuciones discretas y simulación Montecarlo, 8. Riesgo de introducción de una plaga con @Risk, 9. Probabilidad de supervivencia y establecimiento con @Risk y 10. Impacto económico y laboral con @Risk.**

### **Normas Internacionales de medidas fitosanitarias**

El análisis de riesgo de plagas (ARP), está documentado en las normas internacionales de medidas fitosanitarias de la FAO, tales como: NIMF 2: Marco para el análisis de riesgo de plagas, NIMF 5: Glosario de términos fitosanitarios, NIMF 11: Análisis de riesgo de plagas para plagas cuarentenarias, NIMF 14: Aplicación de medidas integradas en un enfoque de sistemas para el manejo del riesgo de plagas y NIMF 23: Directrices para la inspección. La NIMF 2 establece tres etapas del ARP: Inicio, Evaluación del riesgo de plagas y Manejo del riesgo de plagas. En particular, la etapa 2 es la que establece que el riesgo se estima como  $R=p*C$ .

### **Simulación Montecarlo**

El método Montecarlo consiste en realizar un número suficientemente grande de asignaciones de valores de forma aleatoria de cada una de las variables que intervienen en una ecuación (por ejemplo, más de mil), hasta que el resultado final de la variable de respuesta de interés se estabiliza. Con el histograma de los resultados obtenidos, se obtienen conclusiones basados en el valor medio, máximo, mínimo, desviación estándar, varianza, intervalo de confianza y probabilidad de ocurrencia de la variable determinada. La simulación Montecarlo, no es más que una herramienta de análisis que permite obtener conclusiones sin necesidad de trabajar directamente con el sistema real. El concepto de simulación involucra ambos conocimientos, 1) el diseño del modelo y 2) la realización de experimentos. La idea es utilizar muestras aleatorias de distribuciones con parámetros determinados, para explorar el comportamiento de un sistema o proceso complejo. Eventos continuos y discretos, pueden ser simulados, el primero es asociado a medidas tomadas en un intervalo definido por un valor máximo y un mínimo, en tanto que el segundo es asociado a conteos de un evento de interés.

### **Metodología para aplicar la simulación Montecarlo**

La metodología consiste en definir al riesgo ( $R$ ) de tres maneras.

**Caso 1: Definir al riesgo como:  $R=p*C$**

**Caso 2. Definir al riesgo como:  $R=p_1*C_1 + p_2*C_2 + \dots + p_k*C_k$**

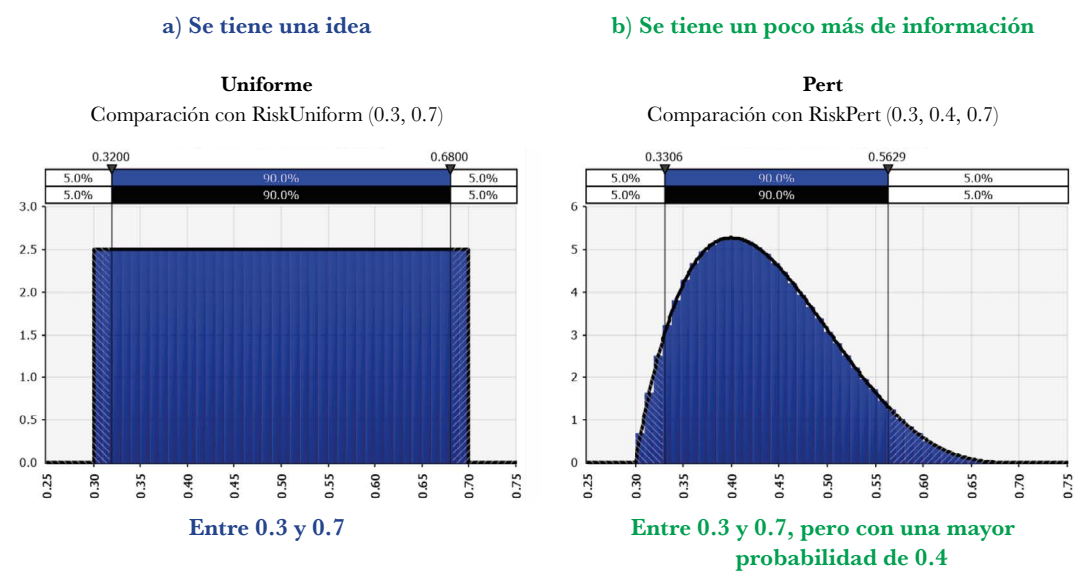
**Caso 3. Definir al riesgo como:  $R=p_1*p_2*\dots*p_k*I*C$**

En el primer caso, se tiene una probabilidad de interés ( $p$ ) y una consecuencia o impacto ( $C$ ). Ejemplos de  $C$  son el número de hectáreas afectadas, número jornaleros despedidos o pérdida económica, entre otros. El segundo caso, es simplemente una extensión del primer caso, en donde se conocen varias probabilidades de interés y su posible consecuencia. El tercer caso, corresponde a una contribución del Premio Nobel de Física de 1938, Enrico Fermi, y de acuerdo a la NIMF 14, corresponde a la situación en donde las medidas fitosanitarias para contener la introducción de la plaga son *independientes*, en esta situación, todas las medidas tendrían que fallar para que el sistema de contención de la plaga no funcionara. Con medidas *dependientes*, la probabilidad de fracaso es  $R=(p_1+p_2+\dots+p_k-p_1*p_2*\dots*p_k)*C$ .

### Pasos de la simulación Montecarlo

Los pasos generales para estimar el riesgo fitosanitario mediante la simulación Montecarlo son:

1. Definir las variables que intervienen ( $p$  y  $C$ ).
2. Formular la distribución de probabilidad para cada variable de acuerdo a los valores encontrados en la literatura científica. Por ejemplo, si la probabilidad de introducción de plagas cuarentenarias, varía entre 0.3 y 0.7, entonces es recomendable utilizar la distribución uniforme, si además es conocido el valor más probable, entonces es útil la distribución PERT (Figura 1). En el caso de contar con valores históricos, el ajuste de una distribución estadística es lo recomendable
3. Determinar el número de muestras aleatorias a generar (ej. 10,000), para cada una de las variables



**Figura 1.** Distribuciones asociadas a  $p$ . a) Distribución uniforme, para cuando sólo se conocen los límites inferior y superior en donde es más probable encontrar el valor de  $p$ . b) Distribución Pert, para el caso en que adicionalmente se conoce el valor más probable de  $p$ .

4. Generar los números aleatorios de cada una de las distribuciones
5. Calcular la función de interés ( $R=p*C$ )
6. Generar un histograma de las simulaciones y observar que a medida que aumenta el número de simulaciones de la variable de respuesta el histograma se estabiliza
7. Identificar los cuantiles 0.05 y 0.95 de la distribución asociada, para definir un intervalo de confianza del 90% de probabilidad. Por supuesto que se puede considerar otros niveles de confianza. Si el riesgo fue calculado de acuerdo a los Casos 1 y 2, entonces el riesgo es estimado con la media. Si el riesgo es estimado con la ecuación del Caso 3, el riesgo estimado es la mediana, debido a que la distribución de  $R$  es lognormal, por ser expansión de Fermi.

Los ejemplos siguientes, fueron el producto de 10,000 simulaciones debido a que con éste número fue observado la estabilización de los resultados.

**Ejemplo:**

**a) Riesgo por introducción de una plaga cuarentenaria asociada a la importación de manzana**

Para realizar la simulación se consideró un área de producción de manzana de 23,000 ha en Chihuahua y la plaga cuarentenaria de interés fue la polilla (*Adoxophyes orana*): (familia: Tortricidae). Debido a que tenían registros de valores aproximados de probabilidad y consecuencias, se aplicó la ecuación: Caso 2:  $R=p_1*C_1 + p_2*C_2 + \dots + p_k*C_k$ . Las probabilidades y consecuencias fueron definidos previamente por el personal técnico a capacitar (Figura 2).

El histograma de 10,000 simulaciones de  $R$ , indicó que el riesgo económico en pesos por la introducción de *Adoxophyes orana*, se encuentra entre \$12,468 y \$41,922 (US \$593-US\$1997), con 90% de probabilidad y promedio de \$27,652.44 (US \$1316). En particular, si

Nombre de la variable	p	Distribución	Probabilidad de ocurrencia (pi)	Ocurre (0, 1) con probabilidad p	C	Distribución	Min	Valor más probable	Max	\$ Consecuencia (Ci)	Riesgo de Introducción: Probabilidad*Impacto: R=Suma(Oi*Ci)
Propagación por viento	p1	Bernulli	0.6	RiskBernoulli(G3)	C1	Pert	\$ 300.00	\$ 500.00	\$ 600.00	RiskPert(L3,M3,N3)	RiskMakeInput(H3*O3,RiskName("Riesgo"))
Propagación por herramienta	p2	Bernulli	0.1	RiskBernoulli(G4)	C2	Pert	\$ 500.00	\$ 700.00	\$ 900.00	RiskPert(L4,M4,N4)	RiskMakeInput(H4*O4,RiskName("Riesgo"))
Propagación por implementos agrícolas	p3	Bernulli	0.3	RiskBernoulli(G5)	C3	Pert	\$ 100.00	\$ 150.00	\$ 300.00	RiskPert(L5,M5,N5)	RiskMakeInput(H5*O5,RiskName("Riesgo"))
Propagación por lluvia	p4	Bernulli	0.1	RiskBernoulli(G6)	C4	Pert	\$ 50.00	\$ 100.00	\$ 400.00	RiskPert(L6,M6,N6)	RiskMakeInput(H6*O6,RiskName("Riesgo"))
Propagación por insectos	p5	Bernulli	0.8	RiskBernoulli(G7)	C5	Pert	\$ 5,000.00	\$ 10,000.00	\$ 20,000.00	RiskPert(L7,M7,N7)	RiskMakeInput(H7*O7,RiskName("Riesgo"))
Propagación por ser humano	p6	Bernulli	0.4	RiskBernoulli(G8)	C6	Pert	\$ 1,000.00	\$ 2,000.00	\$ 5,000.00	RiskPert(L8,M8,N8)	RiskMakeInput(H8*O8,RiskName("Riesgo"))
Riesgo subproductos	p7	Bernulli	0.1	RiskBernoulli(G9)	C7	Pert	\$ 500.00	\$ 1,000.00	\$ 1,500.00	RiskPert(L9,M9,N9)	RiskMakeInput(H9*O9,RiskName("Riesgo"))
Presencia hospedantes principales	p8	Bernulli	0.9	RiskBernoulli(G10)	C8	Pert	\$ 5,000.00	\$ 10,000.00	\$ 20,000.00	RiskPert(L10,M10,N10)	RiskMakeInput(H10*O10,RiskName("Riesgo"))
Presencia hospedantes alternos	p9	Bernulli	0.8	RiskBernoulli(G11)	C9	Pert	\$ 2,000.00	\$ 2,500.00	\$ 3,000.00	RiskPert(L11,M11,N11)	RiskMakeInput(H11*O11,RiskName("Riesgo"))
Sobrevivencia a métodos para erradicación de plaga	p10	Bernulli	0.2	RiskBernoulli(G12)	C10	Pert	\$ 1,000.00	\$ 1,500.00	\$ 3,000.00	RiskPert(L12,M12,N12)	RiskMakeInput(H12*O12,RiskName("Riesgo"))
Estado de desarrollo adecuado de la plaga	p11	Bernulli	0.5	RiskBernoulli(G13)	C11	Pert	\$ 5,000.00	\$ 10,000.00	\$ 20,000.00	RiskPert(L13,M13,N13)	RiskMakeInput(H13*O13,RiskName("Riesgo"))
1. Riesgo de Introducción (R): $R=p_1*C_1 + p_4*C_4 + \dots + p_{11}*C_{11} =$										RiskOutput()+SUMA(P1:P13)	

**Figura 2.** Programación en EXCEL con @Risk, para estimar el riesgo económico por introducción de plaga cuarentenaria en un envío de manzana de importación.

se tenía previsto únicamente \$20,000 (US \$952) para proteger las 23,000 ha de producción nacional de manzana, lo más probable es que el riesgo rebase por un poco más de \$7,000 (US \$333) (Figura 3).

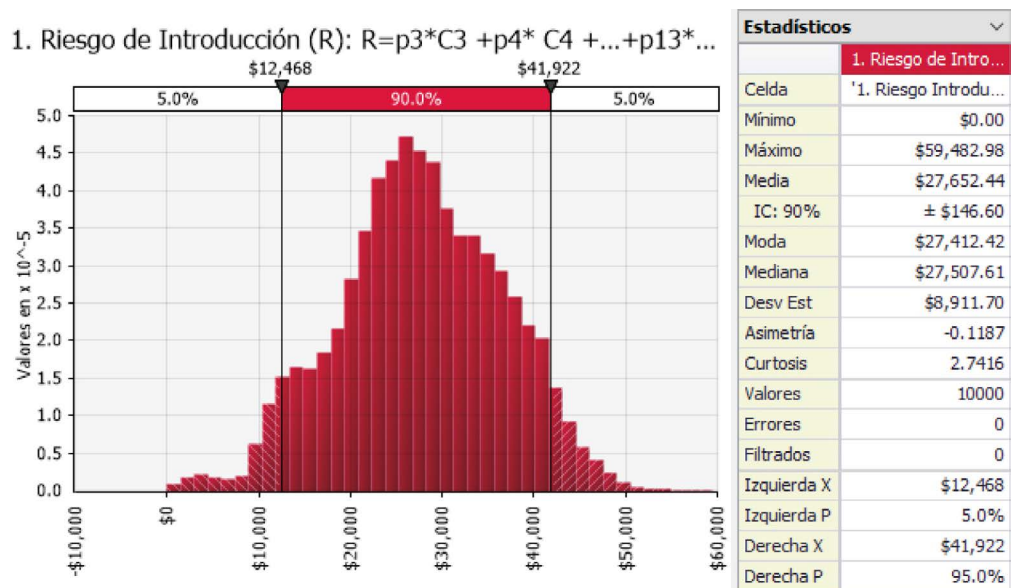
**b) Toneladas infestada con plaga**

Se desea tener una idea sobre el total de toneladas (t) contaminadas de un envío de importación de frutas, que oscilan entre 1,300 y 1600 t, que llegan a México en promedio de manera semestral, las cuales son sometidas a las medidas fitosanitarias: tratamiento durante el transporte ( $p_1$ ), control químico ( $p_2$ ), tratamiento postcosecha ( $p_3$ ) y humedad relativa adversa ( $p_4$ ) (Figura 4).

Al producir 10,000 simulaciones Montecarlo de  $R=C*f*p_1*p_2*...*p_4$ , se estima que la mediana de la distribución lognormal es de 26 t, con un promedio de 30 t, (Figura 5). Se observa que, de acuerdo con la frecuencia de importaciones, dos en promedio de entre 1,300 y 1,600 t, y con probabilidades “pequeñas” de supervivencia, las 26 t, estarían afectadas. Se toma la mediana, ya que la distribución esperada por la expansión de Fermi es lognormal. En particular, más de 75 t, estarían afectadas con una probabilidad del 5% (Figura 5).

**c) Estimación de la probabilidad de establecimiento**

La probabilidad de establecimiento de una plaga cuarentenaria (PE), es posible estimarla utilizando la expansión de Fermi como:  $PE=R/(C*p_1*p_2*...*p_k)$ . El resultado indica que existe una probabilidad de establecimiento de la plaga de 0.000026, de acuerdo con los datos definidos (Figura 6).



**Figura 3.** Histograma de 10,000 simulaciones Montecarlo, para estimar el riesgo por pérdida económica derivado de la introducción de plaga cuarentenaria a través de la importación de manzana.

Concepto	Variable	Nombre	Distribución	Min	Valor más probable	Max	$R=C*freq*p1*p2*...*p8$
Volúmen de toledadas en riesgo por envío (C)	C	Volúmen de importación en	Uniforme	1300		1600	1,450
Frecuencia de importaciones por año (promedio= 2 envíos) numero de envíos al año	freq		Poisson		2		2
Efectividad del tratamiento aplicado durante el transporte del producto a importar	p1	Efectividad trat	Uniforme	0.3		0.4	0.35
Manejo de plagas (Control químico, biologico)	p2	NO Efectividad de control	Uniforme	0.2		0.4	0.3
Tratamiento postcosecha)	p3	No Efectividad	Uniforme	0.2		0.3	0.25
Transporte	p4	Resistencia	Uniforme	0.3		0.5	0.4
<b>2. Toneladas afectadas (R): <math>R=C*freq*p4*p2*...*p8</math> =</b>							<b>30</b>

Figura 4. Estimación del número potencial de toneladas afectadas por plagas cuarentenarias, de un envío de frutas.

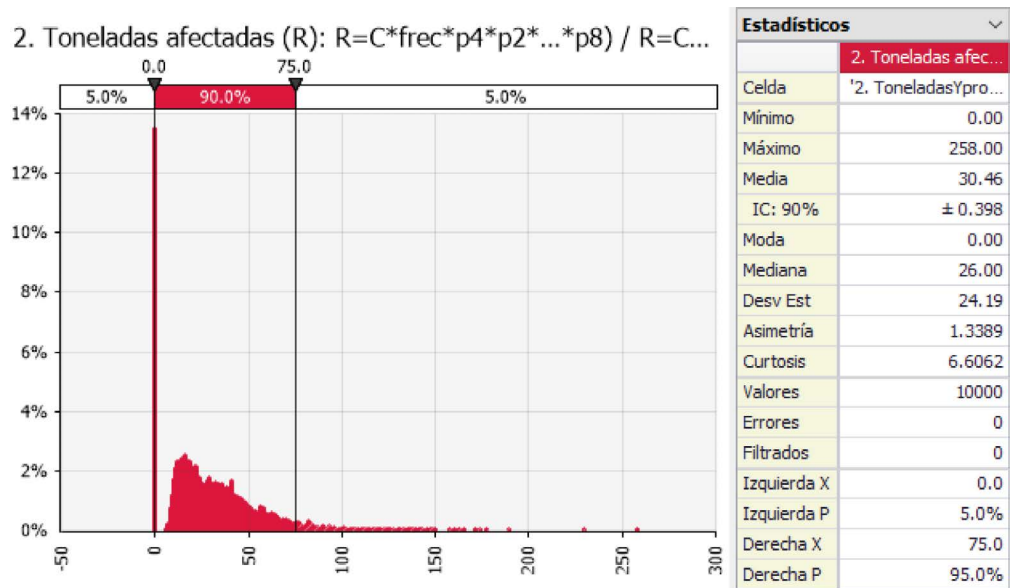


Figura 5. Límites de confianza del 90% de probabilidad, del número de toneladas de manzana afectadas por la presencia de plaga cuarentenaria asociado a importaciones de frutas que en promedio llegan a México en dos ocasiones.

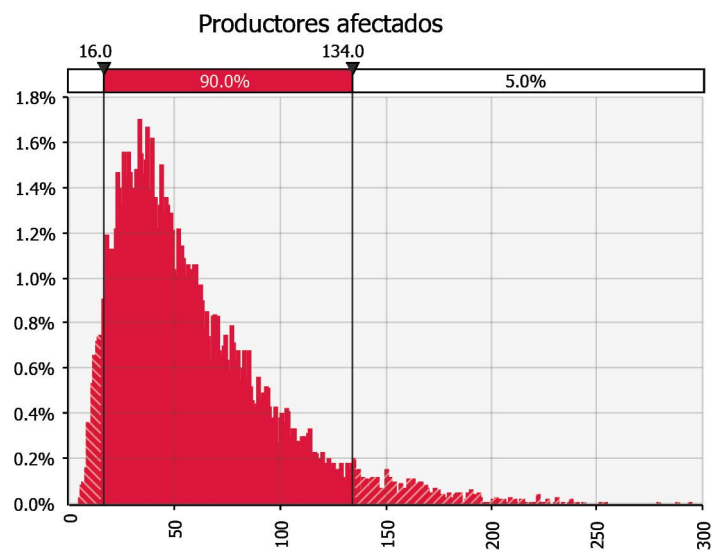
Concepto	Sustento científico	Variable	Nombre de la variable	Distribución	Min	Valor más probable (p)	Max	Probabilidad establecimiento: $PE=R/(C*p1*p2*...*$
Población mínima necesaria para el establecimiento (ha): R		R	Población mínima para	Poisson			2	2.00
Población total en en riesgo (ha): C		C	Volúmen de importación	Uniforme	15,000,060		30,000,000	22,500,030
Existen en el área de ARP otras especies que son vectores		p1	Presencia de otros	Uniforme		0.1	0.2	0.15
Temperatura favorables para que la plaga complete su desarrollo	Gilardi et al. (2014), demostraron que temperaturas de 23 a 31°C favorecen la	p2	Temperatur a favorable	Uniforme		0.8	0.9	0.85
Humedad relativa favorable para el desarrollo de la plaga	Gilardi et al. (2014), demostraron que a humedad relativa del 75% se favorece la	p3	Humedad relativa	Uniforme		0.2	0.5	0.35
Presencia de barreras u obstaculos naturales	La orografía de México es principalmente montañosa, lo que significa que tiene cimas	p4	Presencia de	Uniforme		0.1	0.3	0.20
Viabilidad de las estructuras de resistencia de la plaga	El patógeno puede sobrevivir hasta 5 años en el suelo sin pérdida de viabilidad o	p5	Resistencia de la plaga	Uniforme		0.8	0.9	0.85
Presencia de enemigos naturales de la plaga en el área de ARP		p6	1-presencia de	Uniforme		0.3	0.6	0.45
<b>5. Probabilidad de establecimiento (PE): <math>PE=R/(C*P1*p2*...*p6)</math></b>								<b>0.000026</b>

Figura 6. Estimación mediante simulación Montecarlo con 10,000 simulaciones de la probabilidad de establecimiento con la expansión de Fermi.

**d) Estimación del impacto económico y laboral**

Para estimar el impacto económico y laboral se consideraron los valores y distribuciones. El histograma de las 10,000 simulaciones Montecarlo, indicó con un 90% de probabilidad, que el número de productores afectados varía entre 16 y 134 (Figura 7).

Respecto al impacto económico, se estimó que, si la plaga en cuestión se introdujese en territorio nacional se perderían en promedio: 131 ha de cultivo, equivalente a \$8,629.77 pesos mexicanos (US \$410) por daño económico, \$112,160.34 pesos (US \$5,341) por pérdidas en mercado interno y \$3,419,063.76 pesos (US \$162,812) en el mercado de exportación (Figura 8).



**Figura 7.** Histograma del número de productores afectados por la introducción de plaga cuarentenaria.

Concepto	Variable	Distribución	Min	Valor más probable (pi)	Max	p°C	Ri=Ci*p1*p2*...*pk
superficie total (ha) sembrada con cultivos hospedantes o potenciales en el área de ARP	C1	pert	44,000	49,000	55,000	49,166.67	131 <b>6. Pérdida en producción (ha), R1:</b>
Producción (\$) en el área de ARP por ha:	C2	normal		\$ 3,244,362.45	\$ 730,959.37	3,244,362.45	\$ 8,629.77 <b>7. DE: Daño económico(\$), R2:</b>
Mercado interno (\$): C3	C4	Pert	\$ 40,000,000.00	\$ 42,000,000.00	\$45,000,000.00	\$ 42,166,666.67	\$ 112,160.34 <b>8. Pérdidas económica en mercados internos (\$), R3:</b>
Mercado de exportación (\$): C4	C5	normal		\$1,285,396,669.00	\$ 300.00	\$ 1,285,396,669.00	\$ 3,419,063.76 <b>9. Pérdidas en mercados de exportación (\$), R4:</b>
Número de productores de manzana: C5	C3	Pert	2450	25000	30000	22,075.00	59 <b>10. Número de productores afectados, R5:</b>
Es necesario un vector para la dispersión de la plaga	p1	Uniforme	0.8		0.9	0.85	
Presencia del vector en el área de ARP	p2	Uniforme	0.1		0.4	0.25	
Existen en el área de ARP otras especies que son vectores	p3	Uniforme	0.5		0.6	0.55	
temperatura favorables para que la plaga complete su desarrollo	p4	Uniforme	0.8		0.9	0.85	
Humedad relativa favorable para el desarrollo de la plaga	p5	Uniforme	0.2		0.5	0.35	
presencia de barreras u obstáculos naturales	p6	Uniforme	0.1		0.3	0.20	
Viabilidad de las estructuras de resistencia de la plaga	p7	Uniforme	0.8		0.9	0.85	
Presencia de enemigos naturales de la plaga en el área de ARP	p8	Uniforme	0.3		0.6	0.45	

**Figura 8.** Valores iniciales y finales para estimar el impacto económico y laboral por introducción de plaga cuarentenaria con 10,000 simulaciones Montecarlo.

### Conclusión

La simulación Montecarlo, representa un método estadístico que permite medir la incertidumbre asociado a la introducción de plagas cuarentenarias, mediante la incorporación de distribuciones estadísticas de las variables que intervienen en la estimación del riesgo, como la probabilidad de introducción y las consecuencias asociadas, lo anterior, a través de la generación de miles de muestras provenientes de distribuciones estadísticas asociadas. Este método estadístico potencia la estimación cualitativa que científicos y profesionales de la fitosanidad realizan en el diseño de medidas fitosanitarias con el objetivo de minimizar la introducción de plagas que afectan a los cultivos del país.

Tipo de Innovación	Transferido	Actividad sustantiva	Impacto-Sector	Indicador general	Indicador específico	Indicador general
De procesos	SENASICA	Vinculación	Sector Cuaternario	Económico	Competitividad	Economía
Incremental	Inspectores de productos agrícolas de importación y exportación	Vinculación Educación Investigación	Secundario Cuaternario	Ciencia Tecnología y económico Educación	Recursos humanos Ciencia Tecnología	Responsabilidad Ambiental  Educación

