

Investigación

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL VALOR ECONÓMICO DEL SUELO EN SISTEMAS AGRÍCOLAS DE CHILE

Evaluation of the impact of climate change on the economical value of soil in agricultural systems in Chile

Jorge González U.^{1*} y Roberto Velasco H.¹

ABSTRACT

The climatic change would affect yield and management of crops. To the year 2050 the mean temperature would increase 1.5 °C; at year 2100 between 1.0 to 3.5 °C. In Chile there are few studies of this area. At international level are estimated changes in temperate and tropical zones that would affect negatively, for example, wheat (*Triticum vulgare* L.) and corn (*Zea mays* L.) production. The objective of this study was to determine the relationship between agricultural/cattle systems and climatic change using the Ricardian Method. Specific objectives were to evaluate and quantify the relationship of climatic variables (precipitation and temperature) with economical variables under several realities of agricultural farms, to simulate the impact of scenarios of climatic change, propose general orientations of adaptation and evaluate the Ricardian Method with Chilean data. Economical and productive information of farmers belonging to the Groups of Technologic Transfer (GTT) of the Agricultural Research Institute (INIA) was collected. The Ricardian Method explained 37.6% of soil value variation. Highest values were in areas with moderate temperatures and precipitations. Temperature had lower relationship with soil value than precipitation. Under specific conditions (type of producer, irrigation, extension) were detected behaviors that require further analysis. Upon simulating change of temperature and precipitation, the negative impacts in soil value tended to be of lower magnitude that in warm regions. A tendency was observed to be beneficial when increasing temperature, and neutral to positive with less precipitations. The outputs could guide initially specific strategies of adaptation and mitigation.

Key words: climate change, Ricardian method, land productivity, land value, policy of adaptation

RESUMEN

El cambio climático afectaría los rendimientos y manejo de los cultivos agrícolas. Se estima que al año 2050 la temperatura media aumentaría 1,5 °C, y al 2100 entre 1,0 y 3,5 °C. En Chile existen pocos estudios sobre el tema. Internacionalmente se estiman cambios en zonas templadas y tropicales que afectarían negativamente, por ejemplo, al cultivo de trigo (*Triticum vulgare* L.) y maíz (*Zea mays* L.). El objetivo de este estudio fue determinar la relación entre sistemas agropecuarios y cambio climático aplicando el Método Ricardiano. Los objetivos específicos fueron evaluar y cuantificar la relación de las variables climáticas (precipitación y temperatura) con variables económicas bajo diferentes realidades prediales, simular impacto de escenarios de cambio climático, proponer orientaciones generales de adaptación y evaluar el Método Ricardiano con datos chilenos. Se colectó información económica-productiva de agricultores de los Grupos de Transferencia Tecnológica (GTT) del Instituto de

Este artículo está basado en el proyecto SACPR sobre impacto del calentamiento global en Latinoamérica, realizado por la Universidad de Yale, USA, IICA/PROCISUR, Banco Mundial, INIA Chile, EMBRAPA Brasil, INTA Argentina, INIA Uruguay, INIAP Ecuador, INIA Venezuela, y CORPOICA, Colombia..

¹ Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Quilamapu, Chillán, Chile. E-mail: jgonzale@inia.cl * Autor para correspondencia.

Recibido: 22 de enero de 2007.

Aceptado: 31 de mayo de 2007.

Investigaciones Agropecuarias (INIA). El Método Ricardiano explicó el 37,6% de la variación del valor del suelo. Los mayores valores estaban en localidades con temperaturas y precipitaciones moderadas. La temperatura presentó menor relación con el valor del suelo que la precipitación. Bajo algunas condiciones (tipo de productor, riego, capacitación) se detectaron comportamientos que requieren mayor análisis. Al simular cambios de temperatura y precipitación los impactos negativos en el valor del suelo tienden a ser menores que en regiones cálidas. Incluso se observó una leve tendencia a ser beneficiosos al aumentar la temperatura, y neutros a positivos con precipitaciones menores. Los resultados pueden orientar inicialmente estrategias específicas de adaptación y mitigación.

Palabras clave: cambio climático, Método Ricardiano, productividad, valor suelo, políticas de mitigación.

INTRODUCCIÓN

La agricultura depende de factores climáticos como temperatura y precipitación. Aunque hay evidencias del calentamiento global y que éste debiera afectar la productividad agrícola, existen pocos antecedentes cuantificados del impacto de este fenómeno. No obstante, estudios como el de Jones *et al.* (1997), plantean que los efectos directos serían sobre los rendimientos y el manejo de cultivos, y que los efectos indirectos influirían en aspectos de análisis técnico económico de implementación de nuevas políticas y estrategias. A lo anterior se asocia la dificultad de anticipar impactos, debido a que las respuestas de los productores y de los cultivos, vía cambio tecnológico, son inciertas. La Comisión Europea señala que hacia el año 2050 la temperatura media del planeta se incrementará en 1,5 °C, y en el 2100 lo hará entre 1,0 y 3,5°C (European Commission, 1997).

Prácticamente no existen en Chile estudios que entreguen datos o relaciones cuantificables entre factores climáticos, características productivas y valores económicos de sistemas agrícolas, que permitan desarrollar o aplicar modelos que contribuyan a orientar estrategias de respuesta al cambio climático. El escenario podría ser complejo si se considera que el sector agropecuario genera del orden del 6,5% del Producto Geográfico Bruto Nacional (ODEPA, 2006), ocupa el 11,6% de la fuerza de trabajo (INE 2006), y genera el 18% de las exportaciones nacionales (Banco Central, 2006).

Existen estudios internacionales que estiman impactos posibles del cambio climático (Rosenzweig y Parry, 1994; Rosenzweig e Iglesias, 1994; Jones *et al.*, 1997; CGIAR, 1998) que, en términos generales, han descrito eventuales cambios significativos en zonas templadas y tropicales en el África Sub-Sahara. También en Brasil se han realizado estudios (Siqueira *et al.*, 1994; Sanghi *et al.*, 1997; Alves y Evenson, 1996; Mendelsohn, 1996) que sugieren, entre otros aspectos, la eventual caída en la productividad de trigo y maíz, y la tendencia a impactos más negativos en el noreste del país.

El presente estudio es parte de un proyecto apoyado por el Departamento de Silvicultura y Estudios Ambientales de la Universidad de Yale, USA, cofinanciado por el Banco Mundial, y donde participan IICA/PROCISUR, e Institutos de Investigación Agrícola del Cono Sur. El objetivo es generar información nacional preliminar del efecto del cambio climático global en sistemas agropecuarios, y cuantificar la relación de la temperatura y precipitación con algunas características económicas de sistemas agrícolas. Dado que los efectos del cambio climático son acumulativos y de mediano a largo plazo, se espera hacer una contribución para generar bases de política pública agrícola en torno al tema y estrategias de adecuación productiva y tecnológica del sector.

MATERIALES Y MÉTODOS

El Método Ricardiano

El supuesto fundamental del Método Ricardiano (MR) es que el agricultor busca maximizar su utilidad económica tomando sus decisiones de acuerdo a los precios de mercado, y otras fuentes, como las variables climáticas. El desarrollo fundamental del MR fue realizado por Mendelson *et al.* (1994) y se ha aplicado en Estados Unidos (Mendelsohn *et al.*, 1994; Mendelsohn, 1996; 1999; 2001), Brasil (Mendelsohn *et al.*, 2001), India (Dinar *et al.*, 1998; Kumar y Parikh, 2001), Gran Bretaña (Maddison, 2000) y Canadá (Reinsborough, 2003). El MR postula la relación entre productividad y clima (Mendelsohn *et al.*, 1994), pudiendo estimar numéricamente impactos de variables climáticas sobre variables agrícolas. El MR incorpora la productividad usando variables económicas proxy, como ingreso rural o, como en este estudio, el valor económico del suelo, a partir de estimaciones del agricultor. El principio indicado se describe en la ecuación (1) (Mendelson *et al.*, 1994), que constituye la expresión fundamental del MR:

$$V = P_{LE} e^{\Phi t} d_t = f [\sum P_i Q_i (X, F, Z, G) - \sum R_x] e^{\Phi t} d_t \quad (1)$$

donde V es el valor básico o intrínseco de la explotación agrícola representado por la productividad; P_{LE} es la variable económica proxy cuantificable; P_i es el precio de mercado de la producción i; Q_i es la cantidad producida de i; X es un vector de ingreso económico no agrícola; F es un vector de las variables del clima consideradas; Z es un conjunto de variables del suelo; G es un conjunto de otras variables económicas como acceso a mercados y transporte; R es un vector de precios de insumos y gastos x; t es tiempo; y Φ es la tasa de descuento. El MR integra y examina cómo un conjunto de variables independientes exógenas (F, Z, y G) afectan la variable dependiente productividad, usando, como se indicó, una variable económica proxy.

Dada la dificultad práctica y conceptual de medir objetivamente productividad (V), en (2) se expresa el MR en forma simplificada, y en función de una variable proxy (Mendelson *et al.*, 1994):

$$P_{LE} e^{\Phi t} d_t = f [\sum P_i Q_i (X, F, Z, G) - \sum R_x] \quad (2)$$

Descrita la conceptualización fundamental del MR en los términos específicos de este estudio, cabe señalar que la variable dependiente proxy valor del suelo responde a la influencia marginal del clima, específicamente a las variables independientes temperatura y/o precipitación, y de otras variables agronómicas y de mercado, relación que se expresa en la regresión cuadrática (3) siguiente (Mendelson *et al.*, 1994):

$$P_{LE} = B_0 + B_1 F + B_2 F^2 + B_3 Z + B_4 G + u \quad (3)$$

donde B_0 es el intercepto; B_1 y B_2 son coeficientes del vector de variables climáticas (temperatura y/o precipitación) en su expresión lineal (F) y cuadrática (F^2); B_3 es el coeficiente del vector de variables de suelo (Z) y B_4 del vector (G) de variables de mercado relacionadas, y “u” es el término de perturbación u error de la regresión. La expresión cuadrática (3) refleja la forma no lineal que adquiere el valor del suelo como respuesta a la incidencia de las variables temperatura y/o precipitación.

Cuando el coeficiente B_2 del término cuadrático F^2 es positivo, la función de respuesta del valor del suelo es una curva de forma convexa, y cuando B_2 es negativo la función toma forma de curva cóncava (Mendelson *et al.*, 1994). El MR postula, basándose en información agronómica, que la respuesta del valor del suelo toma forma cóncava en relación con temperatura y/o precipitación; es decir, existe una temperatura (o precipitación) dada donde el valor del suelo es máximo, la que cambia para cada predio.

Aplicación del Método Ricardiano: Conceptos

El MR no explica los mecanismos de adaptación de los agricultores al cambio climático, ni establece o verifica decisiones y/o percepciones de futuro del agricultor; sólo refleja el comportamiento de una variable dependiente, el valor del suelo, en respuesta al efecto de variables independientes. Para ello, el MR requiere información desde los agricultores, respecto al escenario de cambio de clima y de sus decisiones, que estimen y maximicen su utilidad (Mendelsohn *et al.*, 1994).

Lo anterior se sustenta en que: (i) para maximizar su utilidad, el productor debe tomar decisiones comparando aquellas que adicionan valor con aquellas que lo disminuyen, o incrementan costo, y (ii) que este comportamiento puede ser expresado en los mismos términos o algoritmos que la ecuación fundamental del MR (1), tal como se expresa en (4) (Mendelson *et al.*, 1994):

$$\text{Max } \sum_i P_i Q_i (X, F, Z, G) - R_X \quad (4)$$

La aplicación del MR, complementado con conocimiento agronómico y juicios de expertos, permite orientar cómo los productores pueden adecuar sus decisiones al efecto clima, variando labores de manejo, uso o cambio de insumos, inversiones, cambio de rubros o variedades, entre otros; pudiendo proponerse en algún grado adaptaciones tipo, por zonas o macro zonas.

El presente estudio de aplicación del MR (Mendelson *et al.*, 1994) se basa en la obtención, mediante encuestas, de información económica y productiva de pequeños y medianos productores de Chile, y la integración con información, fundamentalmente de suelo y clima, obtenida de la forma que se indica mas adelante.

Agricultores encuestados, información colectada y análisis estadístico

Se encuestó a 382 agricultores, mayoritariamente pertenecientes al Programa Grupos de Transferencia Tecnológica (GTT) de INIA, 60% considerados pequeños agricultores (ODEPA, 2000). Se entrevistó a 66 agricultores del área Centro Norte del país, 71 del Centro, 176 del Centro Sur y 69 del Sur. La encuesta fue elaborada y validada por la School of Forestry & Environmental Studies de Yale University, USA, y se tradujo y ajustó al contexto del agro chileno, manteniendo la codificación original de preguntas y respuestas en formato Excel. Se colectó información de antecedentes generales de predios, cultivos, ganadería, aspectos socioeconómicos y georeferenciación. Mediante esta encuesta se obtuvo la información de valor del suelo, la variable dependiente del MR, al indicar cada entrevistado el valor promedio estimado de una hectárea de su predio. Con el resto de la información colectada se generaron estadígrafos usados para la discusión y análisis de contexto de los resultados de la aplicación del MR.

Con la información de georeferenciación de cada agricultor (predio) entrevistado, desde bases de datos y fuentes de origen satelital de los Estados Unidos, Yale University capturó y asignó a cada predio información que constituyeron las variables independientes en la regresión del MR. Las variables independientes asignadas fueron: experiencia del agricultor, pendiente y textura del suelo, temperatura y precipitación medias, en verano, primavera, otoño e invierno. La información de encuestas o de origen satelital se incorporó codificada en una planilla Excel previamente diseñada por Yale University; el mismo procedimiento se siguió para la estructuración de los algoritmos matemáticos pertinentes para la generación de resultados (regresiones y simulaciones). Se utilizó el programa computacional SAS (1999).

Zona geográfica

La zona geográfica considerada se extendió entre 25°17' y 44°04' latitud Sur, y entre 68°17' y 71°43' longitud Oeste. Comprende casi toda la zona agrícola de Chile, exceptuando las Regiones de Parícuta y Tarapacá en el norte del país (Novoa *et al.*, 1989) y las Regiones de Aysén y Magallanes en el extremo sur. En la zona indicada se siembra el 94% del trigo, 96% del maíz, 100% del arroz (*Oriza sativa* L.), 94% de las papas (*Solanum tuberosum* L.), 97% de frutales de exportación, 74% de la masa ganadera, 98% de

la leche producida, 75% de la carne bovina, 54% de las praderas naturales, y el 87% de las praderas establecidas (ODEPA, 2006). Los agricultores encuestados pertenecen a las siguientes subzonas: Centro Norte (25°17' a 32°16' lat. Sur) con clima desértico, transicional y estepario; Centro (32°02' a 35°01' lat. Sur) con clima templado cálido a templado cálido húmedo; Centro Sur (34°41' a 39°37' lat. Sur) con clima mediterráneo a templado y frío lluvioso, y Sur (39°16' a 44°04' lat. Sur) con clima templado lluvioso y frío lluvioso (Novoa *et al.*, 1989).

Aplicaciones del Método Ricardiano

En primer lugar se calcularon estadígrafos de variables relevantes, con un fin descriptivo y de comprensión del contexto productivo y socioeconómico de los agricultores encuestados, y que paralelamente, constituyen insumo directo para la aplicación del MR. En segundo lugar se realizaron dos grupos de ajustes de regresiones, de acuerdo a la inclusión o no de las variables climáticas independientes temperatura o precipitación, versus la variable dependiente valor del suelo. En cada grupo de regresiones ajustadas se evaluaron escenarios que consideraron: (i) a la totalidad de los productores encuestados; (ii) a aquellos que declararon poseer suelo irrigado; (iii) a aquellos con suelos no irrigados; (iv) a los pequeños productores; (v) a medianos/grandes productores; (vi) a aquellos que manifestaron recibir extensión agrícola permanente y, por último, (vii) a quienes afirmaron no recibir dicho servicio. En último término, se simularon ocho (8) escenarios futuros de cambio climático sobre el valor estimado del suelo, que tienen cierta posibilidad de ocurrir.

Estos escenarios simulados se definieron en forma común por los países participantes del proyecto SACPR. Dos escenarios incrementan la temperatura media actual en 2,5 y 5,0 °C, *ceteris paribus*. Otros dos escenarios incrementan y disminuyen la precipitación media anual actual en 10%, respectivamente, *ceteris paribus*. Finalmente, los cuatro escenarios restantes combinan cambios de temperatura y precipitación: aumento en 2,5 °C y 10% precipitación; aumento en 5,0 °C y 10% precipitación; aumento en 2,5 °C y disminución 10% precipitación y aumento en 5,0 °C con disminución 10% precipitación. Cada escenario se simuló para el total de agricultores encuestados, para el segmento de pequeños productores, y para el segmento de mediano/grande productores.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estadígrafos relevantes

La superficie promedio de los predios encuestados fue 39,1 ha físicas, con un rango de 0,21 a 694 ha y moda de 12 ha. En promedio, el 44% de la superficie encuestada posee riego, y el 56% es de seco; en la zona centro norte el 86% de la superficie es regada, mientras que en la zona sur sólo es el 1,4%, debido a su alta pluviometría.

Los principales cultivos declarados fueron papa, trigo y maíz, presentes en el 24% de los agricultores. En la zona centro norte predominan frejol (*Phaseolus vulgaris* L.), maíz, papa, vid (*Vitis vinifera* L.) de mesa y pisquera, olivos (*Olea europaea* L.), nogales (*Juglans regia* L.) y paltos (*Persea americana* L.). En la zona centro el 43% cultiva maíz, y también destacan los nectarinos (*Prunus persica* L.), duraznos (*Prunus persica* L.), uvas de mesa y viníferas, papa, trigo, manzano (*Malus domestica* Borkh.) y cerezos (*Prunus avium* L.). Las hortalizas son frecuentes, pero en términos relativos no ocupan superficies extensas. En la zona sur la papa es cultivada por el 50% de los encuestados, y son frecuentes trigo, avena (*Avena sativa* L.) y praderas naturalizadas, especialmente gramíneas.

Un 55% de los encuestados riega con agua proveniente de canales artificiales de distribución, un 8% desde fuentes subterráneas y/o embalses intraprediales, y el 37% directamente con agua de las precipitaciones. El tipo de riego predominante es gravitacional, y solo un 21% de los agricultores tiene riego tecnificado.

El 97% de los encuestados ha percibido cambios de clima en las últimas décadas. Los cambios más mencionados fueron: sequías más prolongadas, temperaturas promedio más elevadas y desplazamiento de

las estaciones climáticas. No obstante el alto grado de percepción de cambios en el clima, ello no se ha traducido en acciones masivas o frecuentes de adecuación y adaptación de los sistemas productivos. Para el 78% de los encuestados, la principal limitante de adaptación o adecuación es la disponibilidad financiera para realizar obras de ingeniería, de infraestructura, planificación predial y manejo de cultivos. Respecto a las variables socioeconómicas, el 86% de los jefes de explotación indicó que la agricultura es su principal ocupación laboral. El 45% de los predios presentó un valor estimado del suelo de al menos US\$2 000 por hectárea; el 40% se ubicó entre US\$2 000 y US\$10 000, y valores superiores a US\$10 000 fueron poco frecuentes. La media nacional fue US\$5 910, con un rango de US\$400 a US\$39 000. En la zona centro, cercana a grandes ciudades y con más densidad poblacional, se detectó el mayor valor promedio estimado, US\$10 950 por hectárea; lo contrario se observó en la zona sur, US\$3 914 por hectárea. Cuando se incluyó la valorización estimada de la infraestructura (casas, galpones, bodegas, cercos y otras) el valor del suelo fue US\$11 335 por hectárea. El valor del dólar considerado a noviembre de 2006 era \$530 chilenos.

El 92% de las explotaciones accede regularmente a asistencia técnica o extensión agrícola; del porcentaje indicado, 65% recibe apoyo de entidades públicas, y un 35% de organizaciones no gubernamentales. Un 25% de productores recibe extensión agrícola desde entidades públicas y privadas a la vez; esta tendencia es similar en todas las zonas estudiadas. Estas cifras son consideradas superiores a la realidad nacional dado el carácter de integrantes de GTT de la mayoría de los encuestados.

Aplicación del Método Ricardiano

El modelo de regresión general del MR explicó mediante el Coeficiente de Determinación (R^2) el 37,6% de la variación nacional del valor estimado del suelo. Cuando R^2 es ajustado, el poder explicativo es 33,9%. El R^2 obtenido es moderado, no obstante, Gujarati (1996) indica que en series de datos transversales tomados desde grandes superficies, valores de R^2 como el detectado son satisfactorios. Gujarati (1996) refuerza lo anterior si la regresión obtenida es significativa (Prueba F), y si los coeficientes de la regresión, mayoritariamente, tienen el mismo signo de la especificación teórica del modelo propuesta y son estadísticamente significativos.

Se encontró un valor $F = 10,08$ con una probabilidad de no significancia ($Pr > F$) muy mínima ($Pr < 0,0001$) (**Cuadro 1**). Mayoritariamente los valores estimados de los parámetros son significativos con probabilidad (Prueba t) $Pr < 5-10\%$, incluso del orden del 20%, lo que es aceptable según Gujarati (1996). Las variables independientes que aportan mayor poder explicativo (valor estimado) son: (i) con signo positivo: temperatura de otoño y precipitación de otoño, es decir, el valor del suelo se incrementa cuando la temperatura y precipitación de otoño también lo hacen; y (ii) con signo negativo: temperatura de primavera, pendiente del suelo, textura media-arcillosa y temperatura de invierno, es decir, cuando éstas se incrementan el valor del suelo disminuye, lo cual es un resultado razonable. Variables explicativas que se relacionan poco con el valor del suelo son: edad del agricultor, precipitación de primavera y temperatura de verano.

Cuadro 1. Coeficientes de regresión general anual según el Método Ricardiano, incluyendo todos los agricultores encuestados.

Table 1. Annual global regression coefficients in accordance to the Ricardian Model, including all interviewed farmers.

	Modelo DF: 21 Valor F: 10,08	Error DF: 351 Pr > F < 0,0001	Total DF: 372		
Variable	DF	Coefficiente estimado	Error	Valor T	Pr > t
Intercepto	1	58442	54574	1,07	0,28
Experiencia agricultor	1	-51,81	22,26	-2,33	0,02*
Pendiente media	1	-4385,74	1096,53	-4,00	<,0001*
Pendiente máxima	1	-1915,683	936,86	-2,04	0,04*
Textura media	1	-4607,54	2349,41	-1,96	0,05*
Textura arcillosa	1	-965,83	867,71	-1,11	0,27
Temperatura verano	1	-329,78	1707,17	-0,19	0,85
Temperatura invierno	1	-4272,03	1374,18	-3,11	0,002*
Temperatura otoño	1	6988,95	2585,12	2,70	0,007*
Temperatura primavera	1	-7334,12	3664,86	-2,00	0,05*
Precipitación verano	1	-1073,04	1207,18	-0,89	0,37
Precipitación invierno	1	-717,17	1493,24	-0,48	0,63
Precipitación otoño	1	1029,71	4098,27	0,25	0,80
Precipitación primavera	1	-87,16	2319,63	-0,04	0,97
(Temperatura verano) ²	1	-10,81	77,17	-0,14	0,89
(Temperatura invierno) ²	1	231,21	98,16	2,36	0,02*
(Temperatura otoño) ²	1	-380,47	180,77	-2,10	0,04*
(Temperatura primavera) ²	1	453,63	202,25	2,24	0,03*
(Precipitación verano) ²	1	17,10	16,26	1,05	0,29
(Precipitación invierno) ²	1	2,48	3,88	0,64	0,52
(Precipitación otoño) ²	1	-10,97	19,24	-0,57	0,57
(Precipitación primavera) ²	1	7,90	13,46	0,59	0,56

Significancia estadística según Prueba t con Pr (α) \leq 5%.

DF: grados de libertad; T: valor T calculado; Pr> |t|: probabilidad sobre t estadístico; ()²: variable en expresión cuadrática

Se presentan 11 regresiones que relacionan la variable climática independiente temperatura con el valor estimado del suelo (**Cuadro 2**). T1 explica sólo el 6% (R^2) de la variación del valor del suelo cuando se analiza el total de los predios encuestados, sin embargo, en los pequeños productores (T2) el ajuste es incluso mayor ($R^2 = 14\%$) que en el caso de los medianos/grandes productores (T3). En el análisis que considera la situación de suelo irrigado o no irrigado, las regresiones explican del orden de un 10% de la variación total del valor del suelo (T4, T5 y T7), con la excepción de pequeños productores con suelo no irrigado (T6) en que R^2 alcanzó el 23%. Lo anterior podría indicar la dependencia de la productividad agrícola del factor temperatura en sistemas de secano de pequeños productores, percepción que coincide con el menor R^2 obtenido en pequeños productores con regadío (T4). En el caso de extensión agrícola (T9 y T11) se determinó mayor relación con la temperatura cuando no existe apoyo técnico. La respuesta más clara es en pequeños productores que declaran no tener asistencia técnica con regularidad (T9; $R^2 = 38\%$); lo contrario sucede en los medianos/grandes productores ($R^2 = 3\%$) que declaran tener asistencia técnica con regularidad (T10). Lo anterior es concordante con propósitos universales de políticas de extensión agrícola tendientes a independizar a los productores de los efectos climáticos, vía adaptación e innovación tecnológica.

Cuadro 2. Regresiones (T1 a T11) generadas por el Método Ricardiano. Temperatura vs. valor del suelo (Y), considerando productores pequeños y medianos/grandes, suelo irrigado y extensión agrícola.

Table 2. Regressions (T1 to T11) generated by Ricardian Method. Temperature vs. value of soil (Y), considering small and medium/big producers, irrigated soil and agricultural extension.

Identificación	Situación analizada	Regresión	R ²
T1	Total suelo*	$Y = 32,21X^3 - 1135,9X^2 + 12048X - 31787$	0,06
T2	Total suelo* - Pequeño productor	$Y = -363,21X^2 + 5749,2X - 12513$	0,14
T3	Total suelo* - Mediano/grande productor	$Y = 95,53X^2 + 1953X - 3062,2$	0,03
T4	Suelo irrigado - Pequeño productor	$Y = -496,96X^2 + 9584,6X - 33879$	0,02
T5	Suelo irrigado - Mediano/grande productor	$Y = 396,58X^2 - 5816,2X + 30460$	0,10
T6	Suelo no irrigado - Pequeño productor	$Y = -261,51X^2 + 3568,7X - 2062,3$	0,23
T7	Suelo no irrigado - Mediano/grande productor	$Y = -63,45X^2 + 1453,7X - 2397,6$	0,04
T8	Total suelo* - Con extensión agrícola - Pequeño productor	$Y = -410,17X^2 + 6695,9X - 16994$	0,13
T9	Total suelo* - Sin extensión agrícola - Pequeño productor	$Y = 144,03X^2 + 2211,6X - 3364,7$	0,38
T10	Total suelo* - Con extensión agrícola - Mediano/grande productor	$Y = -68,35X^2 + 1505,5X - 1963,1$	0,03
T11	Total suelo* - Sin extensión agrícola - Mediano/grande productor	$Y = -142,95X^2 + 3388,9X - 10214$	0,12

* Incluye suelos irrigados y no irrigados

Cuadro 3. Regresiones (P1 a P11) generadas por el Método Ricardiano. Precipitación vs. valor del suelo (Y), considerando productores pequeños y medianos/grandes, suelo irrigado o no irrigado, y extensión agrícola.

Table 3. Regressions (P1 to P11) generated by Ricardian Method. Precipitation vs. value of soil (Y), considering small and medium/big producers, irrigated or not irrigated soil and agricultural extension.

Identificación	Situación analizada	Regresión	R ²
P1	Total suelo*	$Y = 0,03X^3 - 9,62X^2 + 608,17X + 952,24$	0,21
P2	Total suelo* - Productor pequeño	$Y = -2,43X^2 + 23182X + 4755,6$	0,11
P3	Total suelo* - Productor mediano/grande	$Y = -0,39X^2 - 14,71X + 10459$	0,30
P4	Suelo irrigado - Productor pequeño	$Y = -2,62X^2 + 229,91X + 5381,4$	0,25
P5	Suelo irrigado - Mediano/grande productor	$Y = -3,35X^2 + 411,87X + 1548,7$	0,27
P6	Suelo no irrigado - Pequeño productor	$Y = 2,62X^2 + 229,91X + 5381,4$	0,25
P7	Suelo no irrigado - Mediano/grande productor	$Y = 0,07X^2 - 89,49X + 12431$	0,32
P8	Total suelo* - Con extensión agrícola - Pequeño productor	$Y = -2,28X^2 + 217,05X + 4942,4$	0,09
P9	Total suelo* - Sin extensión agrícola - Pequeño productor	$Y = 2,20X^2 - 305,95X + 12734$	0,17
P10	Total suelo* - Con extensión agrícola - Mediano/grande productor	$Y = -0,074X^2 - 57,91X + 10821$	0,34
P11	Total suelo* - Sin extensión agrícola - Mediano/grande productor	$Y = -1,28X^2 + 147,82X + 5191,4$	0,20

* Incluye suelos con riego y no irrigados

La curva típica generada por el MR para la regresión T1, que relaciona temperatura con valor del suelo en la totalidad de los agricultores se puede observar en la **Figura 1**. Los mayores valores estimados del suelo tienden a concentrarse en predios ubicados en zonas con temperaturas medias moderadas, aproximadamente 7-9 °C. Los sistemas agrícolas con un menor valor del suelo se relacionan con temperaturas medias anuales más extremas. En la **Figura 2** se grafica el mejor ajuste entre las variables temperatura media vs. valor del suelo (regresión T9; $R^2 = 38\%$), logrado en pequeños agricultores que no reciben extensión agrícola.

Figura 1. Relación gráfica y funcional en Chile de la temperatura media y el valor del suelo ajustados según el Método Ricardiano.

Figure 1. Graphic and functional relationship in Chile of the mean temperature and the value of the soil adjusted according to the Ricardian Method.

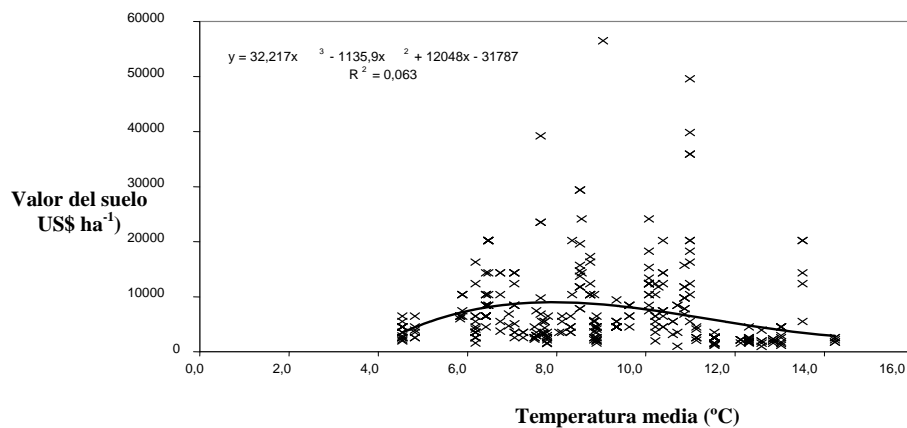
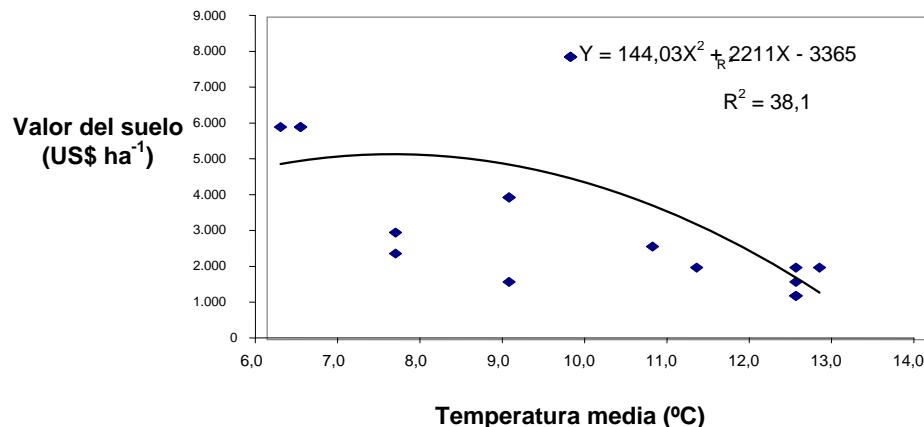


Figura 2. Relación gráfica y funcional en Chile de la temperatura media y el valor del suelo ajustados por el método Ricardiano, en pequeños agricultores sin extensión agrícola.

Figure 2. Relationship, graph and functional, in Chile of the half temperature and the value of the soil, fittings for the Ricardian method, in small farmers without agricultural extension.



Se calcularon 11 regresiones (P1 a P11) que relacionan la variable climática independiente precipitación con el valor estimado del suelo (**Cuadro 3**). P1 explica el 21% (R^2) de la variación del valor del suelo cuando se analiza el total de los predios encuestados. En general hubo mayor ajuste que en el análisis con la variable temperatura. Sin embargo, a diferencia de lo obtenido con la variable temperatura, en pequeños productores (P2) se detectó un R^2 menor (11%) que en los medianos/grandes productores (P3; $R^2 = 30\%$). Esto podría relacionarse con una mayor productividad media de los medianos/grandes productores, pero con mayor sensibilidad a la precipitación, dado una mayor variabilidad espacial en sus predios. También podría relacionarse con mayor marginalidad de los predios de pequeños productores, por tanto, menores rendimientos esperados y menor variación relativa en respuesta a cambios en la precipitación.

En situación de suelo irrigado el modelo explica al menos un 25% (R^2) de la variación del valor del suelo en todas las regresiones ajustadas (P4, P5, P6 y P7). Con suelo irrigado el modelo ajustó de manera muy similar en ambos estratos de agricultor (P4 y P5). Con suelo no irrigado se determinó un moderado mayor poder explicativo en los medianos/grandes productores, respecto los pequeños (P7; $R^2 = 32\%$ vs. P6; $R^2 = 25\%$). Los resultados indican que en los agricultores entrevistados la precipitación es más importante en sus decisiones que la variable temperatura. Luego, la aplicación de estrategias de adaptación relacionadas con precipitación podrían tener un impacto importante en la productividad (**Cuadro 3**).

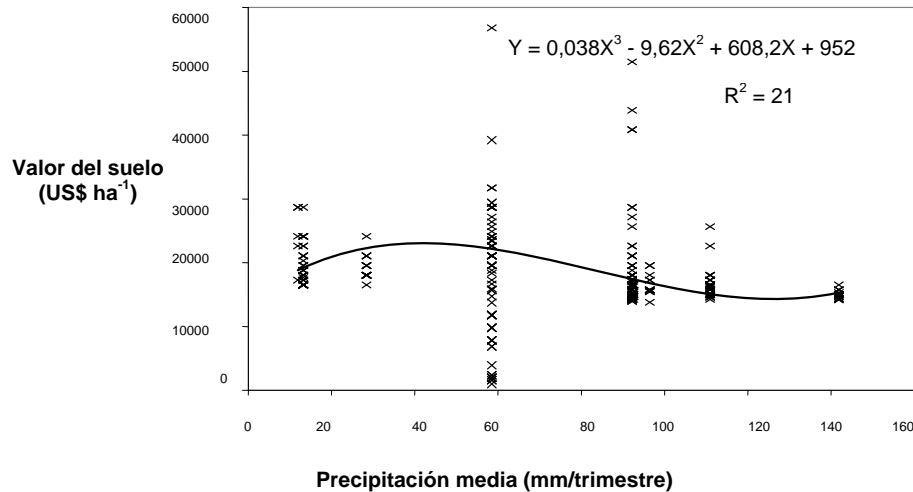
En el escenario de extensión agrícola (P8, P9, P10 y P11) se encontró una mayor relación o dependencia con la precipitación cuando no existe apoyo técnico en pequeños productores (P9; $R^2 = 17\%$). Por otra parte, en medianos/grandes productores, el MR explicó más la variación del valor del suelo cuando existe capacitación tecnológica (P10). No son claras las causas de este resultado, pero podría suponerse que la capacitación de este estrato (medio/grande) es intensa y de gran cobertura predial en factores de manejo e insumos, pero no es así en la implementación (masiva) de riego, por ejemplo la zona sur del país, lo que puede generar sensibilidad a la variación en la precipitación. Se observaron R^2 algo superiores en regresiones de medianos/grandes productores, tendiendo a disminuir cuando no existe apoyo técnico (**Cuadro 3**); por tanto podría sugerirse que con asistencia técnica a pequeños productores se atenúa más el efecto de la precipitación que en agricultores de mayor tamaño. Lo anterior puede dar más impulso a estrategias para la agricultura familiar campesina relacionadas con el factor precipitación y tecnologías asociadas.

La curva típica del MR generada con la totalidad de los productores, donde los mayores valores estimados del suelo se concentran en predios con precipitación media moderada, del orden de 60 mm por trimestre, se puede observar en la **Figura 3**. Los sistemas agrícolas con menor valor del suelo, y probablemente menos productividad y mayor dependencia del factor precipitación, se presentan en zonas con precipitaciones medias más extremas.

En Chile, en general, los efectos del cambio climático simulado podrían afectar en forma importante algunos escenarios, estratos de productores y zonas del país; los efectos se visualizan de menor magnitud que los pronosticados para otras zonas del continente. Por ejemplo, Mendelsohn (1996) estimó un impacto negativo en importantes sectores agrícolas del Brasil, con fuertes implicancias económicas, debido al predominio de climas ya muy calurosos, que los hace más sensibles que zonas templadas como Chile. En este contexto, la temperatura media en Chile es moderada a baja respecto al resto de Latinoamérica, con promedio anual de 13,7 °C; 14,4 °C en verano y 4,6 °C en invierno. La precipitación media anual acumulada es 735 mm, con un rango en el área estudiada de 21,8 mm (centro norte) a 1 350 mm (sur) (Novoa *et al.*, 1989).

Figura 3. Relación, gráfica y funcional, en Chile de la precipitación media y el valor del suelo, ajustados por el metodo Ricardiano.

Figure 3. Relationship, graph and functional, in Chile of the half precipitation and the value of the soil, fittings for the Ricardian method



Los efectos de los escenarios simulados se presentan en los Cuadros 4 y 5. Considerando el total de agricultores, los escenarios que sólo incrementan temperatura generan un efecto moderado positivo en el valor del suelo, máximo (1,48%) con un incremento simulado de 5 °C sobre la temperatura media nacional actual; lo anterior podría estar reflejando que en el área bajo estudio hay una gran superficie (centro sur y sur) con temperaturas medias a bajas, cuyos sistemas de producción, mayoritariamente ganaderos, podrían favorecerse levemente. Con cambios en la precipitación se obtienen efectos de mayor magnitud y, en algunos casos, en sentido opuesto al caso de la variación en temperatura; cuando se incrementa la precipitación el valor del suelo aumenta levemente (6,9%), situación simétrica se observó al disminuir la precipitación. Puede estar manifestándose la influencia de sistemas de mayor productividad de las zonas centro y centro norte, cuyas precipitaciones son bajas y concentradas en el invierno, y que tienden a neutralizar la realidad contraria que existe en el sur del país.

Los escenarios que combinan cambios en temperatura y precipitación corroboran las tendencias descritas. Cuando aumenta la precipitación hay una valorización moderada del suelo (8%), independiente del aumento de la temperatura. En cambio el suelo se desvaloriza (6%) cuando disminuye la precipitación (**Cuadros 4 y 5**). El comportamiento encontrado puede ser contradictorio con percepciones de que el cambio climático siempre afectará negativamente al sector agropecuario; sin embargo, los posibles efectos positivos moderados señalados, también fueron detectados por Alves y Evenson (1996) y Sanghi *et al.* (1997) en Brasil, en que la variable dependiente rentabilidad mostró un efecto negativo en la región centro oeste de ese país, pero también reflejó efectos beneficiosos en zonas del sur de Brasil, cuyo clima templado es parecido al de Chile.

Cuadro 4. Cambio relativo (%) del valor del suelo bajo diferentes escenarios simulados de variación de temperatura y precipitación.

Table 4. Relative change (%) of soil value under simulated stages of variation of temperature and precipitation.

Escenario simulado	Productores total	Productores pequeños	Productores medianos/grandes
Incremento de 2,5 °C	0,74	1,94	11,57
Incremento de 5,0 °C	1,48	3,89	23,14
Incremento de 10% en precipitación	6,95	2,51	-28,38
Disminución de 10% en precipitación	-6,95	-2,51	28,38
Incremento de 2,5 °C + incremento de 10% en precipitación	7,69	4,45	-16,81
Incremento de 5,0 °C + incremento de 10% en precipitación	8,42	6,39	-5,24
Incremento de 2,5 °C + disminución de 10% en precipitación	-0,21	-0,56	39,95
Incremento de 5,0 °C + disminución de 10% en precipitación	-0,47	1,38	51,51

El impacto según estrato de productor también se observa en los **Cuadros 4 y 5**. En los pequeños productores la valorización sigue un patrón similar al del conjunto de los agricultores encuestados. El mayor impacto es en escenarios simulados que incrementan temperatura y precipitación, con un 6% de incremento en el valor del suelo. En los otros escenarios, los cambios relativos en el valor del suelo son del orden de 3% cuando se incrementa la temperatura, y 2,5% cuando varía la precipitación. El valor del suelo no cambia cuando aumenta la temperatura y disminuye la precipitación. El resultado pronosticado en este estrato puede responder a la presencia de pequeños productores con suelos marginales de menor productividad, por tanto, cambios de temperatura y precipitación pueden tener un impacto relativo menor. También podría reflejarse la existencia en las zonas centro norte, centro, e incluso centro sur, de productores pequeños con un nivel de adopción de tecnología de gran cobertura intrapredial, por lo que perciben menor dependencia de su gestión de los fenómenos climáticos. Adicionalmente, puede incidir que en las pequeñas superficies el valor de mercado puede ser más estable, al existir, por una razón de escala, menos alternativas de uso rentable.

Cuadro 5. Valor absoluto del suelo bajo los escenarios de variación de temperatura y precipitación simulados. US\$ por hectárea.

Table 5. Absolute value of the value of soil low simulated stages of variation of temperature and precipitation. US\$ per hectare.

Escenario simulado	Productores total	Productores pequeños	Productores medianos/grandes
Valor actual medio del suelo (US\$ ha ⁻¹)	5.910	6.145	5.461
Incremento de 2,5 °C	5.954	6.263	6.175
Incremento de 5,0 °C	5.999	6.394	7.105
Incremento de 10% en precipitación	6.351	6.303	3.911
Disminución de 10% en precipitación	5.499	5.990	7.625
Incremento de 2,5 °C + incremento de 10% en precipitación	6.402	6.341	4.543
Incremento de 5,0 °C + incremento de 10% en precipitación	6.453	6.564	5.175
Incremento de 2,5 °C + disminución de 10% en precipitación	5.543	6.110	7.642
Incremento de 5,0 °C + disminución de 10% en precipitación	5.587	6.231	8.274

En los medianos y grandes productores el valor del suelo también se incrementa moderadamente en los escenarios que aumentan temperatura, aunque alcanza al 23% con el escenario que aumenta la temperatura en 5 °C. Con escenarios que simulan cambios en la precipitación los efectos son más marcados que en pequeños productores y el total de encuestados. Un aumento de precipitación generaría una disminución de importancia (28%) del valor del suelo; efecto contrario se produciría al disminuir aquella. Dos realidades del agro nacional

pudieran explicar este comportamiento; por un lado en las zonas norte, centro norte y parte de la zona centro sur predomina una agricultura de exportación hortofrutícola de alta tecnología, susceptible a daño e incremento de costos con eventos excesivos e inesperados de lluvia, lo que puede generar una mayor aversión a este fenómeno en estos productores. Paralelamente, en la zona sur los sistemas son mayoritariamente ganaderos bajo condiciones de alta pluviometría, por tanto un escenario de aumento de lluvia podría tener una percepción negativa respecto a la rentabilidad futura, dada una mayor complejidad y costo en el manejo del ganado, praderas, y adecuación de suelo y drenaje.

Los escenarios que aumentan temperatura y precipitación también manifiestan disminución del valor del suelo, aunque más atenuado (-5%), posiblemente por el efecto beneficioso parcial del aumento de temperatura. Los escenarios que combinan aumento de temperatura y disminución de precipitación, generan un incremento teórico del valor del suelo en un rango sorpresivo de 40 a 50%. Lo anterior puede responder a explicaciones similares a las presentadas para los escenarios en que sólo cambia el nivel de precipitaciones.

En general, el comportamiento del total de los productores involucrados posee tendencias y magnitudes más similares a las del estrato de pequeños productores que al de medianos/grandes agricultores, debido, probablemente, a la conformación de la muestra encuestada, en que mayoritariamente (60%) pertenecen a la pequeña agricultura. Las tendencias, comparando entre columnas en los **Cuadros 4 y 5**, aunque en algunos escenarios parecen contradictorias, pueden o están reflejando contextos disímiles entre tipos o estratos de productores.

CONCLUSIONES

- Existe en Chile una relación entre variables climáticas y variables económicas de los sistemas de producción agropecuarios.
- El Método Ricardiano pudo explicar en forma satisfactoria ($R^2 = 38\%$) la variación total nacional de la variable valor del suelo agrícola en respuesta al cambio climático. La variable independiente temperatura presentó menor relación con el valor de suelo que la variable independiente precipitación. Con restricciones adicionales, como presencia o ausencia de riego y de extensión agrícola, se detectaron relaciones diversas que requieren análisis más específicos.
- Los escenarios de cambio en temperatura y precipitación mostraron menor impacto en el valor del suelo que los reportados para regiones más cálidas de América. Las predicciones a nivel nacional reflejan impactos neutros con leve tendencia a ser beneficiosos cuando se incrementa la temperatura. Con incremento de precipitación el impacto es de mayor magnitud, neutro a levemente favorable en pequeños agricultores y negativo en medianos/grandes productores.
- Se generaron resultados preliminares para la discusión del impacto del cambio climático en el agro, con variaciones que pudieran alertar u orientar, inicialmente, estrategias y políticas efectivas de adaptación. La toma de decisiones debiera discriminar situaciones climáticas, socioeconómicas, de escala y técnico/productivas.
- El Método Ricardiano presentó un nivel promisorio de ajuste a la situación chilena con generación de regresiones, relación variables clima-económicas, curvas de respuesta y simulación de escenarios. Las variables independientes que aportaron mayor nivel explicativo de la variable dependiente, valor del suelo agrícola, fueron temperatura de primavera, temperatura y precipitación de otoño, pendiente del suelo y temperatura de invierno.

RECONOCIMIENTOS

El presente trabajo se realizó como parte del proyecto “Apoyar el plan para estudio del impacto del calentamiento global en Latinoamérica como parte del clima y la pobreza rural: incorporación del clima a las estrategias de desarrollo rural” (SACPR), realizado en forma conjunta por la Universidad de Yale, USA, IICA/PROCISUR, Banco Mundial, INIA Chile, INIA Uruguay, INTA Argentina, EMBRAPA Brasil, INIAP Ecuador, INIA Venezuela y CORPOICA Colombia.

Los autores agradecen el trabajo y colaboración del Programador y Técnico Estadístico del INIA CRI Quilamapu Sr. José Cares G.

LITERATURA CITADA

Alves, D., and R.E. Evenson. 1996. Global warming impacts on Brazilian agriculture: estimates of the Ricardian Model. p. B30-B31. *In* Conference on environmetrics in Brazil, São Paulo. Instituto de Matemática e Estadística, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Banco Central. 2006. Estudios económicos estadísticos. Banco Central de Chile. Disponible en <http://www.bcentral.cl/esp> Leído febrero 2007.

CGIAR. 1998. CGIAR Mid-Term Meeting 1998: preliminar end-of-meeting report. Consultive Group for International Agricultural Research (CGIAR), Washington D.C., USA.

Dinar, A., R. Mendelsohn, R. Evenson, J. Parikh, A. Sanghi, K. Kumar, *et al.* (eds.) 1998. Measuring the impact of climate change on Indian agriculture. Technical Paper No. 402. World Bank, Washington D.C., USA.

European Commission. 1997. Climate change and agriculture in Europe: assessment of impacts and adaptations: Summary Report. 37 p. European Commission, Luxembourg, Grand Duchy of Luxembourg.

Gujarati, D.N. 1996. Econometría. Capítulo 5. p. 102-139. 2ª ed. Regresión con dos variables: estimación por intervalos y prueba de hipótesis. McGraw-Hill Interamericana, D.F. México.

INE. 2006. Instituto Nacional de Estadísticas (INE), Santiago, Chile. Disponible en <http://www.ine.cl> Leído mayo 2007.

Jones, J.W., N.B. Pickering, C. Rosenzweig, and K.J. Boote. 1997. Simulated impacts of global change on crops. p. 411-434. Technical Bulletin N° 100. University of Florida, Gainesville, Florida, USA.

Kumar, K., and J. Parikh. 2001. Indian agriculture and climate sensitivity. *Global Environmental Change* 11:147-154. The agriculture and the climatic change: the function of the FAO. Available in <http://www.fao.org/Noticias/1997/971201>. Accessed 19 May 2006.

Maddison, D. 2000. An hedonic analysis of agricultural land prices in England and Wales. *Eur. Rev. Agric. Econ.* 27:519-532.

Mendelsohn, R. 1996. Estimating the market impacts of global warming in Brazil. 63 p. *In* Conference on environmetrics in Brazil, São Paulo. Abstracts. Instituto de Matemática e Estadística, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Mendelsohn, R. 1999. Efficient adaptation to climate change. *Climatic Change* 45:583-600.

Mendelsohn, R. (ed). 2001. Global warming and the American economy: A regional assessment of climate change. 224 p. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, United Kingdom.

Mendelsohn, R., A. Dinar, and A. Sanghi. 2001. The effect of development on the climate sensitivity of agriculture. *Environment and Development Economics* 6:85-101.

Mendelsohn, R., Nordhaus, W. and D. Shaw. 1994. The impact of global warming in agriculture: A Ricardian analysis. *American Economic Review* 84:772-780.

Mendelsohn, R., W. Nordhaus, and D. Shaw. 1994. Measuring the impact of global warming on agriculture. *Am. Econ. Rev.* 84:753-771.

Novoa, R., V. Sergio, y P. Del Canto. 1989. Mapa agroclimático de Chile. 221 p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Santiago, Chile.

ODEPA. 2000. La agricultura chilena del 2010. Tres visiones sociopolíticas. 238 p. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), Santiago, Chile.

ODEPA. 2006. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Disponible en <http://www.odepa.gob.cl>. Leído noviembre 2006.

Reinsborough, A. 2003. A Ricardian model of climate change in Canada. *Can. J. Econ.* 36:21-40.

Rosenzweig, C., and A. Iglesias (eds.) 1994. Implications of climate change for international agriculture: crop modeling study. p. 94-103. July. Environmental Protection Agency (EPA), Washington D.C., U.S.A.

Rosenzweig, C., and M. Parry. 1994. Potential impact of climate change on world food supply. *Nature* 367:133-138.

Sanghi, A., D. Alves, R. Evenson, and R. Mendelsohn. 1997. Global warming impacts on Brazilian agriculture: estimates of the Ricardian model. Universidad de São Paulo y Fundación de Pesquisas Económicas (FIPE), São Paulo, Brasil. *Economía Aplicada* 1(1):7-34.

SAS. 1999. SAS//STAT. Guide for personal computers. Version 8.0. 1028 p. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA.

Siqueira, O., J.R. Farias, and L.M. Sans. 1994. Potential effects of global climate change for Brazilian agriculture: applied simulation studies for wheat, maize and soybeans. *Revista Brasileira de Agrometeorología* 2:115-129.