

Evaluación de la calidad de los suelos de sistemas frutícolas de la Zona Central de Chile

Evaluation of soil quality of fruit systems in the Central Zone of Chile

Carlos Guillermo Chuncho ^{1*}
Eduardo Arrellano ²

¹Docente de la Carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Loja, Ecuador.

²Profesor Asociado, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

*Autor para correspondencia: cgchuncho@uc.cl

RECIBIDO: 21/09/2018

APROBADO: 14/12/2018

RESUMEN

La zona central de Chile tiene el mayor porcentaje de árboles frutales por área plantada. Estos sistemas agrícolas han provocado un cambio en su fertilidad natural, productividad y propiedades; concomitantemente, pérdida de su calidad. Para encontrar e identificar prácticas de manejo adecuadas para cultivos frutales, el método de evaluación relacionado con la calidad del suelo tiene la mayor influencia. El objetivo principal de este estudio fue generar índices de calidad del suelo (ICS) para sistemas frutales en la Zona Central de Chile, basados en propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo de las Regiones IV y VI. Con estas propiedades, a través de un análisis factorial, los indicadores se seleccionaron y normalizaron en un ICS a través de funciones lineales y no lineales. Los resultados generales muestran que los indicadores con el peso final más alto en la IV Región fueron conductividad eléctrica, carbono orgánico, N total, Na intercambiable, S disponible, arcilla y arena. Mientras que los indicadores en la VI Región fueron CIC, arcilla, K disponible, Ca y Mg intercambiables. Con respecto a la calidad del suelo, las Regiones IV y VI mostraron un SQI de 0,15 y 0,17, respectivamente. Estos valores no mostraron diferencias significativas ($p = 0,2613$).

Palabras claves: Índices de calidad del suelo; Calidad del suelo; Zona Central

ABSTRACT

The central zone of Chile has the highest percentage of fruit trees per planted area. These agricultural systems have caused a change in their natural fertility, productivity and properties; concomitantly, loss of quality. To find and identify suitable management practices for fruit crops, the evaluation method related to soil quality has the greatest influence. The main objective of this study was to generate soil quality indexes (ICS) for fruit systems in the Central Zone of Chile, based on physical, chemical and biological properties of soil in Regions IV and VI. With these properties, through a factorial analysis, the indicators were selected and normalized in an ICS through linear and non-linear functions. The general results show that the indicators with the highest final weight in the IV Region were electrical conductivity, organic carbon, total N, exchangeable Na, S available, clay and sand. While the indicators in the VI Region were CIC, clay, available K, Ca and Mg interchangeable. With respect to soil quality, Regions IV and VI showed an SQI of 0.15 and 0.17, respectively. These values did not show significant differences ($p = 0.2613$).

Key words: soil quality indexes; soil quality; Central zone.

INTRODUCCIÓN

La Zona Central de Chile se caracterizan por tener clima variable, no es desértico ni húmedo, presenta veranos calurosos y secos; y, una temperatura asociada a las precipitaciones anuales en invierno (Ceccarelli *et al.* 2007; Sanz *et al.* 2017). Estas características biofísicas ha permitido que esta área posea el mayor porcentaje (80 %) de superficie plantada de frutales (CONICYT 2008), convirtiéndola en la principal área geográfica de exportación (Echeverría *et al.* 2012). Sin embargo, estos sistemas agrícolas han provocado afectaciones a las propiedades físicas, químicas y bioquímicas; y, sobre su fertilidad natural y productividad del suelo (Muñoz *et al.* 2007; Stolpe *et al.* 2008). Además, la intensidad del laboreo ha ocasionado daños a la biota, temperatura, aireación, y al grado de contacto entre el material orgánico y las partículas minerales del suelo (Kladivko 2001; Tilman *et al.* 2001).

Frente a los impactos negativos sobre el suelo, producto de los sistemas frutícolas tradicionales (Weissenberger 2015), es necesario el desarrollo de nuevos sistemas de gestión que reduzcan al mínimo la degradación del suelo; por consiguiente, para encontrar e identificar prácticas adecuadas de manejo para cultivos frutícolas, el método de evaluación relacionado con la calidad de suelo es el que tienen mayor influencia (Liu *et al.* 2014; Duval *et al.* 2013; Ditzler y Tugel 2002).

Al evaluar la calidad del suelo (CS), se conocerá el estado, uso y manejo sostenible del suelo, debido a su relación con calidad ambiental, metas de la agricultura y aspectos económicos (Larson y Pierce 1994; Herrick 2000; Karlen *et al.* 2001; Doran 2002). Una de las desventajas al evaluar la CS es su determinación, debido a su especificidad a un sitio y suelo; sin embargo, puede ser evaluada a partir del uso de indicadores (Singh *et al.* 2014). Estos indicadores son un grupo compuesto de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Bloem *et al.* 2009; Marzaioli *et al.* 2010; Shukla *et al.* 2006), los cuales serán agrupadas en un conjunto mínimo de datos y transformadas en un índice general (Smith *et al.* 1993; Lee *et al.* 2006). Este índice de calidad del suelo (ICS) informará la aptitud del suelo para cumplir una o más funciones (Armenise *et al.* 2013).

Hay estudios previos realizados sobre el ICS en regiones áridas y semiáridas; y, en zonas del mediterráneo en diferentes sistemas productivos y usos del suelo en otras regiones del planeta (Raiesi y Kabiri 2016; Zornoza *et al.* 2008; Marzaioli *et al.* 2010). Sin embargo, en la zona central de Chile y regiones semiáridas como la Región de Coquimbo, con alta heterogeneidad ambiental (Comisión Nacional del Medio Ambiente 2008), y variedad de usos del suelo (Uribe *et al.* 2014), la evaluación de la CS a través de ICS en sistemas agrícolas es aún desconocida.

Adicionalmente, por los escasos reportes de la calidad del suelo de la zona central de Chile, y sobre la base de la importancia de los ICS, hace necesario su aplicación para monitorear y discriminar las prácticas de manejo en los sistemas agrícolas; y, entender como optimizar los sistemas productivos para incrementar la producción de los cultivos y mejorar la calidad del suelo (Andrews *et al.* 2002; Rezaei *et al.* 2006).

Los objetivos de esta investigación fueron desarrollar ICS a partir de la integración de propiedades físicas, químicas y biológicas, para sistemas frutícolas de la zona central de Chile de predios de las Regiones del Libertador Bernardo O'Higgins y Coquimbo; y, comparar, mediante el uso de los ICS, la CS de los sistemas frutícolas de la zona central de Chile.

■ MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La zona central ocupa el 49,1 % del territorio nacional, es mediterráneo semiárido, con veranos secos e inviernos fríos. La temperatura máxima media es 28,7°C; y, la media mínima de 3,4°C. La precipitación se concentra en invierno con una media anual de 330 mm y un período seco de ocho meses (Martínez *et al.* 2013). En zona central de Chile, la Región de Coquimbo (IV) se caracteriza por tener un clima semiárido, presenta condiciones agroecológicas favorables, lo que ha determinado una rápida expansión de la producción frutícola (Casanova *et al.* 2013). Por su parte la VI Región, se caracteriza por tener un clima templado-cálido con lluvias invernales, una estación seca prolongada y un clima templado de degradación de montaña (Astudillo y Fuentealba, 2011). Esta Región cuenta a nivel nacional con la mayor superficie de plantaciones frutales (24 %) y la segunda de viñas y parronales viníferos (27,6 %) (INE, 2007).

Muestras de suelos

En la IV Región se tomaron muestras de suelos en cinco predios con tres repeticiones cada una, todas con manejo convencional; mientras que en la VI Región las muestras fueron tomadas en 45 sitios establecidos correspondientes a 14 predios, tres corresponde a manejo orgánico. Se determinaron las propiedades físicas, químicas, biológicas (Tabla 1). También se incluyeron metales pesados (Casanova *et al.* 2013).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La zona central ocupa el 49,1 % del territorio nacional, es mediterráneo semiárido, con veranos secos e inviernos fríos. La temperatura máxima media es 28,7°C; y, la media mínima de 3,4°C. La precipitación se concentra en invierno con una media anual de 330 mm y un período seco de ocho meses (Martínez *et al.* 2013) the climate, and the type and time of implementation of a particular management system. The aim of this study was to evaluate the effects of no-tillage (NT. En zona central de Chile, la Región de Coquimbo (IV) se caracteriza por tener un clima semiárido, presenta condiciones agroecológicas favorables, lo que ha determinado una rápida expansión de la producción frutícola (Casanova *et al.* 2013). Por su parte la VI Región, se caracteriza por tener un clima templado-cálido con lluvias invernales, una estación seca prolongada y un clima templado de degradación de montaña (Astudillo y Fuentealba, 2011). Esta Región cuenta a nivel nacional con la mayor superficie de plantaciones frutales (24 %) y la segunda de viñas y parronales viníferos (27,6 %) (INE, 2007).

Muestras de suelos

En la IV Región se tomaron muestras de suelos en cinco predios con tres repeticiones cada una, todas con manejo convencional; mientras que en la VI Región las muestras fueron tomadas en 45 sitios establecidos correspondientes a 14 predios, tres corresponde a manejo orgánico. Se determinaron las propiedades físicas, químicas, biológicas (Tabla 1). También se incluyeron metales pesados (Casanova *et al.* 2013).

Desarrollo de los índices de calidad del suelo (ICS) e identificación de los indicadores

Para determinar los ICS se consideró el enfoque de Andrews *et al.* (2002) farm advisors, resource conservationists, and other land managers may benefit from decision tools that help identify the most sustainable management practices. Indices of soil quality (SQIs: a) identificación de un conjunto mínimo de datos (CMD); b) normalización de los indicadores; c) integración de las puntuaciones de los indicadores en un ICS. Los indicadores fueron seleccionados a través de un análisis factorial con el método de rotación oblicua varimax (Shukla *et al.* 2006). Además, se aplicó una prueba paralela para establecer el número de factores (Buja y Eyuboglu 1992); y, para determinar la idoneidad del análisis factorial y que variables son las más significativas se realizó una prueba de esfericidad de Bartlett y Kaiser-Meyer-Olkin (KMO).

Normalización e integración de los indicadores

Las variables del CMD se transformaron en un ICS. Cada variable del CMD se estandarizó utilizando una función de puntuación no lineal (Andrews y Carroll, 2001). Las formas generales de las funciones son: sigmoidea asintótica superior, asintótica inferior y función gaussiana (Andrews *et al.* 2004). Para transferir los valores del CMD a puntuaciones se utilizó la ecuación 1 de tipo sigmoidea para puntuación

no lineal (Bastida *et al.* 2006); donde: es puntuación no lineal de la variable del suelo que está entre 0 y 1; es la puntuación máxima; valor de la variable del suelo; valor medio de la variable para todo el conjunto de datos; y, pendiente de la ecuación establecida en -2,5 (más es mejor) y 2,5 (menos es mejor) (Zhang *et al.* 2011; Sinha *et al.* 2009).

$$S_{NL} = \frac{a}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^b} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Para la función gaussiana se aplicó la ecuación 2 (Andrews *et al.* 2004). Donde, es la puntuación no lineal de la variable del suelo que está entre 0 y 1; es el valor de la variable del suelo; es el valor de la variable del suelo; y, es la media de la observación para cada indicador.

$$Y = \frac{1}{1 + z(x - a)^2} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Para la función lineal se utilizó ecuación 3 y 4; donde, es el puntaje lineal; valor de la propiedad del suelo; valores inferior y superior de la propiedad del suelo; y, media de la observación para cada indicador. La Ecuación 3 se utilizó para más es mejor y Ecuación 4 para “menos es mejor”. Combinación de ambas para una puntuación óptima.

$$Y = (x - s)/(t - s) \quad (\text{Ecuación 3}) \quad Y = 1 - (x - s)/(t - s) \quad (\text{Ecuación 4})$$

Para la integración de los indicadores se utilizó un métodos aditivo (ecuación 5) (Andrews *et al.* 2002; Masto *et al.* 2008) farm advisors, resource conservationists, and other land managers may benefit from decision tools that help identify the most sustainable management practices. Indices of soil quality (SQIs). Donde, ICS es el valor del índice de calidad del suelo; es la puntuación para el indicador (no lineal o lineal); es el número de indicadores que forman el CMD; es la ponderación final asignado a cada indicador.

$$ICS = \sum_{i=1}^n W_i S_i \quad (\text{Ecuación 5})$$

Para valorar la calidad del suelo se utilizó los siguientes rangos de índices: 08 -1 (alta); 04 –08 (intermedia); y, < 0.4 (baja) (Hernández *et al.* 2016). Finalmente, para determinar diferencias estadísticamente significantes, con un $\alpha=0.05$ entre los ICS de la IV y VI Región se aplicó una prueba t. Análisis estadístico realizado en R (3.2.1), paquetes: psych, nFactors y corplot (Revelle, 2018).

■ RESULTADOS

Desarrollo de los índices de calidad e indicadores analizados para las Regiones Libertador Bernardo O'Higgins y Coquimbo.

Identificación de los indicadores

En la Tabla 2 se muestran los valores de la prueba de esfericidad de Bartlett y KMO. El valor del KMO, 0,72 y 0,69 para la IV y VI Región respectivamente confirma que los datos y el tamaño de la muestra fueron adecuados para el análisis factorial (Kaiser 1974). Del mismo modo, en la Tabla 3, los indicadores tanto para la IV y VI Región, muestran valores sobre 0,6, excepto pH, N disponible, Ac, Ar, As y Pb; sin embargo, fueron considerados dentro del análisis porque están sobre 0.5 (Cerny y Kaiser, 1977). La prueba de esfericidad de Bartlett señala que todas las correlaciones son estadísticamente diferentes de cero (Tabachnick y Fidell, 2007). En conjunto, los valores de KMO y la prueba de Bartlett determinaron normas mínimas para realizar el análisis factorial tanto para la IV y VI Región.

El test KMO, permitió excluir del CMD (Tabla 1) de la IV Región a Fe disponible, metales pesados, pH, Lo y los índices de diversidad de Shannon y Simpson. Del mismo modo, se excluyó a Lo, AA, Da y los índices de diversidad del CMD de la VI Región. Se discriminaron estos indicadores porque no cumplieron el supuesto de normalidad y sus valores de KMO estuvieron bajo 0,5 (Cerny y Kaiser 1977).

Tabla 1. CMD y promedio de los indicadores evaluador en la IV y VI Región

Indicadores	Unidad	Región	
		IV	VI
pH	-	7,36	6,56
Conductividad eléctrica (CE)	dS cm-1	3,31	0,93
Totales			
Carbono orgánico (CO)	%	1,34	2,22
Nitrógeno total (N total)	%	0,11	0,47
C/N		-	10,62
Disponibles			
Nitrógeno (N)	mg Kg-1	35,43	43,40
Fosforo (P)	mg Kg-1	38,17	50,40
Potasio (K)	mg Kg-1	393,84	378,56
Cobre (Cu)	mg Kg-1	12,93	-
Hierro (Fe dispo)	mg Kg-1	11,39	-
Boro (B)	mg Kg-1	2,99	-
Azufre (S)	mg Kg-1	96,76	-
Intercambiable			

Indicadores	Unidad	Región	
		IV	VI
Calcio (Ca)	cmol(+) kg-1	15,97	14,47
Magnesio (Mg)	cmol(+) kg-1	3,63	2,98
Potasio (K)	cmol(+) kg-1	1,11	0,99
Sodio (Na inter)	cmol(+) kg-1	0,42	0,14
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	cmol(+) kg-1	-	4,9
Solubles			
HCO ₃	meq l-1	4,21	-
Físicos			
Agua aprovechable (AA)	%	-	14,66
Arcilla (Ac)	%	14,53	29,40
Limo (Lo)	%	27,06	40,89
Arena (Ar)	%	58,41	29,69
Densidad aparente (Da)	g cm-3	1,43	1,61
Índices diversidad fauna suelo			
Shannon	-	1,56	1,83
Simpson	-	0,71	0,74
Metales pesados			
Plomo (Pb)	mg Kg-1	16,36	12,29
Arsénico (As)	mg Kg-1	9,33	13,84
Cobre (Cu)	mg Kg-1	168,69	110,99

(-) indicadores no medidos

Tabla 2. Pruebas de esfericidad de Bartlett y Kaiser, Meyer y Olkin (KMO).

Prueba	Región IV	Región VI
KMO	0.72	0.69
Bartlett (p)	<0.001	<0.001

La prueba paralela determinó que debe utilizarse tres factores en las dos regiones estudiadas (Buja y Eyuboglu 1992). En el primero y segundo factor se presentaron los indicadores más significativos. El análisis factorial mostró tres factores con valores propios >1, los cuales explicaron el 67 % (IV Región) y 54 % (VI Región) de la varianza del CMD de los indicadores (Tabla 4 y 5). En la IV Región el factor uno presentó la más alta varianza (27,8 %), mientras que el factor dos 22,3 %, y tres 17,2 %. Respecto de la carga de los factores, CO y N total mostraron la carga más alta debido a su alta correlación, lo implica que el factor uno está relacionado con la fertilidad del suelo (Kucharik *et al.* 2001). En el factor dos CE ext, S disponible y Na intercambiable se separan de los indicadores químicos; y, finalmente, en el factor tres, Ac y Ar se distancian de los indicadores físicos (Tabla 3). En consecuencia, CE ext, CO, N total, Na intercambiable, S disponible, Ac y Ar serán los indicadores del modelo para determinar los ICS en la IV Región (Ver Ec. 6).

Tabla 3. Medida de ajuste del muestreo (MAM) para los indicadores del CMD de acuerdo al KMO, aplicados a la IV y VI Región.

Indicador	MAM	
	IV	VI
pH	-	0,58
Conductividad eléctrica (ext)	0,68	0,64
Carbono orgánico	0,84	0,61
Nitrógeno total	0,72	0,66
Relación C/N	-	0,75
Nitrógeno disponible	0,74	0,59
Fosforo disponible	0,86	0,79
Potasio disponible	0,86	0,69
Cobre disponible	0,69	-
Boro disponible	0,80	-
Azufre disponible	0,70	-
Magnesio intercambiable	0,66	0,73
Potasio intercambiable	0,67	0,71
Sodio intercambiable	0,67	-
Calcio intercambiable	-	0,82
Capacidad de intercambio catiónico	-	0,82
HCO ₃	0,71	-
Arcilla	0,50	0,69

(-) indicador no medido

En la VI Región la más alta varianza (22,8 %) presentó el factor uno, seguido del segundo (18,7 %) y tercer factor (12,0 %) (Tabla 5). Ca intercambiable y Mg intercambiable; K disponible, Ac; CIC y As mostraron la más alta carga, lo que denota que estos indicadores son los que tendrán mayor implicancia en el modelo para determinar la CS en la VI Región. K disponible y As son los indicadores que tienen menor correlación tanto en el factor uno, sin embargo, serán determinantes en el modelo de evaluación de CS.

Respecto del peso final CO y N total son los indicadores que exhibieron la ponderación más significativa en la IV Región, mientras que CIC, K disponible, Ca y Mg intercambiable en la VI Región. Los indicadores restantes mostraron una baja contribución a la variabilidad total del modelo factorial. Esto se debió a una menor correlación con los indicadores analizados (Tabla 4 y 5). En la IV Región en los factores se tomaron valores con carga entre 0,78 y 0,99; y, valores superiores a -0,76. En la VI Región se consideraron los valores entre 0,83 y 0,97. Los intervalos de carga en cada uno de los factores y regiones, se consideraron en función de su alta correlación y aporte al modelo de evaluación de calidad del suelo.

Tabla 4. Factores y similitudes para el modelo de tres factores basado en los indicadores del CMD de la IV Región.

Indicadores	Factor1	Factor2	Factor3	Weighted communality	Peso final
Conductividad eléctrica (ext)	0,14	0,93	0,18	0,10	0,07
Carbono orgánico	0,86		0,29	0,13	0,10
Nitrógeno total	0,80		0,25	0,11	0,08
Nitrógeno disponible	0,28	0,33	0,46	0,04	0,03
Fosforo disponible	0,72	0,44		0,11	0,08
Potasio disponible	0,58	0,45	0,20	0,08	0,06
Cobre disponible	0,61	0,14	0,14	0,07	0,05
Boro disponible	0,52	0,71		0,10	0,08
Azufre disponible	-0,21	0,88		0,09	0,07
Magnesio intercambiable	0,54	0,17	0,68	0,08	0,06
Potasio intercambiable	0,50	0,44	0,20	0,07	0,05
Sodio intercambiable	0,19	0,78	0,37	0,08	0,06
HCO ₃	0,72	-0,12	-0,18	0,09	0,07
Arcilla			0,99	0,06	0,05
Arena		-0,17	-0,76	0,04	0,03
Densidad aparente	-0,59	-0,17	0,20	0,06	0,05
SS loadings	4,46	3,57	2,75		
Proportion Var	0,28	0,22	0,17		
Cumulative Var	0,28	0,50	0,67		
Weighted proportion	0,41	0,33	0,26		

Tabla 5. Factores y similitudes para el modelo de tres factores basado en los indicadores del CMD de la VI Región.

Indicadores	Factor1	Factor2	Factor3	Weighted communality	Peso final
pH	0,38	0,21		0,03	0,03
Conductividad eléctrica (ext)		0,34		0,01	0,01
C/N	-0,32	-0,34	-0,10	0,03	0,03
Carbono orgánico	0,39	0,38		0,05	0,04
Nitrógeno total	0,40	0,12		0,03	0,03
Nitrógeno disponible		0,41	0,23	0,02	0,02
Potasio disponible	0,15	0,97		0,12	0,10
Fosforo disponible	0,45	0,62		0,08	0,07
Calcio intercambiable	0,87	0,18		0,14	0,12
Magnesio intercambiable	0,83	0,27	-0,19	0,14	0,11
CIC	0,87	0,37	-0,15	0,15	0,13
Arcilla (Ac)	0,70	-0,21		0,10	0,08

Indicadores	Factor1	Factor2	Factor3	Weighted communality	Peso final
Arena (Ar)	-0,56			0,06	0,05
Arsénico	-0,10		0,98	0,05	0,04
Cobre		0,20	0,73	0,03	0,03
Plomo		0,14	0,62	0,02	0,02
SS loadings	3,87	3,18	2,05		
Proportion Var	0,23	0,19	0,12		
Cumulative Var	0,23	0,42	0,54		
Weighted proportion	0,43	0,35	0,22		

Transformación de los índices

Con base en los resultados expuestos del análisis factorial, los indicadores con el mayor peso final fueron: CE (susp), CO, NT, Na intercambiable, S disponible, Ac y Ar. En la Tabla 6 se menciona las curvas de puntuación y los parámetros seleccionados para la definición del Índice de calidad del suelo de la IV Región.

Al aplicar la ecuación 5, de los valores del peso final y de las ecuaciones de normalización se describe la ecuación 6 (Ec.). N total, CO, CE ext. y Ac son los indicadores que contribuyen con el mayor peso al ICS para la IV Región.

$$ICS_{IV\text{ Región}} = [0,07 * CE] + [0,10 * CO] + [0,08 * NT] + [0,06 * Na] + [0,07 * S] + [0,05 * Ac] + [0,03 * Ar] \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde, es el valor del índice de calidad del suelo de la IV Región; **CE** es Conductividad eléctrica susp (mS/cm); **CO** es carbono orgánico (%); **NT** es nitrógeno total; **Na** es Sodio intercambiable (mg/Kg); **S** es azufre disponible (mg/Kg); **Ac** es arcilla (%); y, **Ar** es arena (%).

Tabla 6. Tipo de curvas de puntuación, parámetros de la ecuación no lineal y lineal, rango, y ecuación de las curvas de normalización para el modelo aplicado a la IV Región.

Indicador	No lineal/linear		Curva de puntuación	Rango	Ecuación de normalización
	Prome- dio	Pendien- te de la ecuación			
Conductividad eléctrica ext. (mS/cm)	3,31	2,5	Menos es mejor	0,42 – 7,03	$CE = \frac{1}{1 + 7,03(a - 3,1)^2}$
Carbono orgánico (%)	1,34	-2,5	Más es mejor	0,24 – 3,23	$CO = \frac{1}{1 + \left(\frac{b}{1,34}\right)^{-2,5}}$
Nitrógeno total (%)	0,13	-2,5	Más es mejor	0,02 – 0,33	$NT = \frac{1}{1 + \left(\frac{c}{0,13}\right)^{-2,5}}$

Indicador	No linear/linear		Curva de puntuación	Rango	Ecuación de normalización
	Promedio	Pendiente de la ecuación			
Sodio intercambiable (mg/Kg)	0,42	-	Optimo	0,05 – 1,32	$Na = \frac{(d-1,32)}{(0,05-1,32)} - \frac{(d-1,32)^2}{(0,05-1,32)^2}$
Azufre disponible (mg/Kg)	96,76	-	Optimo	0,85 - 596	$S = \frac{(e - 596)}{(0,85 - 596)} - \frac{(e - 596)^2}{(0,85 - 596)^2}$
Arcilla (%)	14,53	-	Optimo	1,3 – 33,3	$Ac = \frac{(f - 33,3)}{(1,3 - 33,3)} - \frac{(f - 33,3)^2}{(1,3 - 33,3)^2}$
Arena (%)	58,49	-	Optimo	36,0 – 84,0	$Ar = \frac{(g - 84,0)}{(36,0 - 84,0)} - \frac{(g - 84,0)^2}{(36,0 - 84,0)^2}$

a = valor de conductividad eléctrica medida en mS/cm; **b** = valor de carbono orgánico medido en %; **c** = valor de nitrógeno total medido en %; **d** = valor de sodio intercambiable medido en mg/Kg; **e** = valor de azufre disponible medido en mg/Kg; **f** = valor de arcilla media en %; **g** = valor de arena medido en %.

En la VI Región los resultados del análisis factorial mostraron que CIC, Ar, K disponible; y, Ca y Mg intercambiable son los indicadores con el mayor peso final. La Tabla 7 muestra las curvas de puntuación y los parámetros seleccionados para la definición del ICS de la VI Región.

$$ICS_{VI \text{ Región}} = [0,10 * Kd] + [0,11 * Cai] + [0,11 * Mgi] + [0,11 * Ki] + [0,12 * CIC] + [0,09 * Ac] + [0,04 * As] \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde, **ICS** es valor del índice de calidad del suelo de la VI Región; **Kd** es potasio disponible (mg/Kg); **Cai** es el calcio intercambiable (meq/100g); **Mgi** es el magnesio intercambiable (meq/100g); **Ki** es el potasio intercambiable (meq/100g); **CIC** es la capacidad de intercambio catiónico (meq/100g); **Ac** es arcilla (%); y, **As** es arsénico (mg/kg)

Tabla 7. Tipo de curvas de puntuación, parámetros de la ecuación no lineal, rango, y ecuación de las curvas de normalización.

Indicador	No linear/linear		Curva de puntuación	Rango	Ecuación de normalización
	Promedio	Pendiente de la ecuación			
Potasio disponible (mg/Kg)	360,55	-	Optimo	138,0 – 962,0	$Kd = \frac{(a-962,0)}{(138,0-962,0)} - \frac{(a-962,0)^2}{(138,0-962,0)^2}$
Calcio intercambiable (meq/100g)	14,2	-	Optimo	5,4 – 31,7	$Cai = \frac{(b-31,7)}{(5,4-31,7)} - \frac{(b-31,7)^2}{(5,4-31,7)^2}$
Magnesio intercambiable (meq/100g)	3,0	-	Optimo	1,1 – 6,7	$Cai = \frac{(c-6,7)}{(1,1-6,7)} - \frac{(c-6,7)^2}{(1,1-6,7)^2}$
CIC (meq/100g)	4,9	-	Más es mejor	3,6 – 6,6	$CIC = \frac{1}{1 + \left(\frac{e}{4,95}\right)^{-2,5}}$

Indicador	No linear/linear		Curva de puntuación	Rango	Ecuación de normalización
	Promedio	Pendiente de la ecuación			
Arcilla (%)	29,6	-	Optimo	14,1 – 47,3	$Ac = \frac{(f - 47,3)}{(14,1 - 47,3)} - \frac{(f - 47,3)^2}{(14,1 - 47,3)^2}$
Arsénico (mg/Kg)	3,5	-	Menos es mejor	2,0 – 5,6	$As = \frac{1}{1 + (g - 3,5)^{2,5}}$

a = valor de potasio disponible medido en mg/Kg; b = valor de Calcio intercambiable medido en meq/100g; c = valor de Magnesio intercambiable medido en meq/100g; d = valor de potasio intercambiable medido en meq/100g; e = valor de capacidad de intercambio catiónico medido en meq/100g; f = valor de arcilla media en %; g = valor de arsénico medido en mg/Kg.

Comparación calidad de los suelos de IV y VI Región de Chile.

En la Tabla 8 muestra el promedio de los ICS de las regiones estudiadas. La IV Región presentó un ICS promedio de 0,15; y, la VI Región, predios con manejo convencional (MC) presentaron un promedio de 0,17 y con manejo orgánico (MaO) 0,15 (Tabla 15). Adicionalmente, al realizar la Prueba T (Tabla 9) de la comparación de medias de las regiones estudiadas el valor de $p=0,2613$ ($p>0,05$).

Tabla 8. ICS promedio presentados por la IV y VI Región

Tipo de sistema	Región	Variable	Media	D.E.	CV	Mín.	Máx.
Convencional	Sexta	Índice	0,17	0,02	14,34	0,14	0,20
Orgánico	Sexta	Índice	0,15	0,02	13,95	0,13	0,19
Convencional	Cuarta	Índice	0,15	0,05	32,31	0,08	0,22

Tabla 9. Prueba T de las muestras de los ICS de la IV y VI Región.

Clasificación	Variable	Grupo 1	Grupo 2	Media(1)	Media(2)	pHomVar	T	p-valor	prueba
Región	Índice	{Cuarta}	{Sexta}	0,15	0,17	0,0812	-1,16	0,2613	Bilateral

Finalmente, se realizó una comparación de los ICS entre los predios con MC y MaO de la VI Región. Los resultados mostraron que no hay diferencias significativas con un nivel del 95 % ($p=0,1256$) de los ICS.

DISCUSIÓN

Estudios realizados por Armenise *et al.* (2013) soil-quality assessment is in growing demand, thus a standard set of procedures to assign a soil quality index (SQI en un ambiente mediterráneo encontró que los indicadores con carga más alta fueron MO, Ac y Ar. Además, Hernández *et al.* (2016) en la V Región, sobre calidad del suelo, encontraron que los indicadores con más alta carga fueron carbono total, N total y MO. Estos resultados se relacionan en cierto grado con los expuestos en la IV Región, se sumarían CE ext, N total, S disponible y Na intercambiable.

Pese a existir en la zona central de Chile suelos neutros a alcalinos; y, deficiencias de B, Cu, Fe, Mn y Zn debido al pH alto de algunos suelos (Casanova *et al.* 2013), los resultados expuestos en este estudio, y los analizados en ambientes mediterráneos, demostrarían que, al realizar estudios sobre CS, indicadores como: MO, NT, Ac y Ar son los que tendrían carga alta para la determinación de los ICS. Adicionalmente, la conductividad eléctrica asociada a Histosoles y Vertisoles (Sadzawka 2006), tendría un aporte significativo en los modelos para determinar calidad del suelo en la IV Región.

La disponibilidad de K, Ca y Mg dependerá de la cantidad de minerales arcillosos, capacidad de intercambio catiónico y de factores climáticos (Casanova *et al.* 2013). Por ejemplo, en la zona norte del mediterráneo uno de los factores que causa la deficiencia de nutrientes de las plantas, principalmente el K, es la fijación en el suelo con alto contenido de arcilla 2:1 (Ruiz y Sadzawka 1986), sin embargo, más al sur del mediterráneo, VI Región, el K disponible presentó una carga más alta, es decir, su aporte será determinante en la medición de la calidad del suelo.

Arsénico es uno de los elementos que se encuentra en altas concentraciones de forma natural en el altiplano chileno (De Gregori *et al.* 2003). En la zona central de Chile, se presentan altos contenidos de As, especialmente en la fundición de Caletones y otros sectores de la VI Región (Ascar, Ahumada, y Richter 2008) específicamente adsorbido (F2). La presencia de este metal en la VI Región, podría ser una de las razones por las que As presentó una alta carga en el modelo que determinará la calidad de suelo en zonas de la sexta región.

Las unidades de producción en las regiones estudiadas son a gran escala, monocultivos, y optimización de la producción sin considerar impactos al medio ambiente, a la perturbación del suelo y a la productividad del mismo a largo plazo (Arriaga, Guzman y Lowery 2017). El desarrollo frutícola provocó un cambio en los patrones de producción y de las prácticas agrícolas (CONAMA 2009) y un crecimiento de la demanda de los agroquímicos (Corral *et al.* 2017). En el periodo 1990-2000 los pesticidas se incrementaron en un 100 %, y entre el 2002 y 2003 la importación de herbicidas aumentó 14 toneladas, del mismo modo, la demanda de fertilizantes importados y nacionales se acrecentaron en un 50 % (López y Anríquez 2003). En este contexto, a pesar del uso de abonos para el restablecimiento de la MO, control biológico de plagas y desmalezamiento manual de malezas, los productores de la IV y VI Región utilizan insumos químicos y fertilizantes sintéticos. Esta similitud de prácticas aplicadas en las dos regiones puede haber contribuido a la igualdad de los ICS.

Adicionalmente, la igualdad de los ICS puede deberse a los altos niveles de erosión que están afectando a las dos regiones. La IV Región tiene un 84 % de su área erosionada, con clases de erosión moderada a muy severa; además, tiene un 92 % de su superficie regional con un nivel evidente de desertificación; y, de ese porcentaje un 42 % con erosión severa y muy severa (Morales *et al.* 2016). Por su parte, la VI Región presenta problemas de erosión en un 52 % de su superficie (Flores, López y Rojas 2012).

CONCLUSIONES

El ICS en la zona central de Chile está entre 0,15 y 0,17, es decir bajo. Estos índices se relacionan con las prácticas agrícolas convencionales y los altos niveles de erosión del suelo que presenta la zona central. Además, estos índices no presentaron diferencias significativas ($p=0,1256$).

Los indicadores que presentaron mayor carga en la IV Región son: CO (0,86) y NT (0,80) relacionados a fertilidad del suelo y mayor ponderación significativa; y, S disponible (0,88), Na intercambiable (0,78), Ac (0,99) y Ar (-0,76). Estos indicadores tienen implicancia directa en el modelo que determina calidad del suelo en la IV Región. En la región VI, Ca intercambiable (0,87); Mg intercambiable (0,83); K disponible (0,97), Ac (0,70); CIC (0,87) y As (0,98) mostraron la más alta carga. Estos indicadores, a través del modelo, determinarán la calidad de suelo en la VI Región.

Los modelos encontrados para evaluar la calidad del suelo de la IV y VI Región, podrían ser utilizados para evaluaciones en la zona central de Chile. Además, pueden ser tomados como herramientas para determinar qué prácticas de manejo son las más adecuadas para mantener un suelo saludable.

A través del análisis factorial se pueden determinar índices de calidad del suelo, debido a su capacidad para modelar un gran número de variables, y cuales son menos o más importantes. Se debe considerar, previo a los análisis, la revisión de la información obtenida, para evaluar que metodología se puede utilizar, por ejemplo, análisis de componentes principales.

Agradecimientos

Al director y técnicos de campo del proyecto “Integración de la Biodiversidad a la Producción Frutícola Regional de O’Higgins” por la obtención de los datos de campo de cada una de los predios y regiones estudiadas.

Contribuciones de autores

Carlos Guillermo Chunchu M. analizó, realizó los análisis estadísticos y escribió el documento. Eduardo Arellano apoyó en la revisión de la versión final del manuscrito.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrews, S., D. Karlen, and C. Cambardella. 2004. “The Soil Management Assessment Framework : A Quantitative Soil Quality Evaluation Method.” *Sci. Soc. Am. J.* 68: 1945–62.
- Andrews, S, DL Karlen, and JP Mitchell. 2002. “A Comparison of Soil Quality Indexing Methods for Vegetable Production Systems in Northern California.” *Agric. Ecosyst. Environ.* 90 (1): 25–45. doi:Pii S0167-8809(01)00174-8\rdoi 10.1016/S0167-8809(01)00174-8.
- Andrews, Susan S, and C Ronald Carroll. 2001. “Designing a Soil Quality Assessment Tool for Sustainable Agroecosystem Management.” *Ecological Applications* 11 (6): 1573–85. doi:10.1890/1051-0761(2001)011[1573:DASQAT]2.0.CO;2.
- Armenise, E., M. A. Redmile-Gordon, A. M. Stellacci, A. Ciccacese, and P. Rubino. 2013. “Developing a Soil Quality Index to Compare Soil Fitness for Agricultural Use under Different Managements in the Mediterranean Environment.” *Soil and Tillage Research* 130. Elsevier B.V.: 91–98. doi:10.1016/j.still.2013.02.013.

- Arriaga, F, J Guzman, and B Lowery. 2017. "Conventional Agricultural Production Systems and Soil Functions." In *Soil Health and Intensification of Agroecosystems*, 127–28.
- Ascar, Loreto, Inés Ahumada, and Pablo Richter. 2008. "Effect of Biosolid Incorporation on Arsenic Distribution in Mollisol Soils in Central Chile." *Chemosphere* 70 (7): 1211–17. doi:10.1016/j.chemosphere.2007.08.012.
- Bastida, F, José Moreno, T Hernández, and C García. 2006. "Microbiological Degradation Index of Soils in a Semiarid Climate." *Soil Biology and Biochemistry* 38 (12): 3463–73. doi:10.1016/j.soilbio.2006.06.001.
- Buja, A., and N. Eyuboglu. 1992. "Multivariate Behavioral Remarks on Parallel Analysis Remarks on Parallel Analysis." *Multivariate Behavioral Research* 27: 37–41.
- Casanova, M., O. Salazar, O. Seguel, and W. Luzio. 2013. *The Soils of Chile*. Edited by Prof. Alfred E. Hartemink. Santiago, Chile.
- Ceccarelli, S, S Grando, and M Baum. 2007. "Participatory Plant Breeding in Water-Limited Environments." *Experimental Agriculture* 43 (04): 411–35. doi:10.1017/S0014479707005327.
- Cerny, Barbara A, and Henry F Kaiser. 1977. "A Study Of A Measure Of Sampling Adequacy For Factor- Analytic Correlation Matrices." *Multivariate Behavioral Research* 12. doi:10.1207/s15327906mbr1201.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente. 2008. *Biodiversidad de Chile, Patrimonio y Desafíos*. Mma. Segunda Ed. Santiago. doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2.
- CONAMA. 2009. "Convenio Sobre Diversidad Biológica: Cuarto Informe Nacional de Biodiversidad Chile." Santiago.
- CONICYT. 2008. "El Sector Frutícola En Chile. Capacidades de Investigación y Áreas de Desarrollo Científico-Tecnológico." Santiago.
- Corral, Sebastián A., Valeria de Angel, Natalia Salas, Liliana Zúñiga-Venegas, Pablo A. Gaspar, and Floria Pancetti. 2017. "Cognitive Impairment in Agricultural Workers and Nearby Residents Exposed to Pesticides in the Coquimbo Region of Chile." *Neurotoxicology and Teratology* 62. Elsevier Inc: 13–19. doi:10.1016/j.ntt.2017.05.003.
- De Gregori, Ida, Edward Fuentes, Mariela Rojas, Hugo Pinochet, and Martine Potin-Gautier. 2003. "Monitoring of Copper, Arsenic and Antimony EVELs in Agricultural Soils Imacted and Non-Imacted by Mining Activities, from Three Regions in Chile." *Journal of Environmental Monitoring*.
- Echeverría, Rodrigo, Víctor Moreira, and José Barrena. 2012. "A Characterization of Chilean Farmers Based on Their Market- Production Orientation." *Ciencia e Investigación Agraria* 39 (2): 255–64.
- Flores, J, C López, and J Rojas. 2012. "Estado Actual de Los Suelos de La Región de Coquimbo Uso y Degradación."
- Hernández, Ángela, Eduardo C. Arellano, David Morales-Moraga, and Marcelo D. Miranda. 2016. "Understanding the Effect of Three Decades of Land Use Change on Soil Quality and Biomass Productivity in a Mediterranean Landscape in Chile." *Catena* 140. Elsevier B.V.: 195–204. doi:10.1016/j.catena.2016.01.029.
- Kaiser, Henry F. 1974. "An Index of Factorial Simplicity." *Psychometrika* 39 (1): 31–36.
- Kladivko, E J. 2001. "Tillage Systems and Soil Ecology." *Agricultural Systems* 61: 61–76.
- Kucharik, Christopher J, Kristofor R Brye, John M Norman, A Jonathan, Stith T Gower, Larry G Bundy, Christopher J Kucharik, et al. 2001. "Carbon and Nitrogen Cycling in Agroecosystems of Southern Wisconsin : Potential for SOC Measurements and Modeling of Sequestration during the Next 50 Years." *Ecosystems* 4 (3): 237–58. doi:10.1007/s10021-001-0007-2.

- L. López y G. Anríquez. 2003. "Environmental Externalities of Agriculture: Chile 1980-2000." Roma, Italia.
- Larson, W E, and F J Pierce. 1994. "The Dynamics of Soil Quality as a Measure of Sustainable Management." *Defining Soil Quality for Sustainable Environment* 551 (1): 37-52. doi:10.2136/sssaspecpub35.c1.
- Liu, Zhanjun, Wei Zhou, Jianbo Shen, Shutian Li, Ping He, and Guoqing Liang. 2014. "Soil Quality Assessment of Albic Soils with Different Productivities for Eastern China." *Soil and Tillage Research* 140. Elsevier B.V.: 74-81. doi:10.1016/j.still.2014.02.010.
- Martínez, Eduardo, Juan Pablo Fuentes, Vanessa Pino, Paola Silva, and Edmundo Acevedo. 2013. "Chemical and Biological Properties as Affected by No-Tillage and Conventional Tillage Systems in an Irrigated Haploxeroll of Central Chile." *Soil and Tillage Research* 126: 238-45. doi:10.1016/j.still.2012.07.014.
- Marzaioli, R., R. D'Ascoli, R. A. De Pascale, and F. A. Rutigliano. 2010. "Soil Quality in a Mediterranean Area of Southern Italy as Related to Different Land Use Types." *Applied Soil Ecology* 44 (3): 205-12. doi:10.1016/j.apsoil.2009.12.007.
- Morales, C., J. Acevedo, Z. Aranibar, and G. Dascal. 2016. "Chile: Los Costos de La Inacción Ante La Desertificación y Degradación de Las Tierras." Santiago, Chile.
- Muñoz, C., E. Zagal, and C. Ovalle. 2007. "Influence of Trees on Soil Organic Matter in Mediterranean Agroforestry Systems: An Example from the 'Espinal' of Central Chile." *European Journal of Soil Science* 58 (3): 728-35. doi:10.1111/j.1365-2389.2006.00858.x.
- Raiesi, F, and V Kabiri. 2016. "Identification of Soil Quality Indicators for Assessing the Effect of Different Tillage Practices through a Soil Quality Index in a Semi-Arid Environment." *Ecological Indicators* 71. Elsevier Ltd: 198-207. doi:10.1016/j.ecolind.2016.06.061.
- Ruiz, R, and A Sadzawka. 1986. "Fijación de Potasio En Suelos Del Valle de Aconcagua." *Agricultura Técnica (Chile)* 46: 503-5.
- Shukla, M, R Lal, and M Ebinger. 2006. "Determining Soil Quality Indicators by Factor Analysis." *Soil & Tillage Research* 87: 194-204. doi:10.1016/j.still.2005.03.011.
- Singh, A. K., L. J. Bordoloi, Manoj Kumar, S. Hazarika, and Brajendra Parmar. 2014. "Land Use Impact on Soil Quality in Eastern Himalayan Region of India." *Environmental Monitoring and Assessment* 186 (4): 2013-24. doi:10.1007/s10661-013-3514-7.
- Smith, Jeffrey L., Jonathan J. Halvorson, and Robert I. Papendick. 1993. "Using Multiple-Variable Indicator Kriging for Evaluating Soil Quality." *Soil Science Society of America Journal* 57 (3): 743. doi:10.2136/sssaj1993.03615995005700030020x.
- Tabachnick, Barbara G, and Linda S Fidell. 2007. *Using Multivariate Statistics*. Fifth edit. Boston.
- Toro-Mujica, Paula, Claudio Aguilar, Raúl Vera, José Rivas, and Antón García. 2015. "Sheep Production Systems in the Semi-Arid Zone: Changes and Simulated Bio-Economic Performances in a Case Study in Central Chile." *Livestock Science* 180. Elsevier: 209-19. doi:10.1016/j.livsci.2015.07.001.
- Uribe, Hamil, David E Rupp, Jose Arumi-, Ryan D Stewart, and John S Selker. 2014. "Assessment of Current and Potential Yield of Hand-Dug Wells in a Semi-Arid Zone in South-Central Chile Using an Analytical Methodology." *Chilean Journal of Agricultural Research* 74 (June): 219-24. doi:10.4067/S0718-58392014000200014.
- Weissenberger, Jean. 2015. "Organic Production and the European Union." Vol. 989. doi:10.2861/488634.
- Zhang, Chao, Sha Xue, Guo Bin Liu, and Zi Lin Song. 2011. "A Comparison of Soil Qualities of Different Revegetation Types in the Loess Plateau, China." *Plant and Soil* 347 (1): 163-78. doi:10.1007/s11104-011-0836-5.