

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**MANEJO DE RASTROJOS COMO ALTERNATIVA PRODUCTIVA
SUSTENTABLE Y SUS IMPACTOS EN LA CALIDAD QUÍMICA DE UN
ANDISOL: ESTUDIO DE CASO**

POR

EDUARDO ANDRÉS FERNÁNDEZ VELÁSQUEZ

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CHILLÁN – CHILE
2024**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**MANEJO DE RASTROJOS COMO ALTERNATIVA PRODUCTIVA
SUSTENTABLE Y SUS IMPACTOS EN LA CALIDAD QUÍMICA DE UN
ANDISOL: ESTUDIO DE CASO**

POR

EDUARDO ANDRÉS FERNÁNDEZ VELÁSQUEZ

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CHILLÁN – CHILE
2024**

Aprobada por:

Profesor Asociado, Marco Sandoval E.
Ing. Agrónomo, Mg. Sc., Dr. Cs.

Guía

Profesor Asistente, Christian Guajardo F.
Ing. Agrónomo, Dr. Cs.

Asesor

Profesor Asociado, Juan Ortíz C.
Ing. Agrónomo, Dr., Cs.

Asesor

Profesor Asociado, Guillermo Wells M.
Ing. Agrónomo, Mg. Cs.

Decano

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Resumen	1
Summary.....	1
Introducción	2
Materiales y Métodos.....	5
Resultados y Discusión.....	10
Conclusiones.....	15
Referencias.....	15

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

		Página
Tabla 1	Características del manejo de las situaciones estudiadas..	6
Tabla 2	Descripción de los manejos productivos evaluados.....	7
Tabla 3	Índice calidad química de suelo, niveles de referencia y su interpretación.....	8
Tabla 4	Clasificación del índice de calidad química del suelo total (ICQSt).....	10
Tabla 5	Resultados de la evaluación química de un Andisol, tratamiento paja parada vs tratamiento paja incorporada de rastrojos.....	12
Tabla 6	Valores del ICQS para cada parámetro, manejo productivo y profundidad.....	14

MANEJO DE RASTROJOS COMO ALTERNATIVA PRODUCTIVA SUSTENTABLE Y SUS IMPACTOS EN LA CALIDAD QUÍMICA DE UN ANDISOL: ESTUDIO DE CASO

STUBBER MANAGEMENT AS A SUSTAINABLE PRODUCTIVE ALTERNATIVE AND ITS IMPACTS ON THE CHEMICAL QUALITY OF AN ANDISOL: CASE STUDY

Palabras clave adicionales: agricultura de conservación, índice de calidad química del suelo, paja de trigo.

RESUMEN

La quema de los rastrojos es una práctica cuestionada debido a que existe evidencia de que contribuyen a la contaminación atmosférica y degradación del suelo, que al quedar desprotegido sufre la acción erosiva de las lluvias, disminuyendo la materia orgánica del suelo o MOS, por lo que es imprescindible buscar alternativas de manejo. En el presente ensayo se evaluaron dos tratamientos de manejo de rastrojo: siembra de avena en presencia de rastrojo de caña de trigo (TPP), y siembra de trigo sobre rastrojo de trigo picado e incorporado en el suelo (TPI) (7 t ha⁻¹ de rastrojo) a las profundidades 0 - 10, 10 - 20 y 20 - 30 cm. Los parámetros químicos evaluados, presentaron respuestas significativas ($P \leq 0,05$) en algunos iones evaluados: el tratamiento TPP mostró mayores valores para los iones fósforo (P^+) en 0 - 20 cm, potasio (K^+) y calcio (Ca^{2+}) incrementaron en 0 - 10, en la cual el amonio (NH_4^+) resultó en mayor concentración para el TPI. Ambos tratamientos presentaron similar índice de calidad de suelo (ICQS): en la profundidad 0 - 10 fue 9 en TPP y 8 en TPI (calidad media), en la profundidad 10 - 20 fue de 2 en TPP y 7 en TPI, mientras que en 20 - 30 fue 1 en TPP y 4 en TPI. Estos resultados indican que el tiempo del manejo rastrojo tanto a la manera TPP o TPI, no es suficiente para alcanzar una calidad buena del suelo, y posiblemente se debe combinar con métodos de fertilización tradicional y/o manejo de una biofertilización de mejor calidad.

SUMMARY

Stubble burning is a questioned practice because there is evidence that it contributes

to air pollution and soil degradation, which when left unprotected suffers the erosive action of rain, decreasing soil organic matter or SOM, so it is essential to find management alternatives. In the present trial, two stubble management treatments were evaluated: sowing of oats in the presence of wheat cane stubble (TPP), and sowing of wheat on chopped wheat stubble incorporated into the soil (TPI) (7 t ha⁻¹ of stubble) at depths of 0 - 10, 10 - 20 and 20 - 30 cm. The chemical parameters evaluated showed significant responses ($P \leq 0.05$) in some ions evaluated: the TPP treatment showed higher values for phosphorus (P⁺) ions in 0 - 20 cm, potassium (K⁺) and calcium (Ca²⁺) increased in 0 - 10, in which ammonium (NH₄⁺) resulted in higher concentration for the TPI. Both treatments presented similar soil quality index (SQI): in depth 0 - 10 it was 9 in TPP and 8 in TPI (medium quality), in depth 10 - 20 it was 2 in TPP and 7 in TPI, while in 20 - 30 it was 1 in TPP and 4 in TPI. These results indicate that the time of stubble management either by TPP or TPI is not enough to achieve good soil quality, and possibly should be combined with traditional fertilization methods and/or better quality biofertilization management.

INTRODUCCIÓN

Los modelos productivos dominantes en la agricultura chilena son en parte responsables de la degradación del recurso suelo (Sandoval *et al.*, 2007). El uso intensivo de los suelos derivados de cenizas ha generado pérdidas por erosión hídrica creciente en estos suelos que se refleja en una menor producción y aumento en la demanda de insumos agrícolas (Sandoval *et al.*, 2007). La quema de los rastrojos es una práctica muy utilizada por los agricultores nacionales para facilitar el establecimiento de los cultivos, pero deja el suelo descubierto al inicio de la temporada de lluvias, facilitando la erosión hídrica de los suelos (Vidal y Troncoso, 2010). Si bien en los últimos años se avanza en la transición hacia estrategias más sostenibles, aún falta investigación y planes de adopción de medidas, de hecho, el manejo de los rastrojos pareciera ser una buena propuesta.

Se denomina rastrojo a todo el residuo que queda en el potrero después de la cosecha de los cultivos, incluido restos de malezas (Ruiz *et al.*, 2015). La producción

de rastrojos se puede obtener estimando la producción de pajas, que se refiere a todos los restos de la estructura de la planta una vez cosechado los granos. La producción de paja está relacionada con la producción de granos; a mayor cantidad de granos, mayor cantidad de pajas (Ruiz *et al.*,2015). En general, los rastrojos constituyen entre un 55 y 75 % de la biomasa aérea total del cultivo. La calidad de los residuos o rastrojos depende del tipo, cantidad, calidad, especie de los residuos que definirá su potencial de manejo. La cantidad de residuos que pueden quedar sobre el suelo después de la cosecha depende del tipo de cultivo, su índice de cosecha y de su rendimiento. Los rastrojos sobre el suelo se descomponen lentamente, a una velocidad que está determinada principalmente por tres factores: humedad del rastrojo, temperatura del rastrojo y su relación carbono / nitrógeno (C/N) (Acevedo y Silva, 2003).

Actualmente y debido al gran volumen de producción de paja de los cultivos de cereales, se utiliza la práctica de quema de los rastrojos, para facilitar el establecimiento del cultivo que sigue en la rotación. Sin embargo, esta práctica que presenta ciertos beneficios es cuestionada debido a que los avances científicos han puesto en evidencia que las quemas de los rastrojos y residuos forestales generan daño, por la contaminación atmosférica y las pérdidas de suelo, que al quedar desprotegido sufre la acción erosiva de las lluvias. Esto a su vez disminuye el contenido de materia orgánica, componente esencial de los suelos para mantener productividad. En consecuencia, las quemas de los rastrojos y residuos forestales son el punto de partida de un importante proceso de empobrecimiento y pérdida del suelo y de la contaminación atmosférica (Ruiz *et al.*, 2015).

Según Castillo y sus colaboradores (2003), los efectos que causa el fuego sobre el suelo van desde el deterioro de las propiedades físicas y químicas, pérdida de nutrientes, destrucción de la microfauna y capa orgánica no incorporada, hasta la erosión severa, lo que implica una degradación generalizada del recurso.

Al realizar la quema de los rastrojos se pierde la mayoría del C producido en el sistema suelo-planta durante el ciclo del cultivo, perdiendo los efectos positivos que

se podrían haber logrado sobre el suelo al incorporar los rastrojos, además contribuyendo negativamente sobre el medio ambiente (Ruiz, 2011). Los nutrientes del suelo que son liberados durante la quema, se concentran rápidamente en la capa de cenizas; y la mayoría de ellos se pierden inicialmente por volatilización durante el incendio, y luego por escurrimiento superficial, lixiviación, o porque la regeneración de la vegetación no es suficientemente rápida para que los nutrientes liberados sean absorbidos (Varela, 2007).

La agricultura sustentable se refiere a la incorporación de ciertos manejos agronómicos basados en la protección física y cobertura del suelo, y/o de la materia orgánica, estos incluyen: mínima o cero labranza del suelo, mantención de los rastrojos de los cultivos sobre el suelo, rotación de cultivos, permanente cobertura del suelo y uso de abonos verdes (Ovalle y Quiroz, 2021), ya que cuando éste no se quema y se deja en el suelo, presenta una serie de beneficios como: i) mejora la infiltración de las lluvias (TECA, 2006), ii) aminora los impactos de las gotas de lluvia sobre el suelo, iii) incrementa la retención de humedad en el suelo, iv) evita la acción directa del sol sobre el suelo, v) retarda la germinación de malezas, vi) disminuye la temperatura superficial durante el verano y la incrementa en invierno, evitando los cambios bruscos día y noche, vii) mejora el ambiente de la micro fauna del suelo, viii) los suelos cubiertos retienen mayor cantidad de humedad y por más tiempo (Riquelme y Saavedra, 2015).

En consecuencia, se requieren medidas para la conservación y mejoramiento del recurso suelo en el largo plazo, y tener en el país sistemas agrícolas sostenibles en el tiempo. En ese sentido, es importante mantener la materia orgánica del suelo, la cual es un factor clave para mejorar la porosidad y por ende la capacidad de infiltración, la retención de humedad, la resistencia a la erosión y fuente básica de la fertilidad (Izaurrealde *et al.*, 2000).

El conocimiento de la calidad química del suelo permite evaluar la relación suelo-planta, la calidad y disponibilidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, los nutrientes para las plantas y microorganismos (USDA, 1996). Los suelos volcánicos en Chile son estratégicos para la agricultura, puesto que representan un 50 - 60 % del total de las 5.400.000 hectáreas de suelos arables que el país

dispone (Peralta, 1977), por lo cual se requieren estudios que integren los parámetros químicos del suelo, mediante aplicaciones de modelos de calidad en suelos adaptados para Andisoles, que poseen propiedades únicas, como las estructuras altamente porosas que acomodan grandes cantidades tanto de agua higroscópica como agua disponible para las plantas, químicamente su composición elemental es rica en aluminio, una gran cantidad de acumulación de humus en los horizontes A, etc. (Masami, 2002). Uno de estos modelos que se puede utilizar para evaluar la calidad química de un suelo es el modelo de calidad desarrollado por Amacher *et al.* (2007) y que considera ciertos parámetros químicos fáciles de medir, tales como el pH, el contenido de macronutrientes, entre otros.

Los resultados del presente estudio pueden ayudar al reemplazo del uso del fuego en los sistemas agrícolas nacionales, el cual requiere de la implementación de normas que regulen las quemas de los residuos y de políticas gubernamentales que apunten a masificar las técnicas conservacionistas de suelo, con la concurrencia de todos los actores públicos y privados relacionados con el tema (Ruiz, 2011).

Dado estos antecedentes, el objetivo de esta investigación fue establecer el impacto en la calidad de un suelo, con majo de rastrojo incorporado y permanencia del tallo residual después de cosecha.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y suelo

El experimento se llevó a cabo en el predio del agricultor Francisco Campos, ubicado en la Comuna de El Carmen, sector de Navidad, Región del Biobío (36°53'51.58" S 72°01'30.46" O). El suelo donde se estableció el experimento pertenece a la serie Santa Bárbara (ashy, mesic, Typic Haploxerand), estos suelos son derivados de cenizas volcánicas modernas. Las principales características de estos suelos los definen como de texturas franco a franco limosa, y la topografía es ondulada, con buen drenaje (Stolpe, 2006).

Manejo agronómico

El experimento consistió en sembrar avena (variedad supernova) el 23 de junio 2017, sobre rastrojo de trigo picado e incorporado al suelo después de la cosecha de la temporada anterior vs siembra de avena (variedad supernova) sobre rastrojo de caña parada de trigo con retiro de cordón de rastrojo entre hileras (Tabla 1), ambos tratamientos se les dejó 7 t ha⁻¹ de rastrojo de trigo. La incorporación del rastrojo se realizó con una rastra modelo Rubín 9 a 10 cm de profundidad del suelo y el correspondiente a caña parada se dejó a una altura aproximada de 10 cm a 15 cm.

La siembra se realizó con una maquina sembrado (Baldan, modelo SPD 3000), con dosis de semilla de avena de 140 kg ha⁻¹, se realizaron manejos de herbicidas (Roundup®, para barbecho químico en una dosis de 3 L ha⁻¹ y Proponit® en una dosis de 0,6 L ha⁻¹) y urea adicional para contribuir a descomponer rastrojo (100 kg ha⁻¹).

Tabla1. Características del manejo de las situaciones estudiadas.

Rotación	Manejo del rastrojo	Superficie (ha)
Trigo - Avena	Caña o paja parada.	1,0
Trigo - Avena	Incorporación de rastrojo picado en los primeros cm del suelo.	1,0

Tratamientos

El ensayo consistió en una siembra de avena variedad Supernova INIA, con dos tratamientos de manejo de rastrojo; uno consistió en siembra de avena en presencia de rastrojo de caña de trigo, denominado tratamiento caña parada (TPP), y el otro consistió en siembra de trigo sobre manejo de rastrojo picado e incorporado en el suelo, denominado tratamiento paja incorporada (TPI).

Diseño experimental

El diseño fue completamente al azar (DCA), con dos tratamientos y tres repeticiones por cada tratamiento, constituidas de 30 submuestras cada repetición. En la Tabla 2 se indican los manejos de los sistemas productivos que se evaluaron en esta investigación.

Tabla 2. Descripción de los manejos productivos evaluados.

Manejo	Descripción del tratamiento	Rotación	Profundidad (cm)
TPP 0 - 10	Paja parada	Trigo - Avena	0 - 10
TPP 10 - 20	Paja parada	Trigo - Avena	10 - 20
TPP 20 - 30	Paja parada	Trigo - Avena	20 - 30
TPI 0 - 10	Paja picada e incorporada	Trigo - Avena	0 - 10
TPI 10 - 20	Paja picada e incorporada	Trigo - Avena	10 - 20
TPI 20 - 30	Paja picada e incorporada	Trigo - Avena	20 - 30

Manejo: Manejo de los sistemas productivos.

Análisis químicos

Los análisis se realizaron teniendo como base la fracción fina del suelo (< 2 mm) las muestras de suelo fueron secadas a temperatura ambiente, hasta masa constante. Se determinó pH, materia orgánica (MO), nitrógeno disponible (N) en forma de NO₃ y NH₄, fósforo (P) en forma de PO₄⁻², iones potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), y sodio (Na), mediante las técnicas analíticas propuestas por Sadzawka *et al.* (2006). Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos de INIA Quilamapu.

Índice de calidad química de suelos

Para evaluar y comparar el estado de la calidad de un suelo sometido a dos condiciones diferente de manejo del rastrojo del cultivo del año anterior i) avena sembrada sobre rastrojo de trigo picado e incorporado al suelo, ii) avena sembrada sobre caña o paja parada de trigo, se utilizó el modelo de calidad de suelos (ec. 1) desarrollado por Amacher *et al.* (2007) adaptado por (Sandoval *et al.*, 2020) para suelos derivados de cenizas volcánicas y otros. En el presente trabajo se evaluaron 8 parámetros (pH, MO, N, PO₄⁻², K⁺, Ca⁺², Mg⁺², Na⁺) con sus respectivos niveles de referencia (NR) e índice de calidad química de suelo (ICQS) y su interpretación asociada (Tabla 3).

$$ICSt = \sum(pH, MO, N, PO_4^{-2}, K^+, Ca^{+2}, Mg^{+2}, Na^+)$$

Tabla 3. Índice calidad química de suelo, niveles de referencia y su interpretación.

Parámetro	NR	Interpretación	ICQS
pH	< 3,0	Severamente ácido - las plantas casi no pueden crecer en este ambiente	-3
	3,01 – 4,0	Fuertemente ácido - sólo las plantas más tolerantes pueden crecer en este rango de pH y sólo si los niveles de MO son bastante mayores para mitigar los altos niveles de Al^{+3} y otros metales.	-2
	4,01 – 5,5	Moderadamente ácido – el crecimiento de las plantas ácido-intolerantes es afectado dependiendo de los niveles de Al^{+3} , Mn^{+3} y otros metales.	-1
	5,51 – 6,8	Ligeramente ácido - óptimo para muchas especies de plantas, especialmente para las especies más tolerantes a la acidez	1
	6,81 – 7,2	Cercano al neutro - óptimo para muchas especies de plantas excepto para aquella que prefieren suelos ácidos	2
	7,21 – 7,5	Ligeramente alcalino - óptimo para muchas especies de plantas excepto para aquellas que prefieren suelos ácidos, posible deficiencia de PO_4^{-2} y algunos metales (por ejemplo, Zn^{+2})	1
	7,51 – 8,5	Moderadamente alcalino - preferido por plantas adaptadas a este rango de pH, posibles deficiencias de PO_4^{-2} y metales	-1
	> 8,5	Fuertemente alcalino - preferido por plantas adaptadas a este rango de pH, posible toxicidad de BO_3^- y otros oxianiones.	-2

NR: nivel de referencia; ICQS: Índice de calidad química del suelo. ** ($N-NO_3 + N-NH_4$). Fuente: Sandoval *et al.* (2020).

Tabla 3. Índice calidad química de suelo, niveles de referencia y su interpretación.

Parámetro	NR	Interpretación	ICQS
MO en suelos volcánicos (%)	> 17	Muy Alta	3
	11 – 16,9	Alto	2
	5,0 – 10,9	Moderado	1
	3,0 – 4,9	Baja	-1
	< 3,0	Muy bajo	-2
N disponible (mg kg ⁻¹)**	> 40	Alto	2
	20 - 40	Medio	1
	10 - 20	Bajo	-1
	< 10	Muy bajo	-2
PO ₄ ⁻² (mg kg ⁻¹)	> 16	Alto	2
	8 - 16	Medio	1
	5 - 8	Bajo	-1
	< 4	Muy Bajo	-2
K ⁺ (cmol kg ⁻¹)	> 0,45	Alto - Excelente reserva	2
	0,31 - 0,45	Moderado - Niveles adecuados para la mayoría de las plantas	1
	0,16 - 0,30	Bajo - Posible deficiencias	0
	< 0,15	Muy bajo	-2
Ca ⁺² (cmol kg ⁻¹)	> 8,0	Alto - Excelente reserva, probablemente suelos calcáreos	2
	4,1 - 8,0	Moderado - Niveles adecuados para la mayoría de las plantas	1
	2,0 - 4,0	Bajo - Posible deficiencias	-1
	< 2,0	Muy Bajo - Severo agotamiento de Ca ⁺² , efectos adversos	-2
Mg ⁺² (cmol kg ⁻¹)	> 0.8	Alto - Excelente reserva	2
	0,46 - 0,80	Moderado - Niveles adecuados para la mayoría de las plantas	1
	0,21 - 0.45	Bajo - Posible deficiencias	-1
	< 0,21	Muy Bajo	-2
Na ⁺ (cmol kg ⁻¹)	> 1,0	Alto	-2
	0,5 - 1,0	Medio	-1
	0,2 – 0,5	Bajo	1
	< 0,2	Muy bajo	2

NR: nivel de referencia; ICQS: Índice de calidad química del suelo. ** (N-NO₃ + N-NH₄). Fuente: Sandoval *et al.* (2020).

Para la interpretación del Índice de Calidad Química de Suelo total (ICSt) se utilizó la Tabla 4, que permite integrar en el modelo los diferentes indicadores químicos seleccionados en un solo valor y establecer la calidad química de cada uno de los tratamientos.

Tabla 4. Clasificación del índice de calidad química del suelo total (ICQSt).

ICGS total	Nivel de calidad	Recomendación
> 16	Adecuada	Mantener manejo sostenible
8 – 16	Media	Identificar los valores críticos e implementar acciones de remediación
< 8	Baja	Identificar los valores críticos y diseñar un plan de manejo sustentable

ICQS: Índice de calidad química del suelo.

Análisis estadístico

Los resultados fueron sometidos a la verificación del supuesto de normalidad con el test de Shapiro-Wilks, la comparación de medias se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) y el test LSD con 95 % de nivel de significancia utilizando el software estadístico SAS (SAS Institute, 1999).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos para los diferentes parámetros evaluados y de acuerdo a las diferentes profundidades se observan diferencias significativas ($P \leq 0,05$) entre algunos de los parámetros evaluados (Tabla 5).

Las evaluaciones realizadas para los primeros 10 cm de suelo, resultaron significativamente ($P \leq 0,05$) favorables en el contenido de amonio para el tratamiento con rastrojo incorporado (TPI) posiblemente ya que el residuo incorporado y picado proporcionó MO a los microorganismos aeróbicos del suelo produciendo la mineralización del N (Robertson y Groffman, 2015), sin embargo, en general los valores de nitrógeno disponible resultaron bajos en ambos tratamientos y para todas las profundidades. La principal desventaja de la incorporación de rastrojos, así como en su uso como cobertura vegetal, es la inmovilización del

nitrógeno, lo cual implica que el nitrógeno inorgánico es fijado en la estructura de los microorganismos del suelo, disminuyendo su disponibilidad para las plantas (Gros y Domínguez, 1992). Este proceso ocurre debido a que los rastrojos de cereales tienen un elevado índice C/N (trigo 60 - 90, arroz 80 - 90, cebada 80 - 90, maíz 50 - 60; Acevedo y Silva, 2003) y al descomponerse el rastrojo, el nitrógeno de éstos será insuficiente para cubrir las necesidades de los microorganismos y de las plantas, generando una disminución temporal del N disponible (Cegarra *et al.*, 1983). Para esta misma profundidad, el P resultó significativamente ($P \leq 0,05$) más elevado en el tratamiento con rastrojo parado con relación al tratamiento (TPI). En relación al P, es posible que la caña de trigo parada, permita un microambiente que favorezca aspectos como temperatura, humedad y un sistema de descomposición radicular diferente a cuando este es mezclado o incorporado junto al rastrojo superficial que puede estar favoreciendo la mayor disponibilidad de P (Sandoval *et al.*, 2008), los valores encontrados se consideran adecuados en los primeros 20 cm de suelo para ambos tratamientos (Vidal, 2007), disminuyen considerablemente a valores entre 5 a 3 cmol kg^{-1} , para la profundidad de 20 a 30 cm en cada tratamiento. Los demás parámetros no marcaron diferencias a esta profundidad de (0 a 10 cm) para los tratamientos estudiados.

El intervalo de (10 a 20 cm) de profundidad mantiene la ventaja significativa ($P \leq 0,05$) para P en favor del tratamiento TPP, pero con una disminución de 39,76 cmol kg^{-1} con relación a la profundidad de (0 a 10 cm), en este segundo intervalo los iones K y Ca, experimentan una disminución importante con respecto a la profundidad más superficial, los valores resultaron significativamente ($P \leq 0,05$) superior en favor del tratamiento TPI, esto explicaría la disminución de la acidez del suelo en el tratamiento TPI, aunque este no resultó estadísticamente significativa los valores de pH van de 5,30 para TPP y 5,90 para TPI.

Por último, en el análisis de la profundidad de 20 a 30 cm, los valores de nitrato favorecen significativamente ($P \leq 0,05$) al tratamiento TPP y amonio a TPI, sin embargo, ambos valores son considerados bajos para el suelo (Vidal, 2007). Adicionalmente, el P se vio favorecido de forma significativa ($P \leq 0,05$) en el TPI con relación al TPP, considerándose estos valores bajos.

Tabla 5. Resultados de la evaluación química de un Andisol, tratamiento paja parada vs tratamiento paja incorporada de rastrojos.

Profundidad 0 - 10									
Trat.	pH (H ₂ O)	MO (%)	NO ₃ (ppm)	NH ₄	P	K	Ca (cmol kg ⁻¹)	Mg	Na
TPP	5,97 a	18,08 a	5,90 a	5,18 b	78,05 a	122,13 a	7,57 a	0,22 a	0,03 a
TPI	6,02 a	15,95 a	8,19 a	5,92 a	32,35 b	163,35 a	6,78 a	0,41 a	0,04 a
DMS	0,57	2,47	3,06	0,24	37,56	73,9	4,7	0,19	0,02
CV	2,73	4,14	14,55	1,27	19,36	14,74	18,68	17,34	20,2
Profundidad 10 - 20									
Trat.	pH (H ₂ O)	MO (%)	NO ₃ (ppm)	NH ₄	P	K	Ca (cmol kg ⁻¹)	Mg	Na
TPP	5,39 a	15,97 a	3,42 a	3,99 a	38,29 a	67,83 b	2,47 b	0,15 a	0,03 a
TPI	5,90 a	15,24 a	2,39 a	4,88 a	22,99 b	92,88 a	4,95 a	0,23 a	0,04 a
DMS	0,95	7,18	1,3	1,37	8,06	15,77	1,94	0,13	0,02
CV	4,79	13,09	12,78	8,79	7,49	5,58	14,91	19,97	20,2
Profundidad 20 - 30									
Trat.	pH (H ₂ O)	MO (%)	NO ₃ (ppm)	NH ₄	P	K	Ca (cmol kg ⁻¹)	Mg	Na
TPP	5,64 a	14,01 a	5,17 a	3,47 b	3,11 b	72,35 a	3,01 a	0,24 a	0,02 b
TPI	5,79 a	11,91 b	1,87 b	4,45 a	5,70 a	82,42 a	4,65 a	0,26 a	0,04 a
DMS	0,78	1,1	1,27	0,71	1,97	39,48	3,16	0,08	0,01
CV	3,89	2,42	10,32	5,11	12,74	14,52	23,53	10,19	12,89

Letras diferentes indican diferencias significativas ($P \leq 0,05$) entre los tratamientos. Trat.: Tratamientos. TPP: Tratamiento con paja parada. TPI: Tratamiento con paja incorporada. DMS: Diferencia mínima significativa. CV: Coeficiente de variación.

Considerando los valores de calidad química obtenidos de cada tratamiento, los resultados coincidieron con las siguientes interpretaciones según indica la Tabla 3. Con relación a la reactividad del suelo, ambos tratamientos mostraron un pH

ligeramente ácido. Los valores de MO fluctuaron entre muy alta en TPP y alta en TPI. El N disponible fluctuó de muy bajo a bajo en ambos tratamientos. El P presentó un rango amplio, que fue desde muy bajo a alto en TPP y de bajo a alto en TPI. El K se encontró en el máximo nivel de clasificación en ambos tratamientos, correspondiente a alto/excelente reserva. En el caso de los cationes Ca, Mg y Na, los valores se encontraron en los niveles más bajos, donde Ca fue bajo-moderado en TPP y moderado en TPI, Mg fue muy bajo-bajo en TPP y bajo en TPI, mientras que Na resultó muy bajo en ambos tratamientos.

En este sentido, tanto el N disponible, como el Ca y Mg, Se encuentran en niveles que requieren de la incorporación de dichos elementos dentro del manejo de este suelo.

El porcentaje de MO alcanzó un nivel muy elevado, mientras que la cantidad de N disponible es notablemente baja. Esto sugiere que la descomposición de la MO en componentes inorgánicos que pueden ser absorbidos por las plantas, como en el caso de (NO_3^- y NH_4^+ , fue limitada en este experimento. Esto puede deberse, entre otros factores, a que el periodo de tiempo desde que se incorporó la caña picada al suelo hasta que se realizó el análisis químico del mismo no fue suficiente para descomponer esta MO incorporada, en componentes disponibles para las plantas.

Para la obtención del ICQS, se utilizaron los valores reportados en los análisis químicos respectivos. Estos se clasificaron de acuerdo con los niveles de referencias indicados en la Tabla 3, finalmente mediante la aplicación de la ecuación de ICQS en cada tratamiento de este experimento de campo (Tabla 6).

Según el ICQS obtenido, no se observó una diferencia entre los tratamientos considerados, ambos tratamientos TPP y TPI presentaron niveles de calidad media en el intervalo de 0 a 10 cm y niveles de baja calidad en los intervalos 10 - 20 y 20 - 30 cm del perfil de suelo. Estos resultados concuerdan en parte con lo observado por Ferrada (2015), quien comparó un sistema de labranza tradicional con quema de rastrojos sin riego y un sistema de labranza tradicional con incorporación de los rastrojos de trigo con riego por pivote, obteniendo en ambos tratamientos un índice medio. Esto sugiere, según la recomendación del modelo, la necesidad de identificar los valores críticos e implementar acciones de remediación para cada uno de ellos.

Tabla 6. Valores del ICQS para cada parámetro, manejo productivo y profundidad.

Manejo productivo	pH	MO	N	P	K	Ca	Mg	Na	ICQSt	Nivel de calidad
TPP 0 - 10	1	3	-1	2	2	1	-1	2	9	Media
TPP 10 - 20	-1	2	-2	2	2	-1	-2	2	2	Baja
TPP 20 - 30	1	2	-2	-2	2	-1	-1	2	1	Baja
TPI 0 - 10	1	2	-1	2	2	1	-1	2	8	Media
TPI 10 - 20	1	2	-2	2	2	1	-1	2	7	Baja
TPI 20 - 30	1	2	-2	-1	2	1	-1	2	4	Baja

TPP 0-10: Tratamiento con paja parada, de 0 a 10 cm de profundidad; TPP 10-20: Tratamiento con paja parada de 10 a 20 cm de profundidad; TPP 20-30: Tratamiento paja parada de 20 a 30 cm de profundidad; TPI 0-10: Tratamiento con paja incorporada 0 a 10 cm de profundidad; TPI 10-20: Tratamiento con paja incorporada 10 a 20 cm de profundidad; TPI 20-30: Tratamiento con paja incorporada 20 a 30 cm de profundidad.

Los bajos valores de ICQS observados en ambos tratamientos sugieren la incorporación de nutrientes de manera más directa (inorgánicos y/o orgánicos de mejor calidad) mientras el aporte orgánico de los rastrojos logra un equilibrio en el tiempo. La MOS se acumula en la superficie del suelo, con lo que aumentan las cantidades de C y N potencialmente mineralizables en esta zona, y se incrementa la actividad microbiana que consume nutrientes, por lo que la disponibilidad de éstos inicialmente puede ser menor que en sistemas de labranza tradicional (Acevedo y Silva, 2003). Por otra parte, la calidad de los residuos de cultivos, relacionada con el contenido de lignina y la relación C/N, determina si los microorganismos inmovilizarán el N mineral o lo liberarán en la solución del suelo, ya que la baja concentración de N en la solución del suelo limita el crecimiento microbiano (Henriksen y Breland, 1999). Para la toma de decisiones en toda clase de manejo de suelo, es necesario no solo evaluar los costos que conlleva el mismo, sino también considerar los costos a futuro que implicaría el no implementar una estrategia de manejo sustentable de suelo.

CONCLUSIONES

- Los parámetros químicos evaluados para los tratamientos TPP y TPI presentaron respuestas significativas ($P \leq 0,05$) en algunos iones evaluados, el tratamiento TPP mostro valores más altos para los iones P en la primera y segunda profundidad, K y Ca también se vieron incrementados en la segunda profundidad, profundidad donde el amonio resultó en mayor concentración para el TPI.
- La aplicación del modelo demostró que ambos tratamientos TPP y TPI presentaron similares calidades de suelos al comparar sus profundidades, resultando la más superficial en calidad moderada y las dos más profundas en calidad de suelo baja.
- Esto resultados indican que el tiempo del manejo rastrojo tanto a la manera TPP o TPI, no es suficiente para alcanzar una calidad buena del suelo, y posiblemente se debe combinar con métodos de fertilización tradicional y/o manejo de una biofertilización de mejor calidad.

REFERENCIAS

1. Acevedo, E. y P. Silva. 2003. Agronomía de la cero labranza. pp: 132. N° 10. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas.
2. Cegarra, J., T. Hernández, T. y F. Costa. 1983. Adición de residuos vegetales a suelos calizos. V. Influencia sobre el desarrollo vegetal. Anales de Edafología y Agrobiología 42(3-4): 545-552.
3. Ferrada, M.J. 2015. Evaluación de la calidad química de un andisol con tres años de incorporación de rastrojo de trigo con riego tecnificado. Memoria de título, Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción. Chillán, Chile.
4. Gros, A. y A. Domínguez. 1992. Abonos guía práctica de la fertilización. 8va. ed. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
5. Henriksen, T.M. and T.A. Breland. 1999. Nitrogen availability effects on carbon mineralization, fungal and bacterial growth, and enzyme activities during decomposition of wheat straw in soil. Soil Biol. Biochem. 31(8): 1121-1134.

6. Masami, N. 2002. Unique properties of volcanic ash soils. *Glob. Environ. Res.* 6.
7. Ovalle, C. y M. Quiroz. 2021. Manual de prácticas agrícolas para una agricultura sustentable. Boletín INIA N° 426. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. La Cruz, Chile.
8. Peralta, M. 1977. Los suelos forestales de Chile. *Charlas y Conferencias* N° 5. pp: 16-30. Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.
9. Robertson, G.P. and P.M. Groffman. 2015. Nitrogen transformations. pp: 421-446. In: E.A. Paul (Ed.). *Soil microbiology, ecology and biochemistry*. (4th. ed.). Academic Press. London, UK.
10. Ruiz, C., M. Wolff y M. Claret. 2015. Rastrojos de cultivos anuales y residuos forestales. pp: 11-30. En: C. Ruiz (Ed.). *Rastrojos de cultivos anuales y residuos forestales, programa de transferencias de prácticas alternativas al uso del fuego en la Región del Biobío*. Boletín INIA N° 308. Ministerio de Agricultura. Chillán, Chile.
11. Sandoval-Estrada, M., N. Stolpe-Lau, E. Zagal-Venegas, M. Mardones-Flores y J. Celis-Hidalgo. 2008. Aporte de carbono orgánico de la labranza cero y su impacto en la estructura de un andisol de la pre cordillera andina chilena. *Agrociencia* 42(2): 139-149.
12. Sandoval, M., C. Pérez, J.M. Recio, J.C. Sánchez, A. Pérez y J. Capulín. 2020. Manual de evaluación y restauración agro-ecológica de suelos de uso agropecuarios afectados por incendios. Universidad de Concepción / ANID. Concepción, Chile.
13. Stolpe, N.B. 2006. Descripciones de los principales suelos de la VIII región de Chile. Publicaciones Universidad de Concepción / Departamento de Suelos y Recursos Naturales. Chillán, Chile.
14. Vidal, I. y H. Troncoso. 2010. Quema y manejo de rastrojos en cultivos de la pre cordillera de la VIII Región de Chile. pp: 237-263. En: A. Usón, J. Boixadera, A. Bosch y A.E. Martín (Eds.). *Tecnología de suelos: estudio de casos*. Ediciones Prensas Universitarias de Zaragoza / Universidad de Lleida. Zaragoza, España.
15. Vidal, I. 2007. Fertirrigación, cultivos y frutales. Universidad de Concepción / Departamento de Suelos y Recursos Naturales. Chillán, Chile.