



Sistematización del proceso de regeneración de la salud del suelo de:

Finca La Esperanza, El Quinche

Periodo 2018-2021



*Central Ecuatoriana de Servicios Agrícolas
Agrónomos y Veterinarios Sin Fronteras
Universidad Andina Simón Bolívar-Ecuador*

Quito, 2022



INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I. SALUD DEL SUELO, PROBLEMA Y/O SOLUCIONES A LA CRISIS ACTUAL 3

- A. Contextualización de la problemática de la salud del suelo 3
 - i. El manejo agrícola del suelo, fuente de salud y de enfermedad de la sociedad 3
 - ii. Problemática de salud del suelo agrícola en el Ecuador y sus causas 4
- B. El SEICAS: un proyecto interinstitucional y transdisciplinario 4
- C. Condiciones ecológicas del predio 5

CAPÍTULO II. SEICAS, UNA AGROECOLOGÍA INNOVADORA 6

- A. Principios agroecológicos que guían al SEICAS 6
- B. Un proceso de regeneración de la salud del suelo de varias velocidades ... 7
 - i. Prácticas iniciales de regeneración del suelo 7
 - ii. Prácticas continuas de regeneración y conservación del suelo 16

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA 21

- A. Recolección de datos y límites metodológicos 21
 - i. Datos anteriores al inicio del proyecto SEICAS 22
 - ii. Datos producidos durante el proyecto SEICAS 22
- B. Definición y ponderación de los conceptos e indicadores de salud del suelo
28
 - i. Salud del suelo 28
 - ii. Fertilidad biológica 29
 - iii. Fertilidad física 31
 - iv. Fertilidad química 32
 - v. Fertilidad multidimensional 33
 - vi. Esfuerzo agronómico 33
 - vii. Esfuerzo económico 34
- C. Metodología de interpretación de los resultados 34

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 38

- A. Estado inicial de salud del suelo del predio (2017) 38



B. Análisis del esfuerzo agronómico y económico de regeneración y conservación del suelo realizado por el SEICAS.....	39
i. Esfuerzo agronómico y económico de los aportes iniciales de MO al suelo	40
ii. Esfuerzo agronómico y económico de los aportes continuos de MO al suelo.....	41
iii. Esfuerzo agronómico y económico total del proceso de aporte de MO al suelo	42
C. Evaluación de los efectos de la intervención del SEICAS sobre la salud del suelo	43
i. Evolución de la fertilidad biológica	44
ii. Evolución de la fertilidad física.....	48
iii. Evolución de la fertilidad Química.....	50
iv. Fertilidad Multidimensional	54
D. Eficiencia agronómica de las prácticas de regeneración del suelo	56
E. Eficiencia económica de las prácticas de regeneración de la salud del suelo	59

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61
--------------------------------------	----

BIBLIOGRAFÍA	63
--------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Frisa cronológica de las prácticas de regeneración del suelo aplicadas por SEICAS. Fuente: elaboración propia.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 2. Frisa cronológica de los pasos para la incorporación de los aportes iniciales de MO en el invernadero. Fuente: elaboración propia.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 3. Frisa cronológica de los pasos para la incorporación de los aportes iniciales de MO en los bloques 1 a 6. Fuente: elaboración propia.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4. Frisa cronológica de los datos recolectados antes, durante y al final del proyecto SEICAS. ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 5. Ilustración del muestreo en zigzag realizado en 2021. Fuente: Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, Costa Rica 2011. ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 6. Ejemplo de cromatograma de un suelo saludable y detalle de las 5 zonas. Fuente: Cromatografía, imágenes de vida y destrucción del suelo, Jairo Restrepo Rivera y Sebastião Pinheiro, 2011. ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 7. Síntesis de las cantidades de MO aportadas al suelo de forma inicial. Fuente: elaboración propia. ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 8. Síntesis del costo del aporte de MO al suelo de forma inicial. Fuente: elaboración propia. ¡Error! Marcador no definido.	



- Figura 9. Síntesis de las cantidades de MO aportadas al suelo de forma continua. Fuente: elaboración propia. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 10. Síntesis de las cantidades de MO aportadas al suelo de manera continua (equivalencia en t/ha/año). Fuente: elaboración propia. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 11. Síntesis del costo del aporte de MO al suelo de forma continua. Fuente: elaboración propia. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 12. Síntesis de las cantidades de MO aportadas al suelo a lo largo de todo el proyecto. Fuente: elaboración propia. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 13. Síntesis del costo total del proceso de aporte de MO al suelo. Fuente: elaboración propia. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 14. Evolución de la tasa MO entre 2017 y 2021. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Ward Laboratories e INIAP..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 15. Cantidad de MO que se ha tenido que aportar para ganar 1% de MO. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de SEICAS, Ward e INIAP..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 16. Diferencia entre la cantidad promedio de ADN (2,91 µg/g) por gramo de suelo en 2020 y las cantidades analizadas en 2021. Fuente: elaboración propia a partir de los datos del estudio de Diana Verdezoto (2020, UCE) y de los resultados de análisis del laboratorio de microbiología de la UCE (2021). **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 17. Nivel de respiración del suelo (en 2021). Fuente: elaboración propia a partir de los datos de Ward Laboratories..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 18. Porcentaje del puntaje máximo posible para la fertilidad biológica 2021. Fuente: elaboración propia. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 19. Calidad de la estructura del suelo (2021). Fuente: elaboración propia a partir de los datos de Ward, INIAP y Agrobiolab. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 20. Porcentaje del puntaje máximo posible para la fertilidad física 2021. Fuente: elaboración propia. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 21. Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE) 2021. Fuente: Elaboración propia a partir de los análisis de Agrobiolab. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 22. Cantidad de carbono orgánico presente en la solución del suelo (WEOC). Fuente: elaboración propia a partir de los análisis de suelo de Ward Laboratories. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 23. Izquierda: Nitrógeno orgánico de la solución del suelo (Ward). Derecha arriba: Cantidad de amonio del suelo (Agrobiolab). Derecha abajo: Cantidad de nitrato del suelo (Ward). Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de análisis de Ward y Agrobiolab. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 24. Porcentaje del puntaje máximo posible para la fertilidad química 2021. Fuente: elaboración propia. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 25. Porcentaje de PMP de la fertilidad multidimensional. Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de WARD, CESA y SEICAS..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 26. Síntesis de los gráficos del % PMP de los diferentes tipos de fertilidad del suelo analizados y del % PMP total. Fuente: elaboración propia a partir de los datos del SEICAS, INIAP, Ward, UCE y Agrobiolab. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 27. Ilustración de la correlación entre el % MO y el % del PMP total de la salud del suelo. Fuente: elaboración propia. **¡Error! Marcador no definido.**



Figura 28. Comparación de los gráficos de MO aportada al suelo con el gráfico del % PMP total. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de SEICAS, Ward, INIAP y Agrobiolab.. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 29. A la izquierda: costos de los aportes de MO iniciales (arriba) y de forma continua (abajo). A la derecha arriba: costo total del proceso de aporte de MO al suelo. A la derecha abajo: costo por hectárea para incrementar de 1% la tasa de MO por año. Fuente: elaboración propia a partir de los datos del SEICAS, INIAP y Ward. **¡Error! Marcador no definido.**

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1. Mosaico de fotos: sucesión de los primeros pasos de preparación del suelo antes de la siembra de avena-vicia: incorporación del barbecho con rastra liviana; subsolador; rastra de tiro. Fuente: elaboración propia. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 2. Mosaico de fotos: sucesión de operaciones para la siembra y cosecha de la avena-vicia: siembra; aplicación de microorganismos a través del riego por aspersión (cañones); cosecha; almacenamiento en el galpón del predio. Fuente: elaboración propia..... **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 3. Mosaico de fotos: sucesión de operaciones para la incorporación de los aportes iniciales de MO en el invernadero (M1) (12/2018). Fuente: elaboración propia. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 4. Mosaico de fotos: formación de 22 camas permanentes con cobertura vegetal e incorporación del abono verde (03-06/2019). Fuente: elaboración propia. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 5. Mosaico de fotos: sucesión de pasos para la incorporación de los aportes iniciales de MO en los bloques 1 y 2 (M2) (11-12/2018) y formación de camas permanentes (02-04/2019). Fuente: elaboración propia. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 6. Mosaico de fotos que ilustran las etapas de incorporación de los aportes de MO en los bloques 3 y 4: ciclos de abono verde y pollinaza (03-06/2019). Fuente: elaboración propia. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 7. Mosaico de fotos que ilustran las etapas de transformación de los bloques 5 y 6 (M4) (08-2019 – 05/2020). Fuente: elaboración propia. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 8. Práctica de cobertura vegetal tipo mulch en diferentes especies de hortalizas. Fuente: elaboración propia. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 9. Mosaico de fotos: a la izquierda: trabajadores aplastando los restos de un cultivo con un tronco; y a la derecha: ocultación de restos de cultivo con plástico negro como forma de preparar el suelo para la siguiente siembra/transplante, sin labranza. Fuente: elaboración propia. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 10. Mosaico de fotos: a la izquierda: proceso de elaboración del bocashi; a la derecha: bocashi terminado. Fuente: elaboración propia. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 11. Mosaico de fotos: a la izquierda: cama donde se ha sembrado con pseudo mulch de tierra negra. Arriba a la derecha: microorganismos sólidos. Abajo a la derecha: biofábrica del SEICAS. Fuente: elaboración propia. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 12. Suelo de la finca La Esperanza a inicios del 2018. Fuente: elaboración propia. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 13. Cromatografía de las 6 muestras de suelo del 2021 realizadas por el laboratorio de CESA. Fuente: elaboración propia a partir de los cromas realizados por CESA. **¡Error! Marcador no definido.**



ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1.	Ubicación de la finca La Esperanza. Fuente: Diana Verdezoto, 2021.	6
Mapa 2.	Zona de horticultura del SEICAS y sus diferentes parcelas. Fuente: elaboración propia a partir de Google Earth Pro.	¡Error! Marcador no definido.
Mapa 3.	Ubicación de los sitios donde se tomaron las 9 muestras de suelo para análisis de la fertilidad en 2017. Fuente: CESA, 2017.	¡Error! Marcador no definido.
Mapa 4.	Ubicación y coordenadas de las micro calicatas para toma de muestras de suelo. Fuente: Estudio línea base de Diana Verdezoto 2021 (a partir de Google, s.f.).	¡Error! Marcador no definido.
Mapa 5.	Muestreo realizado por SEICAS en 2021. Fuente: elaboración propia a partir de Google Earth.	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Síntesis de los diferentes niveles de aporte de MO al suelo en las diferentes parcelas correspondientes a las 6 muestras tomadas en 2021	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 2.	Síntesis de los tipos y cantidades de aportes iniciales de MO realizados en los bloques 3 a 6. Fuente: Elaboración propia.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 3.	Síntesis de las cantidades de paja aportadas en forma de mulch de forma continua al suelo a lo largo del proyecto SEICAS. Fuente: elaboración propia.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 4.	Cantidades de bocashi aportadas de forma continua al suelo por el SEICAS. Fuente: elaboración propia.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 5.	Cantidades de MO proveniente de la tierra negra aportadas al suelo de forma continua por el SEICAS. Fuente: elaboración propia.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 6.	Correspondencia entre la nomenclatura de las parcelas del SEICAS y del muestreo realizado en 2021	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 7.	Niveles de ponderación de los subconceptos por el año 2017 (izquierda) y 2021 (derecha). Fuente: Elaboración propia.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 8.	Indicadores y variables del concepto: Salud del suelo en 2017. Fuente: elaboración propia.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 9.	Indicadores y variables de los conceptos: Esfuerzo agronómico y económico. Fuente: elaboración propia.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 10.	Indicadores y variables del concepto Salud de Suelo en 2021. Fuente: Elaboración propia.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 11.	Puntaje asociado al código de color. Fuente: elaboración propia.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 12.	Método de interpretación por indicadores para elaboración de un código de color para el 2017. Fuente: elaboración propia.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 13.	Métodos de interpretación por indicadores para elaboración de un código de color para el 2021. Fuente: elaboración propia.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 14.	Interpretación de los valores promedios de los 6 indicadores de salud del suelo del 2017. Fuente: elaboración propia.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 15.	Interpretación de los indicadores del concepto de fertilidad biológica en 2021. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de los laboratorios Ward, UCE y CESA.	¡Error! Marcador no definido.



Tabla 16. Interpretación de los indicadores del concepto de fertilidad física en 2021. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de los laboratorios Ward, INIAP y CESA. **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 17. Interpretación de los indicadores del concepto de fertilidad química en 2021. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de los laboratorios Ward, Agrobiolab y CESA. . **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 18. Interpretación de los indicadores del concepto de fertilidad multidimensional (2021). Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de Ward, CESA y SEICAS..... **¡Error! Marcador no definido.**



INTRODUCCIÓN

Numerosos son los agricultores, comunidades, organizaciones y gobiernos que intentan o han intentado cambiar de paradigma productivo hacia una agricultura más respetuosa de la naturaleza y del ser humano. Sin embargo, en este camino hay obstáculos de diversos indoles: agronómicos, culturales, psicológicos, económicos, entre otros. Uno de ellos es el estado de degradación de los suelos y por ello la necesidad de regenerarlos y cambiar nuestra relación a esta entidad que sostiene la vida en el planeta.

El suelo es al origen del mundo tal como lo conocemos hoy en día (M-A. Selosse, 2021), al origen de nuestra alimentación, es un poso de vida, la piedra angular del funcionamiento de los ecosistemas, nuestro patrimonio, es el compañero de trabajo y capital productivo imprescindible del agricultor. Tiene múltiples funciones¹ y cumple varios servicios ecosistémicos² que condicionan la vida y su calidad en el planeta.

Varios son los actores del mundo agrícola y gobiernos que han fallado en el intento o han abandonado antes de empezar un proceso de regeneración de la salud del suelo y/o un cambio de paradigma agrícola. Esto se debe principalmente al nivel de dificultad técnica que aquella empresa implica, al miedo del cambio por los riesgos e incertidumbres que comporta y al costo elevado que puede requerir.

Las dificultades técnicas, la incertidumbre en los resultados y el elevado costo que puede representar un cambio del paradigma en la aproximación al manejo del suelo en la actividad agrícola, son algunos de los frenos para que gobiernos y agricultores avancen en esta tarea. Sin embargo, la crisis agrícola y ecológica mundial que se está atravesando nos lleva a la constatación que el cambio de paradigma agrícola ya no es opcional, sino imprescindible y urgente para regenerar y preservar los equilibrios ecosistémicos de los cuales la salud colectiva depende.

El sistema agrícola dominante actual que podemos nombrar como “modelo convencional” o “modelo de la revolución verde” ha contribuido a aumentar la productividad drásticamente, reducir el número de personas en situación de inseguridad alimentaria y disminuir la pobreza (FAO, 2015). Sin embargo, hoy en día, la ciencia ha demostrado que los impactos de este modelo lo hacen insostenible (Van Beilen, 2016). Entre estos efectos están el favorecer la erosión y desertificación de los suelos, la contaminación del aire y del agua, el calentamiento global (Mylonas & Kopertis, 2020). Además, en la última década, este modelo productivo es cada vez más cuestionado desde la salud pública, que de un lado pone en duda la bioseguridad de alimentos producidos en sistemas productivos con creciente uso de pesticidas y por otro lado llama la atención sobre la salud de los agricultores que se exponen cotidianamente a estos productos. Otra de las fallas que se le atribuye al paradigma dominante de producción agrícola es la destrucción del mayor capital productivo de esta actividad, el suelo.

¿Una vez dicho eso, cuáles son los caminos productivos para regenerar y conservar la salud de los suelos, sin poner en peligro la viabilidad económica de los productores durante la transición (y después)? ¿Cómo hacer para que esta transición sea rápida, exitosa y la más económica posible?

¹ Provisión de hábitat para la biodiversidad; ciclo de los elementos, descomposición, mantenimiento de la estructura del suelo, regulación biológica de las poblaciones, ciclo del agua (filtración, retención, percolación), ciclo de la materia orgánica (secuestro de carbono, formación de humus) (E.K. Bünemann & al., 2018).

² Producción de biomasa (alimentos, medicamentos, materiales de construcción, materia prima para la industria textil etc.), conservación de la biodiversidad, control de la erosión, control de plagas y enfermedades, provisión y calidad del agua, regulación del clima (E.K. Bünemann & al., 2018).



Son muchas las preguntas a las cuales los actores agrícolas que empiezan, o desean empezar, la aventura retadora del cambio de paradigma, tienen que contestar. No existe una receta única como respuesta. Las respuestas difieren en función de las realidades pedoclimáticas, estructurales, socioeconómicas, comerciales, políticas y culturales de los territorios y UPAs. Los actores del mundo agrícola carecen de referencias y herramientas técnicas, prácticas y teóricas para arrancar, seguir y/o perfeccionar la transformación de sus agroecosistemas en sistemas que cumplen con la triple exigencia: productividad, calidad y sostenibilidad. Existe también una falta de apoyo de parte de los gobiernos, a través de políticas públicas y financiamientos, para la transición hacia sistemas agrícolas respetuosos de la vida.

Con el afán de aportar respuestas técnicas y científicas cada vez más adaptadas y eficientes frente a esta problemática, la Central Ecuatoriana de Servicios Agrícolas (CESA), junto a sus aliadas históricas: la ONG francesa Agrónomos y Veterinarios sin Fronteras (AVSF) y la UASB (Programa Andina Ecosaludable) han implementado el Sistema de Experimentación, Investigación y Capacitación en Agroecología y Salud (SEICAS³). Proyecto interinstitucional que en una primera etapa de 3 años (2018-2021), concentró sus actividades en la finca La Esperanza (18 ha), propiedad de la Universidad Andina Simón Bolívar-sede Ecuador (UASB), ubicada en los Andes ecuatorianos, a una hora al noreste de Quito.

El presente documento, realizado por CESA y financiado por AVSF a través de la Agencia Francesa de Desarrollo⁴ (AFD), aporta elementos de respuesta prácticos y teóricos, referencias y herramientas, en cuanto al proceso de regeneración de la salud del suelo y en cuanto a la transición hacia una agricultura de conservación del suelo y agroecológica. Eso a través de la sistematización de la experiencia de 3 años del SEICAS en la Finca La Esperanza de El Quinche, Pichincha, Ecuador.

Este trabajo de sistematización técnico-científica detalla y analiza los principios, prácticas y técnicas implementadas para realizar dicha transformación, desde su arranque, en julio del 2018, hasta julio del 2021, tanto en sus primeros pasos como en el manejo continuo de regeneración y conservación de la salud del suelo. Además, este estudio evalúa aquel proceso de regeneración de la salud suelo implementado en la finca La Esperanza y sus distintas modalidades. Eso a través de varios indicadores de salud del suelo construidos a través de los resultados de análisis de suelo realizados antes y al final de la intervención del SEICAS y de los datos de campo sistematizados a lo largo del proyecto. Se pone en perspectiva aquellos indicadores para evaluar el estado inicial y final de salud del suelo y evaluar las dinámicas de regeneración implementada y sus efectos sobre la salud del suelo.

La selección e interpretación de dichos indicadores ha sido realizada con la meta de contestar a la siguiente pregunta directriz:

¿Cuáles son los itinerarios técnicos y prácticas, implementados por el SEICAS, que demuestran la mayor eficiencia agronómica y económica de regeneración de la salud del suelo?

Se plantea esta pregunta con el objetivo principal de aportar referencias y herramientas técnico-científicas a actores del mundo agrícola, en particular para la agricultura familiar campesina, apuntando al mejoramiento de sus condiciones de vida a través de la aplicación y evaluación de prácticas que favorecen la regeneración y conservación de la salud de los suelos agrícolas.

³ Vale precisar que el SEICAS es un sistema que tiene varios sitios operativos, el sitio de La Esperanza es uno de ellos, se cerró en 2021 por razones coyunturales pero su misión sigue a través de los sitios de Daule, Guayas y de Cotogchoa, Pichincha.

⁴ Convenio de Cooperación Plurianual (CCP).



El primer capítulo trata la problemática de salud del suelo a nivel mundial y ecuatoriano. En un segundo tiempo, se detallará cómo nació el SEICAS y la historia de la finca La Esperanza. En el segundo capítulo se desarrollarán los principios agroecológicos y prácticas de regeneración del suelo aplicadas en SEICAS. En el tercer capítulo se detallará la metodología utilizada para contestar a la pregunta directriz. En el cuarto capítulo, se expondrán los resultados y discusiones respectivas. Finalmente, el documento se concluye retomando los principales hallazgos y plantea recomendaciones.

CAPÍTULO I. SALUD DEL SUELO, PROBLEMA Y/O SOLUCIONES A LA CRISIS ACTUAL

A. Contextualización de la problemática de la salud del suelo

i. El manejo agrícola del suelo, fuente de salud y de enfermedad de la sociedad

La contaminación y escasez de agua, el calentamiento global, la degradación de la salud colectiva, la pérdida de biodiversidad y la propagación de enfermedades devastadoras contienen un mensaje claro que nos lleva a cuestionar la relación de la humanidad con la naturaleza. En este sentido, la actividad agrícola se encuentra en una posición clave. La agricultura provee alimentación, fibras, energía (y más) a la humanidad. Dependiendo de la forma de hacer agricultura se puede tener un impacto dañino o no sobre la salud de los agroecosistemas y ecosistemas en general. Grupos de expertos científicos (IPCC, 2021) han demostrado que la industrialización de los sistemas de producción alimentarios ha favorecido la degradación de los ecosistemas, en particular los suelos. Este ecosistema suelo, corazón de la vida del planeta, es uno al que se ha prestado y presta poca atención y uno de los más maltratados.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), **75% de los suelos del mundo están degradados en diferentes grados y esa cifra podría llegar al 90% en 2050**. Un suelo está clasificado como degradado cuando ha perdido una de sus funciones principales: alimentar a las plantas o a los animales o hospedar biodiversidad. La velocidad promedio de formación de suelos es de 0,1 a 0,02mm por año en zonas con clima templado (Ruellan, 2010), es decir que, la formación de 1cm de suelo toma de 100 a 500 años; mientras que, la velocidad de erosión de un suelo manejado con prácticas convencionales, según el geólogo D. Montgomery (2019), es de 1,54 mm/año. Es decir, en seis años y medio de agricultura convencional, se degrada el trabajo de construcción del suelo que la naturaleza ha llevado a cabo durante 100 a 500 años. Eso explica que, durante los 40 últimos años, la erosión y degradación del suelo haya causado el abandono de 430 millones de hectáreas de suelo arable, el equivalente de un tercio de la tierra arable actual; una superficie que equivale aproximadamente a China e India (Pimental & et al., 1995). La FAO reporta que se pierde, a nivel mundial, 75 mil millones de toneladas de suelo arable cada año y que eso genera una pérdida financiera de 400 mil millones de USD por año. Este proceso de erosión y degradación del suelo lleva también a disminuir la capacidad de producción alimentaria de 0,3% cada año, mientras la población mundial alcanzará los 10 mil millones en 2050 y la demanda de alimento crecerá proporcionalmente. Hoy en día son 700 millones de personas sufren del hambre en el mundo según la Organización Mundial de la Salud (OMS). De los recursos no renovables que la humanidad está agotando es el suelo aquel del cual la alimentación mundial depende más directamente; de ahí que, de la pérdida de fertilidad y salud del suelo se desprendan altos costos sociales.

Los efectos de la agricultura convencional han llevado a científicos, productores, técnicos entre otros actores del mundo de la agricultura a desarrollar otras formas de producción. Sistemas de producción agrícola como el de la agroecología o el de la agricultura regenerativa se apoyan en el aprovechamiento de las funciones y servicios ecosistémicos de la naturaleza y por supuesto del suelo. El manejo del suelo



bajo esta aproximación constituye un elemento conservador de los ecosistemas a la vez que aporta soluciones para: mejorar la productividad agrícola, la calidad nutricional de la alimentación, la secuestación de carbono, el reciclaje de elementos, la retención y filtración del agua. El manejo adecuado de los suelos constituye probablemente la palanca más eficiente para contribuir a mejorar la seguridad y soberanía alimentaria de los pueblos y frenar el cambio climático.

ii. Problemática de salud del suelo agrícola en el Ecuador y sus causas

En el Ecuador se estima que el 47 % del territorio presenta problemas de degradación de la tierra (MAG-ORSTOM, 1984; MAG, 1999; López, 2008; Morales et. al., 2010) generando repercusiones importantes, no solo respecto a la sostenibilidad ambiental del territorio, sino también sobre los medios de vida de los sectores más pobres del país, cuya subsistencia depende de la agricultura (FAO, 2018). La principal causa de aquella degradación son las prácticas agrícolas y ganaderas inadecuadas respecto al manejo del suelo. Se estima que en Ecuador se pierde de 30 a 50 toneladas de suelo fértil por hectárea cada año (Suquilanda, 2008). Según la FAO (2011), las principales causas de la degradación de la tierra y de la desertificación derivadas de las prácticas agropecuarias son:

- La deforestación de ecosistemas frágiles para la implantación de nuevos cultivos y/o pastizales.
- La excesiva labranza o mecanización de los suelos para la preparación del suelo en la siembra o para la cosecha de productos.
- La utilización del fuego para la limpieza del terreno y para la generación de rebrotes de pajonales.
- El sobrepastoreo.
- La siembra en zonas de laderas y a favor de la pendiente.
- El uso intensivo de agroquímicos.
- Deforestación de la cobertura vegetal en zonas de recarga hídrica y protección de cauces.
- El inadecuado manejo del riego.

Un factor relevante en el manejo sostenible del suelo según la FAO (2019) constituye la urbanización no planificada, una realidad latente en el Ecuador. El no contar con medidas de ordenamiento y planificación territorial deriva en un crecimiento no solo desordenado de las ciudades, sino que además compromete tierras con alto potencial agrícola. La pérdida de terreno fértil empuja a la agricultura a incrementar las fronteras de producción hacia espacios sensibles a esta actividad desencadenando círculos viciosos de degradación de ecosistemas en particular del suelo. Se afectan los volúmenes disponibles de alimentos y se impactan la rentabilidad y sostenibilidad de la actividad agrícola que afecta en particular a la agricultura familiar campesina cuyos medios de producción son limitados.

Frente a esta constatación, es evidente la necesidad y urgencia de regenerar la calidad y salud de los suelos. El SEICAS fue implementado con el afán de aportar respuestas técnicas y científicas cada vez más adaptadas y eficientes frente a esta problemática.

B. El SEICAS: un proyecto interinstitucional y transdisciplinario

En el año 2018, CESA, AVSF y el Programa Andina Ecosaludable de la UASB-E, con interés en desarrollar y estrechar sus vínculos de cooperación firmaron un convenio interinstitucional para promover el desarrollo del SEICAS.

CESA y AVSF son organizaciones con una extensa trayectoria de trabajo en el ámbito del desarrollo agrario y rural, la gestión territorial, la gestión de los recursos naturales renovables, la gestión del agua y las cuencas hídricas, el fortalecimiento comunitario, la gestión de los sistemas de producción

agropecuarios y su transición agroecológica, la comercialización campesina, la capacitación e investigación agraria.

La Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador, creó el programa de investigación e incidencia Andina EcoSaludable, para el impulso de la provisión-consumo de alimentos bioseguros, la promoción de la cultura agroecológica y de la salud intercultural en el Ecuador, que se realiza en asocio con diferentes organizaciones sociales, gubernamentales y académicas nacionales e internacionales. A través de Andina EcoSaludable, se implementa un modelo colaborativo de investigación, capacitación, cooperación científico-tecnológica para la incidencia en políticas públicas, en torno a la agroecología, el cambio climático y la salud colectiva, con un carácter interdisciplinario e intercultural, para generar efectos pedagógicos transformadores y herramientas para la docencia/formación de aplicación accesible para el país y la región.

El objetivo del SEICAS es generar conocimientos y experiencia en producción y comercialización de alimentos agroecológicos; capacitar y brindar asistencia técnica; producir y comercializar alimentos y bio-insumos. Apoyar la transición territorial hacia una agroecología integral que protege e impulsa la sustentabilidad, soberanía, bioseguridad y solidaridad; de manera tal que integre la riqueza y contribución de la agroecología académica con la agroecología local de base popular; que genere además conocimientos e instrumentos para impulsar o evaluar nuevas transiciones y herramientas alternativas de gestión y difusión en esta línea.

Uno de los principales retos de este proyecto, a nivel agronómico, fue lograr la transformación de una finca, cuyo suelo era altamente erosionado después de décadas de haber sido explotado bajo un modelo de agricultura convencional, a un sistema de producción agroecológico.

A continuación, se resume las condiciones pedoclimáticas del territorio donde está ubicado el predio y la historia productiva del predio la Esperanza.

C. Condiciones ecológicas del predio

La finca La Esperanza se encuentra ubicada en la parroquia El Quinche, en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) en la provincia de Pichincha, aproximadamente a 20 km al noreste de Quito (mapa 1).



Mapa 1. Ubicación de la finca La Esperanza. Fuente: Diana Verdezoto, 2021.

La ubicación geográfica de la finca La Esperanza corresponde a las siguientes coordenadas: Latitud 0° 05'34.7" S; Longitud 78°17'36.1" O. Ubicada a 2623 msnm esta zona tiene una temperatura promedio de 15°C, y la precipitación promedio anual es de 796 mm.

La finca cuenta con una superficie de 18,76 ha, de las cuales, aproximadamente 10 ha son consideradas como aptas para el uso productivo agropecuario, y el resto del área, se encuentra ocupada con matorrales y bosques, por ser terrenos no aptos para la producción agrícola. El suelo de la finca es catalogado de manera general como franco arenoso.

Esta propiedad está ubicada al nororiente de Quito, región históricamente agrícola con características pedoclimáticas (luminosidad, temperatura, tipo de suelo) favorables a esta actividad. Los cultivos dominantes son: maíz, papa, leguminosas (habas, arvejas, frejol), hortalizas. A finales del siglo XX la agroindustria se implantó en el territorio, primero con empresas avícolas y luego con florícolas, y con ella se intensificó el uso de fertilizantes y pesticidas de síntesis.

La exdueña de la propiedad, Wilma Ceballos⁵, cuenta que *su padre empezó a cultivar productos de ciclo corto en los años 50 sin usar productos de síntesis. Se labraba el suelo con yunta y se abonaba con abono animal y residuos de cultivos. Es a mediados de los años 90 que se empezó a utilizar insumos de síntesis como fertilizantes y pesticidas. Desde estas fechas hasta el 2017, el uso de aquellos insumos y de maquinaria agrícola (tractor) se ha intensificado. Aquellas prácticas han afectado la fertilidad y salud del suelo con el tiempo y han provocado su degradación (capítulo IV).*

CAPÍTULO II. SEICAS, UNA AGROECOLOGÍA INNOVADORA

En este capítulo, se detallan los principios y prácticas agroecológicas implementadas por el SEICAS entre el 2018 y el 2021 en la finca La Esperanza con el fin de regenerar la salud del suelo y desarrollar un sistema de producción agroecológico.

A. Principios agroecológicos que guían al SEICAS

La aproximación agroecológica que se ha aplicado en SEICAS, desde la dimensión agronómica, ha sido inspirada por los siguientes expertos: Dominique Soltner, Masanobu Fukuoka, Francis Chaboussou, David Holmgren, Bill Mollison, Lydia y Claude Bourguignon, Konrad Schreiber, Ana Primavesi, Juan José Paniagua, Jairo Restrepo, Francisco Gangotena, la red de productores Maraîchage Sol Vivant (MSV), Gérard Ducerf y Marcel Bouché; entre otros actores y autores de una agricultura que trabaja con, y no en contra de la vida. Es decir, una agricultura consciente de la necesidad de observar y entender los procesos naturales, las interacciones entre suelo, plantas, microorganismos, animales y el medio ambiente; para luego adaptarlas a la realidad y retos del agroecosistema.

Una agricultura donde la base de la fertilidad, productividad, sostenibilidad y equilibrio de un agroecosistema se encuentra en el suelo, mismo que se construye gracias a la colaboración de actores abióticos (clima, roca madre) y bióticos (microorganismos, plantas y animales). Esta aproximación es consciente de que, si se maltrata a uno o más de estos protagonistas de la naturaleza, se provocan desequilibrios sobre el agroecosistema en su conjunto; y sostiene que, entre más interacciones y vida haya, más equilibrado, productivo, resiliente y sostenible se volverá el agroecosistema.

Con estos antecedentes la propuesta SEICAS, CESA se basó en tres principios fundamentales:

- **Labranza mínima o cero labranza:** Luego de la incorporación inicial de materia orgánica (MO) y la formación de camas permanentes para los cultivos (capítulo II. B.), se perturbó lo menos

⁵ Ha vendido la propiedad a la UASB en el 2016.

posible el suelo. No se realizaron prácticas de labranza y el trabajo de construcción de la fertilidad del suelo se delegó a sus habitantes.

- **Suelo siempre cubierto:** para que aquellos habitantes del suelo puedan contribuir en la construcción de la fertilidad de suelo, la condición sine qua non es darles “techo y comida”. Agronómicamente eso quiere decir proveer una cobertura vegetal, viva y/ o muerta, permanente sobre el suelo. Esta cobertura tiene una función de protección (techo), alimentación, entre otras⁶. El daño que ocasiona el trabajo del suelo bajo las técnicas agronómicas convencionales de labranza se intensifica al dejarlo *desnudo*, expuesto a la lluvia, el sol, el aire y el viento que degradando aún más su fertilidad.
- **Favorecer la biodiversidad:** El principio número uno de la resiliencia es la diversidad. Así para conseguir amortiguar las posibles perturbaciones bióticas y abióticas en el agroecosistema del SEICAS se desarrolló un sistema de producción agrícola cultivando una amplia diversidad de especies y variedades (la mayoría siendo semillas campesinas libre y reproductibles). Esta diversidad se construyó a través de favorecer la coexistencia de platas con distintos ciclos productivos (cortos, largos), una rotación de especies planificada, la asociación de especies en espacios y temporalidades comunes y la asociación de sistemas de cultivo y crianza. Producto de esta diversificación se generaron diferentes microclimas en la finca, lo que también contribuye a favorecer la biodiversidad.
- Otra manera de seguir el principio de diversidad en las prácticas agrícolas fue aplicando de forma rotativa preparaciones de bio-control, biofertilizantes y microorganismos locales; y diversificando los tipos de aportes continuos de MO al suelo, que sea bajo forma de cobertura vegetal viva (tipo abono verde) o muerta (tipo mulch de heno).

La combinación de estos principios en el manejo de la producción en SEICAS se constituyen en la base del proceso de regeneración del suelo en el predio la Esperanza.

B. Un proceso de regeneración de la salud del suelo de varias velocidades

La problemática abordada en este documento es particularmente la regeneración de la salud del suelo en la Finca la Esperanza después de décadas de prácticas perturbadoras. En las siguientes líneas se detallan las diferentes prácticas de regeneración de la salud del suelo implementadas en SEICAS – Finca la Esperanza aplicadas entre 2018 y 2021. Prácticas que han sido implementadas en varias etapas cronológicas y con diferentes niveles de intensidad en el tiempo y en el espacio.

i. Prácticas iniciales de regeneración del suelo

Las prácticas iniciales de regeneración del suelo son aquellas que se realizaron antes de empezar los cultivos comerciales. La decisión de aplicar diferentes niveles en la intensidad de regeneración del suelo fue motivada por la voluntad de arrancar, lo antes posible, la producción de alimentos.

La tabla 1 resume las cantidades de MO aportadas al suelo en las diferentes parcelas de las 10 ha:

Nombre de la parcela	Correspondencia con las muestras (M) recolectadas en 2021	Superficie	Cantidades de MO aportadas al suelo en total (t/ha)
Invernadero	M1	1 000 m ²	575
Bloque 1 y 2	M2	1 100 m ²	441
Bloque 3 y 4	M3	1 000 m ²	311
Bloque 5 y 6	M4	1 000 m ²	237
Pasto ⁷	M5 y M6	8,6 ha	16

⁶ Regula la humedad/evaporación, regula la temperatura, limita la germinación de plantas adventicias y por lo tanto disminuye el trabajo de deshierba.

⁷ En el caso de la parcela pasto, los aportes de MO contabilizados son siempre los totales porque el proceso de regeneración ha sido muy distinto al resto de las parcelas en términos de aportes y cultivos.

Tabla 1. Síntesis de los diferentes niveles de aporte de MO al suelo en las diferentes parcelas correspondientes a las 6 muestras tomadas en 2021.

A continuación, se detalla, en primer lugar, las etapas de regeneración de la zona denominada “pasto”.

Zona de Pasto (M5 y M6)

Se ha denominado a esta parcela de 8,6 ha de aquella manera porque fue la proyección y vocación que CESA y el SEICAS se había planteado, en un plazo de 2 a 3 años.

En la siguiente línea de tiempo se va a describir las intervenciones realizadas sobre el suelo:



Figura 1. Línea de tiempo de las prácticas de regeneración del suelo aplicadas por SEICAS en la parcela llamada “pasto”. Fuente: elaboración propia.

Preparación del suelo antes de la siembra de avena-vicia

Se ha iniciado el trabajo de regeneración del suelo incorporando (con 4 pases de rastra liviana; foto1, 2) la vegetación espontanea presente a inicios de octubre 2018. Este primer paso ha permitido incorporar aproximadamente 6t/ha de materia seca⁸ (costo: 1042,72 USD).

Los suelos de la finca La Esperanza se encontraron altamente deteriorados como consecuencia de la aplicación intensiva de agroquímicos y uso inadecuado, en frecuencia y profundidad, de maquinaria agrícola. Eso llevó a compactar y desestructurar el suelo. Esta situación motivó al análisis de la mejor estrategia agronómica para iniciar el proceso de regeneración del suelo. Después de haber consultado a varios agrónomos especialistas del suelo, se tomó la decisión de subsolar las 10 ha cultivables (parcela pasto y las otras) de la propiedad con el fin de mejorar el potencial de penetración en profundidad de las raíces, del agua y del oxígeno, elementos claves de la fertilidad. Por esta razón se contrató un tractor Caterpillar D7 con tres uñas (foto 1, 3). Este subsolador de orugas tiene la capacidad de descompactar el suelo hasta 0,7 - 1m de profundidad con dos “pasadas cruzadas”, luego con dos pases de rastra de tiro se completó la preparación del suelo con el fin de romper los terrones grandes que generó la subsolada (foto 1, abajo en la mitad).

⁸ Se evalúa la cantidad de materia seca en función de la altura y densidad de la vegetación.



Foto 1. Mosaico de fotos: sucesión de los primeros pasos de preparación del suelo antes de la siembra de avena vicia: incorporación del barbecho con rastra liviana (1, 2); subsolador (3, 4); rastra de tiro (5, 6). Fuente: elaboración propia.

Siembra de avena vicia y aplicación de microorganismos

Después de la rastra de tiro, se sembró avena vicia (8,6 ha). Se ha regado esa siembra con cañones y se ha aplicado microorganismos y biofertilizantes en forma líquida a través del riego (foto 2.2). Tres meses después, se cosechó 2 500 pacas (foto 2.3; 2.5; 2.6), 2,6t de materia seca/ha. Una parte de esta materia seca se utilizó para la regeneración y conservación de la calidad del suelo de la “zona hortícola” (esto se detallará más adelante).



Foto 2. Mosaico de fotos: sucesión de operaciones para la siembra y cosecha de la avena-vicia: 1. siembra; 2. aplicación de microorganismos a través del riego por aspersión (cañones); 3. cosecha; 4 y 5. almacenamiento en el galpón del predio. Fuente: elaboración propia.

Después de la cosecha (pacas) se ha dejado retoñar la avena vicia y después de tres meses se incorporó de nuevo esa vegetación, con 4 pases de rastra, aportando al suelo un promedio de 5 t de materia seca/ha.

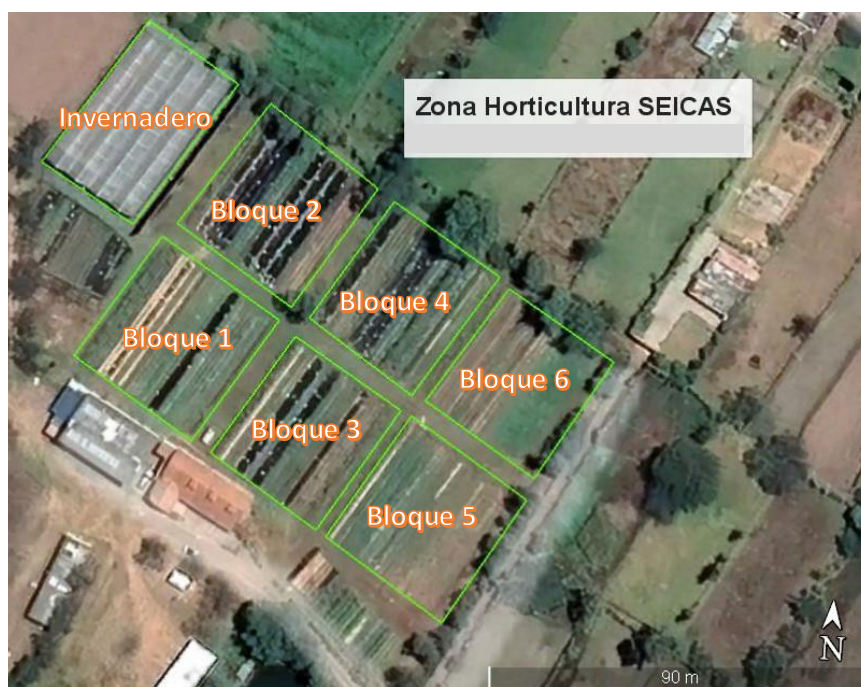
Un segundo ciclo (nueve meses después), de siembra de avena-vicia y aplicación de microorganismos, se realizó entre agosto y noviembre 2019. La producción fue de 3680 pacas (+ 47% de rendimiento en comparación con la anterior siembra).

En agosto del 2020 se incorporó el retoño de esta última siembra y se estima que 5,5 t/ha de materia seca fueron incorporadas con esta operación.

En total, en tres años, son **16 t/ha** o aproximadamente 138 t de materia seca que han sido incorporadas en esta zona de la finca (Zona Pastos M5 y M6). Esto representa los aportes de MO realizados por el SEICAS. En aquella parcela, se confunden los aportes iniciales y continuos. En cambio, a continuación, se va a diferenciar estos dos tipos de aportes porque han sido distintos, en la “zona hortícola”, en términos de ritmo de incorporación, cantidad y a veces naturaleza del aporte.

Zona de Horticultura

Esta parcela de 1 hectárea ha se dividió en 6 bloques separados por cercas vivas de árboles frutales, forestales y arbustos. Cada bloque mide aproximadamente 1000 m² y está conformado de 24 a 28 camas permanentes de 30 m² que acogen cultivos de ciclo corto (la mayoría hortalizas). Además de los 6 bloques, está la zona ocupada por un invernadero (M1) que mide 1100 m², que incluyen 100 m² de vivero (mapa 2).



Mapa 2. Zona de horticultura del SEICAS y sus diferentes parcelas. Fuente: elaboración propia a partir de Google Earth Pro.

Se tomó la decisión de realizar una inversión económica mayor en esta zona a través de la incorporación de varios tipos de materia orgánica (MO) importados del exterior de la finca. En

particular, en el invernadero (M1) y en los bloques 1 y 2 (M2). Estas parcelas fueron las primeras en ser cultivadas mientras que los bloques 3, 4, 5 y 6 fueron sembrados con abono verde. A continuación, se detalla la cronología de los aportes de MO en el invernadero y los bloques 1 a 6.

Con la meta de acelerar drásticamente el proceso de regeneración de la salud del suelo, a través del mejoramiento de la tasa de MO, se importó MO de exterior de la finca para incorporarla en los primeros 20-30 cm de suelo, a esta incorporación se sumó la aplicación de microorganismos locales (capítulo IV).

Invernadero (M1)

La figura 2 resume la sucesión aportes iniciales de MO en el invernadero:



Figura 2. Línea de tiempo de los pasos para la incorporación de los aportes iniciales de MO en el invernadero. Fuente: elaboración propia.

La foto 3, a continuación, ilustra la sucesión de operaciones que se realizó en la parcela del invernadero. Se incorporó el barbecho (foto 3.1; 3.2), se incorporó varios tipos de MO⁹ (foto 3.3; 3.4; 3.5) detallados a continuación y finalmente se armó camas permanentes (foto 3.6).

⁹ Primero se ha regado los distintos tipos de MO a través de un remolque de aproximadamente 6 m³ y de palas.



Foto 3. Mosaico de fotos: sucesión de operaciones para la incorporación de los aportes iniciales de MO en el invernadero (M1) (12/2018). Fuente: elaboración propia.

En la foto 4, se ilustra la implementación de cobertura vegetal de heno (foto 4.1; 4.2; 4.6) y el abono verde que ha sido sembrado (foto 4.3; 4.4) y ocultado (foto 4.5) y finalmente, a su vez, cubierto con heno (foto 4.6).



Foto 4. Mosaico de fotos: formación de 22 camas permanentes con cobertura vegetal e incorporación del abono verde (03-06/2019). Fuente: elaboración propia.

En el invernadero se ha incorporado el equivalente de:

- 5 t/ha de Vegetación de barbecho¹⁰
- 45t/ha de Gallinaza
- 57 t/ha de Cascarilla de arroz
- 344 t/ha de Tierra negra (86 t/ha de MO)¹¹
- 86 t/ha de Pollinaza
- 13 t/ha de Carbón
- 7 t/ha de abono verde

En total se ha incorporado el equivalente de **299 t/ha de MO** en esta parcela (con 10 pases de rastra liviana). Se ha escogido incorporar más MO que en el resto de las parcelas, por la importancia económica que tiene el invernadero y por la exigencia agronómica¹² de los cultivos como tomate riñón y pimiento que son los que se han cultivado principalmente en este espacio.

Bloques del 1 a 6

En la figura 3, aparece la síntesis, en orden cronológico, de las etapas de incorporación de los aportes iniciales de MO en los bloques 1 a 6.

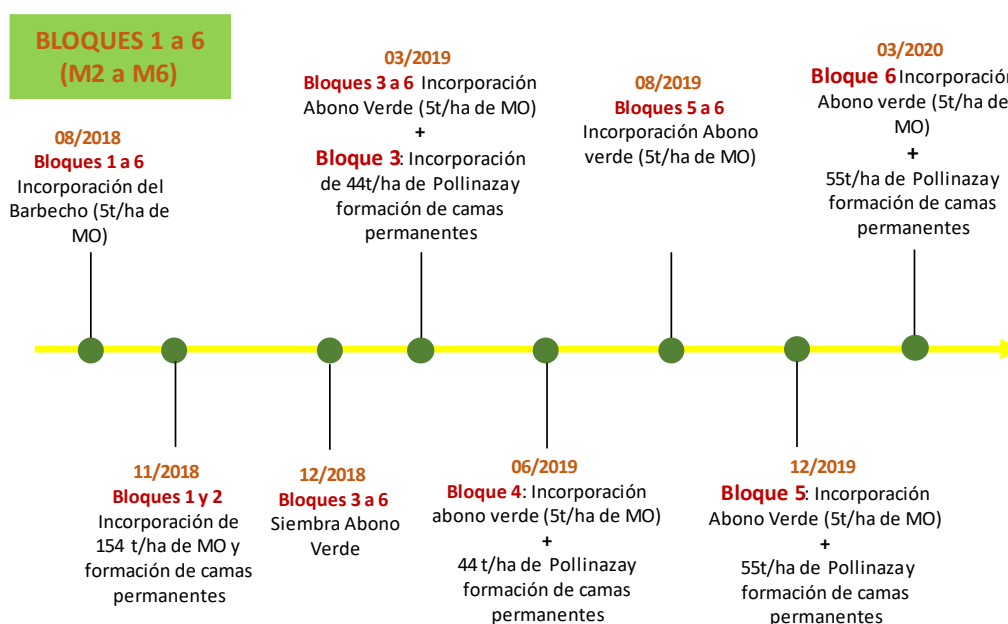


Figura 1. Frisa cronológica de los pasos para la incorporación de los aportes iniciales de MO en los bloques 1 a 6. Fuente: elaboración propia.

Entre bloques han existido diferencia en la cantidad, origen y temporalidad de la MO como se detalla a continuación.

Bloques 1 y 2 (M2)

Son los bloques donde se empezó a la producción. Por ello, son las parcelas donde, después del invernadero, se ha incorporado más cantidad de MO. En noviembre y diciembre del 2018 se ha incorporado las siguientes cantidades de MO, en cada uno de los bloques 1 y 2:

- 5 t/ha de Vegetación de barbecho

¹⁰ Cuando se habla de la cantidad de MO o materia seca incorporada a través de barbecho o abonos verdes, se considera solamente la biomasa aérea.

¹¹ En realidad, contabilizamos solamente un 25% de estas 344t (86t/ha), que corresponden al contenido aproximativo de MO que contiene la tierra negra, según la literatura.

¹² En términos de necesidad de nutrientes y de sensibilidad a plagas y enfermedades.

- 26 t/ha de Gallinaza
- 41 t/ha de Cascarilla de arroz
- 88 t/ha de Tierra negra (22t/ha de MO)
- 56 t/ha de Pollinaza
- 5 t/ha de Carbón

En total se ha incorporado el equivalente de **154 t/ha de MO** en cada uno de los bloques 1 y 2 (con 8 pases de rastra liviana). Después de eso se ha formado 28 camas permanentes por bloque.

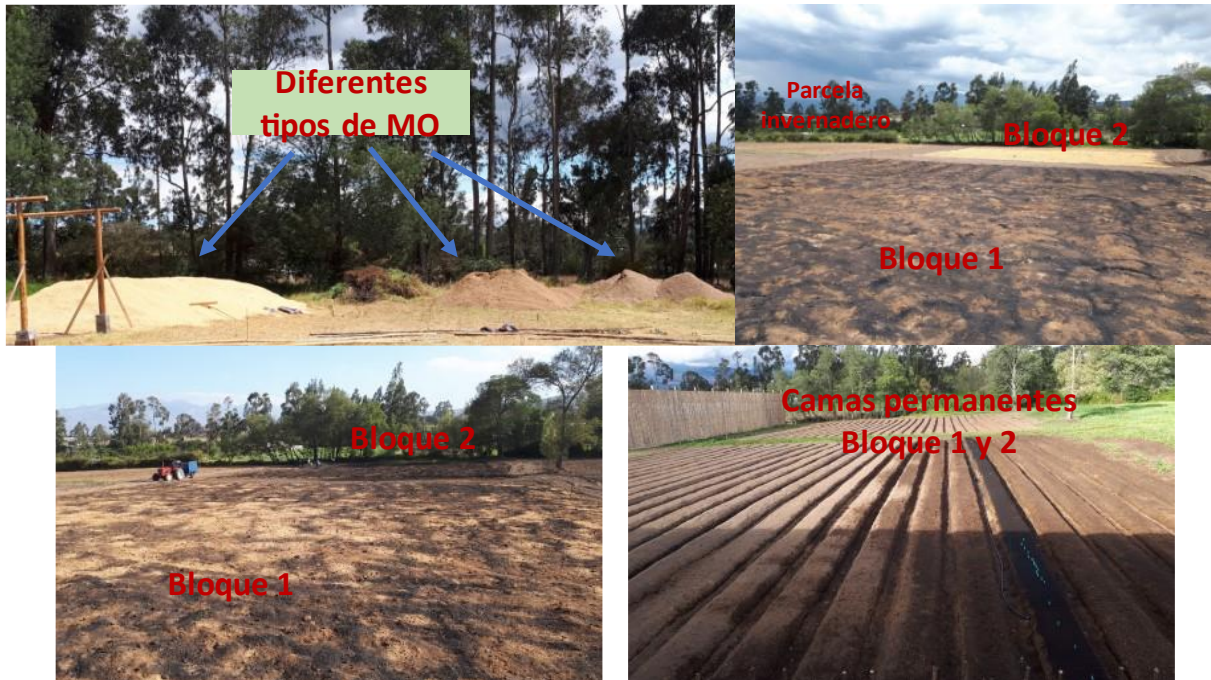


Foto 5. Mosaico de fotos: sucesión de pasos para la incorporación de los aportes iniciales de MO en los bloques 1 y 2 (M2) (11-12/2018) y formación de camas permanentes (02-04/2019). Fuente: elaboración propia.

Bloques 3 a 6 (M3 y M4)

A diferencia del invernadero y de los bloques 1 y 2 (foto 5), en los bloques 3 a 6 se realizaron ciclos de abono verde (foto 6). Para el primer ciclo, a finales de diciembre del 2018, se sembró una mezcla de: avena, vicia, cebada, frejol, haba, habilla y maíz (foto 6.1). Además, se inoculó microorganismos a través del riego por aspersión. Los otros ciclos de abono verde fueron retoños de la vegetación espontánea y restos de las semillas de la primera siembra que quedaron en el suelo.



Foto 6. Mosaico de fotos que ilustran las etapas de incorporación de los aportes de MO en los bloques 3 y 4: ciclos de abono verde y pollinaza (03-06/2019). Fuente: elaboración propia.



Foto 7. Mosaico de fotos que ilustran las etapas de transformación de los bloques 5 y 6 (M4) (08-2019 – 05/2020). Fuente: elaboración propia.

En la tabla 2 se sintetiza los aportes iniciales realizados de MO en los bloques 3 a 6:

Parcela	Tipo y Cantidad de MO incorporada			TOTAL (t/ha)
	Barbecho 2018 (t/ha)	Abono verde (t/ha)	Pollinaza (t/ha)	
Bloque 3	5	5	44	54
Bloque 4	5	10	44	59
Bloque 5	5	15	55	75
Bloque 6	5	20	55	80

Tabla 2. Síntesis de los tipos y cantidades de aportes iniciales de MO realizados en los bloques 3 a 6. Fuente: Elaboración propia.

Las parcelas de los bloques 5 y 6 (75 y 80 t/ha) recibieron más MO que los bloques 3 y 4 (54 y 59 t/ha). Así en la zona de horticultura los aportes de MO iniciales fueron diferenciados, registrándose los mayores aportes en la parcela correspondiente al invernadero, seguida por las parcelas con los bloques 1 y 2, luego las parcelas de los bloques 5 y 6 y finalmente aquella donde se encontraban los bloques 3 y 4 (Anexo 1).

Estas prácticas constituyen los primeros pasos de regeneración de la salud del suelo. Tenían como objetivo principal subir el contenido¹³ de MO de las parcelas intervenidas y reactivar la actividad biológica.

A continuación, se detallan los aportes continuos de MO que acompañan las prácticas agroecológicas de conservación de la salud del suelo aplicadas por el SEICAS.

ii. Prácticas continuas de regeneración y conservación del suelo

Una vez mejorada la tasa de MO a través de los aportes iniciales, el siguiente reto fue seguir mejorando la salud del suelo con prácticas culturales.

Las **camas permanentes** alzadas (20- 25cm de alto, 80 cm de ancho y de 35 m de largo) constituyen un elemento clave en la búsqueda de conservar la salud del suelo. Entre otras ventajas, permiten aprovechar mejor la MO incorporada en los 20 primeros centímetros del suelo y así favorecen el desarrollo de la actividad biológica, la productividad, el drenaje del agua. A estas ventajas para la salud del suelo se le suma una ergonomía de trabajo más amigable con la salud humana que si se trabaja a nivel del piso.

Para aplicar los principios de cero labranza y de tener el suelo siempre cubierto, se implementaron itinerarios técnicos que permitían facilitar su coexistencia con una **cobertura vegetal** tipo **mulch** (10-15cm de espesor), en este caso, de heno¹⁴. Una de las prácticas utilizadas para conciliar la producción y una cobertura permanente de suelo fue la práctica de transplante para el máximo de especies y variedades. En el caso de las semillas o especies que no se pudieron manejar por transplante¹⁵ por ser semillas muy pequeñas (con reservas insuficientes para pasar a través del mulch de heno), se utilizó un pseudo mulch de tierra negra para la siembra. En los casos particulares de la cebolla, el puerro y el hinojo, se les trasplantó en el mulch de heno una vez alcanzado el porte óptimo (20-30cm).

¹³ En el presente trabajo se va a utilizar los términos “tasa”, “porcentaje” y “contenido” de MO de forma indiferenciada. Todos aquellos términos se refieren a la relación entre la cantidad de materia orgánica que contiene la muestra (kg) sobre la cantidad total de suelo de la muestra analizada (kg).

¹⁴ El heno de avena-vicia fue cosechado y almacenado en el mismo predio (foto 2).

¹⁵ Algunas de las especies son: zanahoria, rábano, papa nabo, remolacha, rúcula, cebolla, puerro, hinojo y ciertas hierbas aromáticas



Foto 8. Práctica de cobertura vegetal tipo mulch en diferentes especies de hortalizas. Fuente: elaboración propia. El mulch de heno fue renovado 3 veces al año y cada vez se utilizó 5 pacas de 9kg por cama de aproximadamente 30m². Así, el aporte de esta cobertura vegetal fue de 135 kg por cama por año (45 t/ha/año). Si se multiplica esta cifra por el tiempo que cada bloque ha estado cultivado bajo estas condiciones y por el número de cama por bloque, se obtiene la siguiente tabla:

	Cantidad Total de paja aportada durante el proyecto (t)
INVERNADERO	7,0
BLOQUE 1	8,8
BLOQUE 2	8,2
BLOQUE 3	6,5
BLOQUE 4	6,2
BLOQUE 5	4,3
BLOQUE 6	3,8

Tabla 3. Síntesis de las cantidades de paja aportadas en forma de mulch de forma continua al suelo a lo largo del proyecto SEICAS. Fuente: elaboración propia.

Además de la cobertura vegetal, en forma de mulch, al final del ciclo productivo, los restos de los cultivos cosechados y de la vegetación espontánea sufrieron un proceso de ocultación. Es decir, la ocultación (del sol) de la cama con un plástico negro (foto 9) durante 3 o 4 semanas para que de esta manera la vegetación muera y luego pase a descomponerse en el suelo. Es una forma de preparar el suelo para la siguiente siembra sin penetrar en el suelo y perturbar su estructura y biología. Esta práctica ha permitido aportar MO orgánica al suelo, sin embargo, no se ha medido las cantidades de vegetación espontánea, ni los restos de cultivos aportados por esa vía. Y como aquellas cantidades varían significativamente en función del cultivo ocultado, pues no se puede deducir fácilmente una cantidad promedio. Por lo que no se ha considerado este aporte en los aportes continuos de MO realizados. Aquellas cantidades son similares para todas las parcelas, así que el hecho de no incluirlas en los cálculos de MO aportada no modifica la relación entre las diferentes parcelas.



Foto 9. Mosaico de fotos: a la izquierda: trabajadores aplastando los restos de un cultivo con un tronco; y a la derecha: ocultación de restos de cultivo con plástico negro como forma de preparar el suelo para la siguiente siembra/transplante, sin labranza. Fuente: elaboración propia.

Otra práctica que aportó MO al suelo de forma continua es la aplicación de Bocashi. El bocashi es una mezcla de varios tipos de MO (foto 10). En el caso de SEICAS (los ingredientes eran adaptados a los recursos locales) se componía de: cascarilla de arroz y/o aserrín, pollinaza, gallinaza, tierra negra, carbón, afrechillo de arroz, microorganismos sólidos y líquidos, polvo de roca, ceniza y melaza. Estos ingredientes se mezclan de forma homogénea y se realiza una fermentación aeróbica durante 10 a 15 días. Este es un abono tradicional japonés que tiene la triple función de: alimentar la planta (elementos fácilmente mineralizables), alimentar el suelo (elementos de lenta fermentación) e inocular microorganismos. Se ocupó este abono de las siguientes formas:

- Al transplante (a nivel del hueco que se hacía para la plántula)
- Antes de la ocultación (1 costal de 30-35 Kg por cama)
- Después de una siembra directa (8-10 kg por cama)
- Al momento de la segunda abonada (1 costal de 30-35 Kg por cama)
- Mezclado con el sustrato de siembra del vivero



Mosaico de fotos: a la izquierda: proceso de elaboración del bocashi; a la derecha: bocashi terminado. Fuente: elaboración propia.

En total se aplicó 70 Kg por cama tres veces al año (210 Kg/cama/año). Si se toma en cuenta el tiempo que el bloque ha estado cultivado por SEICAS y el número de camas por bloque, se obtiene las siguientes cantidades:

Parcela	Cantidad Total de bocashi aportada durante el proyecto (t)
INVERNADERO	10,9
BLOQUE 1	13,7
BLOQUE 2	12,7
BLOQUE 3	10,1
BLOQUE 4	9,7
BLOQUE 5	6,7
BLOQUE 6	5,9

Tabla 4. Cantidades de bocashi aportadas de forma continua al suelo por el SEICAS. Fuente: elaboración propia.

Otra fuente de materia orgánica aportada de manera continua fue la tierra negra. Como explicado anteriormente, la tierra negra se ocupa para las siembras directas en suelo (no vía transplante) de semillas pequeñas. Se cierne y se riega la tierra negra para generar un pseudo mulch o una capa de 1-1,5cm. Se forma sillones, se siembra y se tapa el sillón con la misma tierra negra (foto 11, a la izquierda). De esta forma se aplica unos 100 kg por cama una vez y media por año en promedio. Solamente se toma en cuenta el 25% de aquella cantidad de tierra negra por ser el contenido aproximado de MO de la tierra negra¹⁶. El 75% restante es mineral. A partir de este dato se puede calcular las siguientes cantidades de aporte continuo de tierra negra:

	Cantidad Total de Tierra Negra aportada durante el proyecto (t)
INVERNADERO	2,0
BLOQUE 1	2,5
BLOQUE 2	2,3
BLOQUE 3	1,8
BLOQUE 4	1,7
BLOQUE 5	1,2
BLOQUE 6	1,1

¹⁶ En la literatura, no se encuentra un consenso del valor del contenido de MO de la tierra negra porque existe una cierta variabilidad de una zona a otra. Sin embargo, en función de la revisión bibliográfica realizada en este sentido, se ha escogido utilizar el valor de 25% de MO que se destaca como promedio.

Tabla 5. Cantidades de MO proveniente de la tierra negra aportadas al suelo de forma continua por el SEICAS.
Fuente: elaboración propia.



Foto 10. Mosaico de fotos: a la izquierda: cama donde se ha sembrado con pseudo mulch de tierra negra. Arriba a la derecha: microorganismos sólidos. Abajo a la derecha: biofábrica del SEICAS. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, se aplicaron microorganismos y biofertilizantes (foto 11, a la derecha) de forma líquida. Estas aplicaciones se hicieron de forma foliar y en *drench*¹⁷. Pese a la importancia de estas prácticas, en términos de regeneración de la actividad biológica del suelo y de mejoramiento de la salud de las plantas, no se han contabilizado en el presente estudio como aporte de MO, pero se contabilizó el costo de este aporte¹⁸. Estas aplicaciones se elevaron, en promedio, a 3L de producto por bloque de 1 000m² por semana. Es decir 156 L/ha por semana, 1560 L/ha/año.

En el capítulo IV se analizan los resultados sobre cantidades de MO aportadas al suelo tanto de forma inicial como de forma continua; y se les pondrá en relación con los resultados de análisis de suelo de diferentes laboratorios.

Ahora que las prácticas iniciales y continuas de regeneración de la salud del suelo han sido detalladas, se pasa a explicar, en el siguiente capítulo, la metodología utilizada para poner estas en relación con los resultados de análisis de suelo realizados en distintos laboratorios. Se va a describir también cuales son los conceptos e indicadores seleccionados para evaluar la salud del suelo y la eficiencia de las prácticas previamente descritas.

¹⁷ Es decir, un chorro de la preparación, con un cierto nivel de dilución, directamente al suelo, alrededor del pie de la planta.

¹⁸ Los microorganismos y biofertilizantes, siendo aportados de forma líquida, aportan muy poca MO (en peso seco), su función es más de aportar microorganismos que van a mejorar las funciones biológicas, químicas y físicas del suelo. Sin embargo, es una práctica potencialmente potente y eficiente en términos de regeneración del suelo y que genera costos (elaboración, aplicación) que vale contabilizar.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

A. Recolección de datos y límites metodológicos

Es importante explicar que la metodología implementada en este estudio, para contestar a la pregunta directriz, ha sido establecida a posteriori (una vez terminado el proyecto), en 2021. No ha habido un protocolo de investigación planificado, preestablecido para contestar a la pregunta de investigación. Por lo tanto, este trabajo retrospectivo es una sistematización técnico-científica que recopila, analiza e interpreta: datos de campo acumulados a lo largo de tres años de un proyecto de producción agroecológica y los resultados de laboratorio de análisis del suelo que fueron mismos que fueron realizados antes que empiece el proyecto, y después de 3 años de intervención.

A través de la sistematización, análisis e interpretación de dichos datos, se quiere entender, difundir y valorizar el trabajo de regeneración del suelo realizado en el predio la Esperanza, de la forma más rigurosa y científica posible, considerando las limitantes ya expuestas.

Este estudio pretende contestar a la siguiente pregunta directriz:

¿Cuáles son los itinerarios técnicos y prácticas, implementadas por el SEICAS, que demuestran una mayor eficiencia agronómica y económica de regeneración de la salud del suelo?

Para contestar a la pregunta, se ha construido indicadores para evaluar los conceptos de: salud del suelo, esfuerzo agronómico y económico.

A continuación, se va a detallar los datos sobre los cuales se basa este trabajo; cómo, cuándo y por qué se les ha recolectado. En un segundo tiempo se va a detallar los indicadores del estudio (capítulo III. B.).

La figura 4 indica los diferentes momentos en los cuales se ha recolectado los datos del presente estudio:

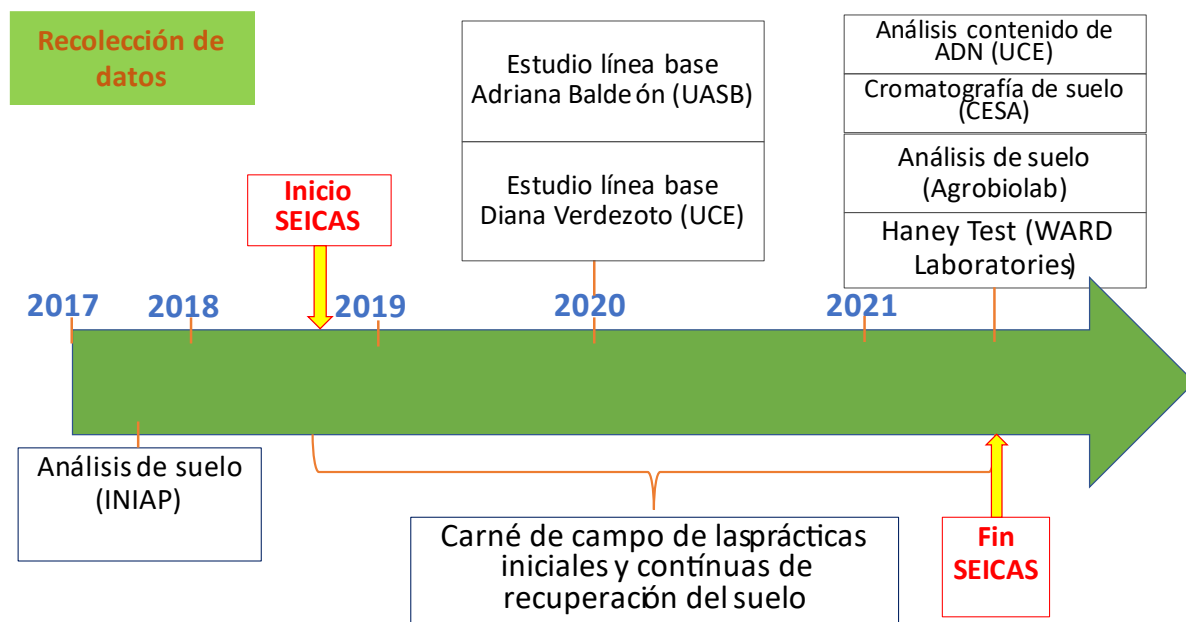


Figura 2. Línea de tiempo de los datos recolectados antes, durante y al final del proyecto SEICAS.

i. Datos anteriores al inicio del proyecto SEICAS

Análisis de suelo del INIAP (2017)

En 2017, antes que empiece el proyecto SEICAS en el predio La Esperanza de El Quinche, CESA ha realizado unos análisis de suelo tradicionales¹⁹ a través del laboratorio de suelos y aguas del Instituto Nacional Autónomo de Investigación Agropecuario (INIAP) (Estación Experimental Santa Catalina), con el objetivo de tener una evaluación básica²⁰ del nivel de salud del suelo. En este caso, los parámetros analizados han sido: pH, macro y microelementos, MO y textura. El muestreo ha sido realizado en 9 lotes diferentes. La ubicación de aquellos fue escogida con la meta de cubrir la mayoría de la superficie del predio y así analizar su potencial heterogeneidad pedológica. Algunas áreas por estar cultivadas quedaron fuera del muestreo en 2017.

A partir de estos datos se calcularon promedios²¹ de los valores de todas las muestras para cada indicador (por ejemplo: el porcentaje promedio de MO ha sido de 2,1%). Y se ha utilizado estos promedios para comparar luego con los resultados del 2021.

A continuación, está el mapa de los sitios de recolección de muestras de suelo.



Mapa 3. Ubicación de los sitios donde se tomaron las 9 muestras de suelo para análisis de la fertilidad en 2017.
Fuente: CESA, 2017

ii. Datos producidos durante el proyecto SEICAS

Aportes iniciales de MO al suelo

Los datos cuantitativos de tipos y cantidades de MO aplicados al suelo, durante el proyecto SEICAS, han sido sistematizados a medida que se desarrollaba el proyecto. Como descrito anteriormente (II. B.), hubo aportes iniciales y aportes continuos de MO y de diferentes tipos. Para optimizar la lectura de los datos y la interpretación de los resultados, se ha sumado las cantidades los diferentes tipos de MO para formar tres indicadores que distinguen los aportes iniciales, continuos y totales²².

¹⁹ Es decir, unos análisis de suelo que analizan, en general, los siguientes elementos: pH, macro y microelementos, materia orgánica (MO), textura, conductividad eléctrica (CE).

²⁰ Es decir, un análisis sobre todo de la dimensión química y parcialmente de la dimensión física (textura) y biológica (materia orgánica) de la fertilidad del suelo.

²² Los aportes iniciales más los aportes continuos de MO.

Los *aportes iniciales* de MO se han calculado: sumando las cantidades de pollinaza, gallinaza, cascarilla de arroz, tierra negra, carbón y abono verde aportados por bloques²³. Luego, se ha ponderado en función de las respectivas superficies y del tiempo en cultivo; para Luego calcular el equivalente en toneladas por hectárea de materia orgánica aportada, con esto tenemos el indicador: **“MO aportada al suelo de forma inicial”** (t/ha). Este cálculo se realizó para cada una de las parcelas en donde se tomaron muestras de suelo (M1 a M6), seis en total, en 2021.

De la misma manera, se ha calculado el indicador: **“costo del proceso de aporte de MO al suelo de forma inicial”** (USD). Se tomó en cuenta: el costo de la MO, el de la mano de obra y el de las horas de maquinaria agrícola utilizadas para la incorporación de la MO (Anexo 1).

Las parcelas evocadas en el capítulo anterior tienen la siguiente correspondencia (Tabla 6) con las muestras realizadas en 2021:

Nombre Parcelas	Muestras tomadas en 2021 para análisis de suelo
Invernadero	M1
Bloques 1 y 2	M2
Bloques 3 y 4	M3
Bloques 5 y 6	M4
Pasto o Zona de producción de pacas	M5 y M6

Tabla 6. Correspondencia entre la nomenclatura de las parcelas del SEICAS y del muestreo realizado en 2021

Aportes continuos de MO al suelo

Los aportes continuos de MO realizados se calcularon sumando: las cantidades de los diferentes aportes en bocashi, paja, tierra negra y biofertilizantes (Anexo 1); para luego ponderarlo en función de la superficie de las parcelas y del tiempo que cada una han estado cultivada. Con esto se generó el indicador **“MO aportada al suelo de forma continua”** expresado en t/ha. El mismo fue calculado para cada una de las parcelas correspondientes a las seis muestras analizadas (M1 a M6) en 2021 (Anexo 1).

De la misma manera, se ha calculado el **“costo del proceso de aporte de MO al suelo de forma continua”** (USD), tomando en cuenta el costo de la mano de obra necesaria para la aplicación de cada tipo de MO (Anexo 1).

Finalmente, sumando los valores de los aportes iniciales y continuos de MO al suelo se obtiene los dos indicadores siguientes: **“MO aportada al suelo en total”** y **“Costo total del proceso de aporte de MO al suelo”**.

Evaluación de rendimientos

A lo largo del proyecto SEICAS se han calculado rendimientos por tipo de producto²⁴, pero no por parcela. Como el resto de los resultados se está interpretando a partir de la especialización de las muestras M1 a M6, correspondientes a diferentes parcelas con diferentes itinerarios de regeneración del suelo, no se pueden utilizar los rendimientos por producto como indicador. Sin embargo, a través de la apreciación y experticia adquirida por el equipo SEICAS que, durante 130 semanas ha cosechado, dos veces por semana, la producción para la comercialización, se calificó el nivel de rendimiento de cada zona (en correspondencia espacial con las muestras de suelo tomadas) a la de producción en base a una escala de puntaje que va del 1 al 5.

Para las parcelas de la zona de pastos en donde se tomaron las muestras M5 y M6, su rendimiento fue evaluado tomando en cuenta los dos ciclos de avena vicia producidos (capítulo II).

²³ El invernadero es considerado como un bloque.

²⁴ Es decir, el peso de producto producido por unidad de superficie y de tiempo (Kg/ha/año).

Estudios de línea base (2020)

En el 2020, una estudiante de ingeniería agronómica de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Central del Ecuador (UCE-FAG), Diana Verdezoto y una investigadora de la UASB, Adriana Baldeón realizaron, cada una un estudio de línea base.

El estudio de Diana Verdezoto se titula “Línea base para el proceso de transformación de la finca La Esperanza, de agricultura convencional a agricultura agroecológica, en la parroquia El Quinche, Pichincha” (Anexo 2). En aquel estudio, se han considerado las dimensiones social, económica y ambiental. Del estudio de Diana Verdezoto se utilizó los siguientes datos:

- Análisis del contenido de ADN como expresión de la biomasa microbiana ($\mu\text{g/g}$)
- Valores de resistencia del suelo a la penetración (MPa) (Anexo 2)

A continuación, se presenta el mapa de las ubicaciones de las muestras recolectadas por D. Verdezoto:



Mapa 4. Ubicación y coordenadas de las micro calicatas para toma de muestras de suelo. Fuente: Estudio línea base de D. Verdezoto, 2021 (a partir de Google, s.f.).

De igual forma que para los análisis del 2017 (INIAP), para poder comparar los datos de contenido de ADN del suelo con los análisis realizados en 2021, se ha calculado el promedio de los valores de las distintas muestras realizadas en 2020 por D. Verdezoto.

El estudio de Adriana Baldeón se intitula “Elaboración de la línea base del SEICAS, finca La Esperanza de El Quinche-Ecuador y análisis reflexivo de las 4 “S” de la vida en el periodo 2017-2020” (Anexo 3). Igualmente, al estudio de Diana Verdezoto, se toma en cuenta las dimensiones social, económica y ambiental. Para el presente estudio sobre la regeneración del suelo de la finca La Esperanza de El Quinche, se ha utilizado los datos de calidad del suelo analizados en el invernadero y en sitios no donde el SEICAS menos ha intervenido en términos de regeneración del suelo. Estos últimos datos se valorizan como referencias, pero no se han establecido variables ni indicadores a partir de ellos.

Vale destacar que ambos estudios han analizado lotes de la finca que habían sido los menos intervenidos en términos de regeneración del suelo, es decir el área denominada “zonas de pastos”. Los estudios de línea base no fueron en estricto rigor de esta naturaleza ya que no se dieron al inicio del proyecto y los datos que aportan en el campo de lo agronómico cuentan ya con una distorsión por las acciones ya implementadas por el proyecto.

Muestreo de fin de proyecto

Durante el segundo semestre del 2021, con el afán de sistematizar y valorizar el trabajo de regeneración del suelo realizado en la finca La Esperanza, se realizaron los análisis de suelo detallados a continuación. Dichos análisis se hicieron a partir de 6 muestras ubicadas en el siguiente mapa:



Mapa 5. Muestreo realizado por SEICAS en 2021. Fuente: elaboración propia a partir de Google Earth.

Los sitios de las muestras se escogieron en función de los diferentes itinerarios de regeneración de la salud del suelo implementados por el SEICAS (capítulo II) en la finca La Esperanza y en función del presupuesto del presente estudio.

Para las muestras M1 a M6, se ha realizado un muestreo en zigzag (figura 5) en las parcelas correspondientes. Por ejemplo, para M2, se ha tomado 10 muestras en el bloque 1, igual en el bloque 2, a una profundidad de 30 cm, con un instrumento de muestreo, se ha mezclado el contenido de las 20 muestras, y a partir de esta mezcla, se ha tomado 600 g para constituir M2. La misma metodología fue aplicada para cada muestra de suelo.

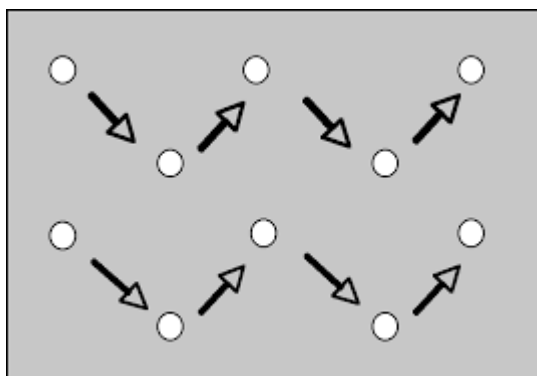


Figura 3. Ilustración del muestreo en zigzag realizado en 2021. Fuente: Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, Costa Rica 2011.



Análisis de suelo Agrobiolab (2021)

Se ha escogido a Agrobiolab para realizar un análisis de suelo tradicional como se lo había hecho en 2017 con la meta de poder hacer un comparativo. A través de los datos producidos por aquel laboratorio se establecieron los siguientes indicadores: pH, macro y microelementos, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), textura, MO.

Análisis de suelo Haney Test, Ward Laboratories (2021)

Se ha escogido a Ward Laboratories para realizar el Haney Test. Este tipo de prueba fue desarrollado por Rick Haney del United States Department of Agriculture- Ag Research Service en Temple, Texas. Se escogió al Haney Test porque esta prueba permite analizar la salud del suelo tomando en cuenta no solamente la dimensión física y química, también pone énfasis a la dimensión biológica de la fertilidad. Analiza, por ejemplo, la actividad biológica que es uno de los pilares de la salud del suelo (Anexo 5 y 6). El Haney test ha producido datos que contribuye con la siguiente información: pH, conductividad eléctrica (sales solubles), MO, respiración del suelo, nitrógeno total soluble en agua, nitrógeno orgánico soluble en agua, carbono orgánico soluble en agua, macro y microelementos, salud del suelo.

Análisis del contenido de ADN del suelo, UCE (2021)

De igual forma que se realizó un análisis de contenido de ADN en 2020, en el marco del estudio de Diana Verdezoto, en el laboratorio de microbiología de la UCE, en sitios poco intervenidos, se escogió realizar esta misma prueba en 2021 para poder comparar los resultados. A la diferencia que en 2021 se ha escogido sitios donde había habido intervenciones de regeneración del suelo en sus diferentes grados (capítulo II. B.), justamente con el objetivo de analizar la influencia de las diferentes prácticas aplicadas sobre los resultados de dicho análisis.

Análisis de suelo por cromatografía²⁵, CESA (2021)

Este análisis es complementario al Haney Test, permite una evaluación cualitativa de la salud del suelo a través de tres dimensiones: la física, la química y la biológica). La cromatografía es un conjunto de métodos que permiten la separación de los componentes de una mezcla (en este caso de la solución del suelo) utilizando dos fases no miscibles, una fase móvil (la solución) y una fase estacionaria (el papel filtro). Esta técnica consiste en solubilizar las sustancias minerales y sustancias presentes en los microorganismos del suelo y hacerles reaccionar aplicándoles sobre un papel filtro impregnado con nitrato de plata; así, migran las sustancias por capilaridad y se revelan una serie de formas, colores y distancias que permiten interpretar el estado de salud del suelo (se puede aplicar esta técnica a alimentos, abonos, fertilizantes etc.) (Anexo 8).

A partir de esta técnica, se ha elaborado los siguientes indicadores²⁶: estructura del suelo, MO, actividad biológica, expresión enzimática, salud del suelo.

²⁵ La técnica de cromatografía sobre papel circular utilizada para analizar el suelo (en este caso), fue inventada por el bioquímico y agrónomo E. Pfeiffer (1899-1961).

²⁶ Aquellos indicadores aparecen con la anotación “cromatografía”.

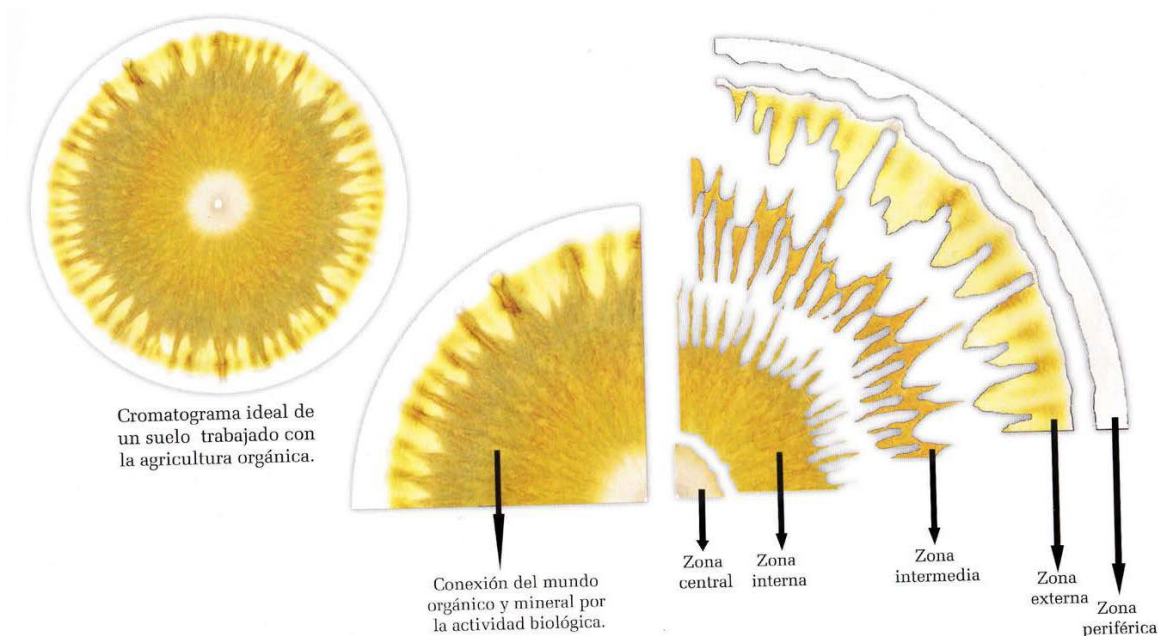


Figura 4. Ejemplo de cromatograma de un suelo saludable y detalle de las 5 zonas. Fuente: Cromatografía, imágenes de vida y destrucción del suelo, Jairo Restrepo Rivera y Sebastião Pinheiro, 2011.

Los cromatogramas se componen de 5 zonas: central; interna; intermedia; externa y periférica (figura 6). Cada una de las 4 primeras zonas tiene, en función del suelo analizado, un cierto color, tamaño, forma y nivel de integración (con la siguiente zona). Son estas características que permiten destacar los indicadores mencionados. Se ha determinado un indicador por zona:

- Zona Central = Calidad de la Estructura (nivel de aireación/compactación del suelo)
- Zona Interna = Fertilidad Bioquímica (cantidad de minerales y su nivel de integración)
- Zona Intermedia = Materia Orgánica (cantidad y nivel de integración)
- Zona Externa = Expresión enzimática (nivel de actividad biológica)

La zona periférica, se excluye ya que representa únicamente el papel filtro. Para cada uno de dichos indicadores se estableció un puntaje de 1 a 5 en función del tamaño, color, integración y forma de cada zona; con la siguiente correspondencia: 1 = malo; 2 = regular; 3 = bueno; 4 = muy bueno; 5 = excelente (Anexo 8). El indicador "salud del suelo cromatografía" es una combinación de los precedentes indicadores. Se establece su valor calculando el promedio de los valores correspondientes a los indicadores anteriormente mencionados.

Límites metodológicos del estudio

Con los resultados de análisis de suelo recolectados, se ha establecido 6 indicadores para evaluar el estado inicial (2017) de la salud del suelo y 18 para el 2021. Dada la poca variabilidad entre los valores de los indicadores de los análisis del 2017 y del 2020 (respectivamente) y el hecho que los sitios de muestreo y número de muestras no correspondían con el muestreo del 2021, se escogió, para los resultados del 2017 y 2020, calcular promedios, por indicador, de los valores de todas las muestras. Para evaluar la evolución de la salud del suelo entre 2017 y 2021 se ha comparado aquellos promedios con los valores de las 6 muestras recolectadas en 2021. Esta aproximación realizada a través del uso de promedios de los valores de los indicadores del 2017 y 2020 constituye una cierta limitación metodológica. Otra limitación es que los estudios de línea base fueron realizados cuando el SEICAS ya



había intervenido a nivel de regeneración del suelo. Sin embargo, como se ha explicado anteriormente, se ha escogido zonas las menos intervenidas durante el proyecto.

De otro lado, en un futuro estudio, sería interesante analizar un número más importante de muestras, tener varias repeticiones por muestra, a intervalos regulares de tiempo (cada 6 meses) y tener más modalidades de prácticas de regeneración para dar más valor estadístico a los resultados y poder evaluar ciertos matices la evolución de la salud del suelo que no se han podido estudiar aquí.

Pese a aquellas limitaciones, este estudio tiene el interés de comparar, cruzar datos de campo de tres años de una actividad productiva agroecológica, con datos de varios laboratorios que utilizan métodos, con aproximaciones distintas y complementarias de análisis de suelo.

En la siguiente parte se definen los conceptos seleccionados, los indicadores utilizados para interpretar los resultados y se explica la metodología con la cual se les ha interpretado.

B. Definición y ponderación de los conceptos e indicadores de salud del suelo

Se definirán los conceptos e indicadores que manejamos, explicando la importancia y el peso de cada uno para la evaluación de la salud del suelo, de la eficiencia agronómica y económica de las prácticas detalladas en el capítulo II.

i. Salud del suelo

Responder a la pregunta directriz del estudio requiere definir el concepto de calidad o salud del suelo. Calidad o salud del suelo, según E. K. Bünemann et al. (2018), que han realizado un estado del arte sobre aquellos conceptos, llegan a la conclusión que estos dos conceptos pueden ser considerados como equivalentes. En el presente trabajo se va a utilizar los términos salud y/o calidad del suelo de forma indiferenciada. En cambio, el concepto de la calidad de la tierra (“land quality”), que se enfoca a evaluar propiedades inherentes del suelo, que no se modifican fácilmente²⁷, y se suelen evaluar a través de un perfil completo de suelo²⁸, la calidad o salud del suelo se enfoca más a evaluar las propiedades dinámicas del suelo, las que pueden ser fuertemente influenciadas por el tipo de manejo y son principalmente monitoreadas en el horizonte de superficie del suelo (0-25cm) [(Karlen et al., 2003) en (E. K. Bünemann et al., 2018)]. Este aspecto del concepto salud del suelo es pertinente con la problemática del estudio donde se está evaluando los efectos de ciertas prácticas agrícolas que apuntan el mejoramiento de la salud del suelo, en un lapso corto de tiempo.

Se considera que el concepto de calidad o salud del suelo trasciende la dimensión de productividad del suelo (Larson and Pierce, 1991; Parr et al., 1992) para incluir explícitamente las interacciones entre los humanos y el suelo, y abarcar la sostenibilidad del ecosistema como base de las ventajas cuyos humanos benefician del suelo, así como los valores intrínsecos del suelo siendo irremplazables y únicos (Carter et al., 1997). El servicio ecosistémico de producción de biomasa del suelo es el que nos interesa más en el contexto agrícola del presente estudio, pero en función del tipo de prácticas agrícolas, el efecto del usuario del suelo puede ser de mejorar o degradar la salud del suelo. Y si se degrada el suelo, tiene repercusiones sobre los otros servicios ecosistémicos que provee, y se perjudica la sostenibilidad no solamente del agroecosistema, pero también del ecosistema, más allá de la UPA, a nivel del territorio. Esta aproximación es coherente con la de la agroecología que entiende y considera esta interconexión, interacción e interdependencia entre el agroecosistema y el territorio en el cual se encuentra.

²⁷ Como la granulometría o textura, por ejemplo.

²⁸ Es decir, a través de una excavación de 1 a 1,5 m de profundidad y 1m de ancho.

De otro lado, la página web del Natural Resources Conservation Service, USA (<http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/>), afirma que “la salud del suelo, también referida como calidad del suelo, es definida como la capacidad continua del suelo de funcionar como un ecosistema vivo que sostiene las plantas, los animales y los humanos”.

La salud del suelo “incluye los atributos ecológicos del suelo con implicaciones más allá de su calidad o capacidad de producir un cierto cultivo. Estos atributos son principalmente los que están asociados con la biota del suelo; su biodiversidad, la estructura de su red alimentaria, su actividad y la gama de funciones que desempeña” [(Pankhurst et al., 1997) en (E. K. Bünemann et al., 2018)]. Entonces el concepto de salud del suelo toma en cuenta la importancia de la dimensión biológica de este; esta dimensión es priorizada en las prácticas de sistemas productivos con una aproximación agroecológica, como el caso del SEICAS.

No existe una sola definición ni un consenso alrededor del concepto de fertilidad del suelo. Sin embargo, es un término que se asocia a la capacidad y función de producción de biomasa del suelo. En agricultura se considera los siguientes tres aspectos como componentes de la salud del suelo: la fertilidad biológica, física y química, mismas que como veremos están interrelacionados y son interdependientes. En el presente trabajo se utiliza el término “fertilidad” al momento de detallar los subconceptos que se ha escogido como componentes de la salud del suelo. Cada uno de aquellos subconceptos es evaluado a través de ciertos indicadores cuyas definiciones se presentan a continuación. También se justificará la selección y ponderación de los indicadores seleccionados para evaluar la salud del suelo.

ii. Fertilidad biológica

No existe una definición universal de la fertilidad biológica, seguramente debido a la complejidad del concepto. En comparación con la fertilidad fisicoquímica, la fertilidad biológica ha sido muy poco estudiada y, por lo tanto, es poco entendida y conocida por el mundo científico, académico y técnico. Se puede considerar a la fertilidad biológica como la capacidad del suelo de proveer a las plantas los minerales que necesita gracias a la actividad de los organismos del suelo (actividad biológica) a través de la cadena trófica. La fertilidad biológica es función de la MO en su aspecto vivo (microorganismos y animales) y muerto (humus). La dimensión biológica del suelo influencia directamente las características físicas (porosidad, estabilidad, compactación, temperatura, humedad) y químicas (pH, potencial redox, disponibilidad y reserva de agua, oxígeno y nutrientes, capacidad de intercambio catiónico) del suelo.

La fertilidad biológica juega un papel primordial para la salud del suelo. Por ello, para la interpretación de los resultados de este estudio, se ha aplicado la siguiente ponderación (Tabla 7) de los subconceptos fertilidad biológica, física y química:

	Nivel de ponderación 2021	Nivel de ponderación 2017
Fertilidad Biológica	35%	50%
Fertilidad Física	20%	30%
Fertilidad Química	15%	20%
Fertilidad Multidimensional	30%	NA

Tabla 7. Niveles de ponderación de los subconceptos por el año 2017 (izquierda) y 2021 (derecha). Fuente: Elaboración propia.

Se ha escogido los indicadores que componen cada subconcepto tomando en cuenta la literatura, las recomendaciones de expertos y los recursos que han estado disponibles para este trabajo.

Materia Orgánica: este indicador toma en cuenta la cantidad de carbono orgánico del suelo y a partir de este dato se calcula el contenido de MO (multiplicando por 1,725²⁹). El stock de carbono orgánico del suelo depende de cuatro factores: tipo de suelo, clima, vegetación y del uso/manejo (antrópico) del suelo. El investigador Pascal Boivin (2021), experto en la cuestión de la calidad de los suelos, afirma que “existe una proporcionalidad entre la MO, las propiedades (físicas, químicas y biológicas) y funciones del suelo (como la mineralización y producción de biomasa). Para Boivin la MO del suelo es el primer indicador de la modulación de la calidad de los suelos. Este es un factor que un agricultor puede influenciar, modificar dentro 1 a 10 años, a la diferencia de otros factores importantes como la tasa de arcilla que se modifica a escalas de tiempo geológicas. La MO en el suelo es una variable que ha sido muy afectada en las últimas décadas (pérdida de 50 a 70% de la MO en los agroecosistemas) y con ello servicios ecosistémicos dependientes de la MO”.

En el presente trabajo, este indicador (MO) es uno de los más importantes porque condiciona el valor de otros indicadores de fertilidad biológica, física y química del suelo. Desde un punto de vista biológico, la MO (muerta³⁰) constituye el “combustible” de la actividad biológica. La biomasa y diversidad de los organismos vivos del suelo depende fuertemente de la abundancia y naturaleza de la MO. A nivel físico, la MO, junto a la actividad biológica, influye en la construcción de la estabilidad y porosidad del suelo; esta última condiciona los flujos de aire y de agua del suelo y su temperatura. La MO, a través de su función de agregación y estructuración, contribuye también a la resistencia de los suelos a la erosión hidráulica y eólica. A nivel químico, la MO es fuente de carbono y de minerales para la nutrición de las plantas. Retiene, gracias a su carga negativa, cationes esenciales para la nutrición vegetal. La MO junto a la actividad biológica tiene también la función de descontaminar los suelos operando biotransformaciones de ciertos contaminantes orgánicos e inorgánicos (Calvet & al, 2021).

MO cromatografía

El tamaño, la coloración, la integración y la formación de la zona intermedia de los cromas nos dan una información cualitativa y también cuantitativa de la MO presente en las muestras de suelo analizadas. Esta aproximación del contenido de MO a través de la cromatografía constituye un complemento a los análisis de la cantidad de carbono orgánico presente en los suelos.

Cantidad de ADN

La fertilidad biológica analiza tanto los efectos de la vida presente en el suelo como lo que anteriormente ha sido vivo, ha muerto y está en fase de descomposición o mineralización. Para evaluar la parte viva del suelo, la actividad biológica, se puede medir la cantidad de ADN presente por gramo de suelo. Como en 2020, en el estudio de D. Verdezoto, se ha utilizado aquella técnica, se decidió utilizar la misma en 2021 para poder comparar los resultados.

Si la MO muerta constituye el “combustible”, la actividad biológica constituye el “motor” del suelo y de sus funciones. Los microorganismos, lombrices, nematodos, amebas, insectos y gasterópodos son los principales actores de aquella actividad. Las enzimas producidas, por los microorganismos en particular, permiten las biotransformaciones que son: la biodegradación, mineralización, humificación y reacciones de anabolismo celular (Calvet & al., 2021).

²⁹ Coeficiente de conversión frecuentemente utilizado.

³⁰ Componentes de los tejidos vegetales: celulosa, hemicelulosa, taninos (lignina en particular); excrementos de animales; animales y microorganismos muertos; materias húmicas (materias orgánicas transformadas).



Actividad Biológica Cromatografía

La cromatografía permite analizar la actividad biológica a través de la interpretación de la integración de las diferentes zonas (figura 6) entre ellas y del tamaño, de la formación y coloración de las plumas.

Actividad enzimática Cromatografía

La actividad enzimática es el fruto de la actividad microbiana. Mediante la cromatografía se puede visualizar esta actividad de manera cualitativa a través del tamaño, la coloración, la integración y formación de la zona externa del cromograma. Entonces este es un indicador de la parte viva del suelo.

Respiración del suelo

Finalmente, la respiración del suelo, dato que se obtiene de la prueba Haney, de *Ward Laboratories*, consiste en medir la cantidad de dióxido de carbono que un suelo puede emitir dentro de un periodo de 24 horas de incubación³¹. La mayoría de los microbios emiten CO₂ a través de la respiración aeróbica, como los humanos. Entre más CO₂ produce el suelo más vida contiene o más alta es la biomasa microbiana (Anexo 9).

iii. Fertilidad física

Los minerales y la materia orgánica están más o menos asociados para formar unos ensamblajes de diversas tallas llamados agregados y terrones (Calvet & al., 2021). Los mismos autores afirman que “su yuxtaposición confiere al suelo una estructura porosa, caracterizada por la morfología y la geometría del espacio poral y por la cohesión de asociaciones de los componentes del suelo. Aquellas características determinan las propiedades físicas de los suelos, las cuales tienen una influencia sobre varios procesos físicos del suelo”. La fertilidad física del suelo tiene influencia sobre: las funciones de infiltración y aeración del suelo, las transferencias de agua e intercambios gaseosos, la reserva útil de agua y oxígeno, el hábitat de la vida del suelo (incluido en de las raíces), la erosión y compactación. Por ello entendemos que es un eslabón fundamental de la salud del suelo.

Para evaluar la fertilidad física de suelo se ha escogido los indicadores detallados a continuación:

Calidad de la Estructura

Según la literatura científica, se reconoce a la relación entre tasa de MO y tasa de arcilla como indicador de la calidad de la estructura del suelo (Johannes & al., 2019). Para evaluar qué cantidad de MO es ideal para un suelo, la respuesta depende de su contenido en arcilla (y también del tipo de arcilla). Por su pertinencia, se ha utilizado los valores de Ward para la tasa de MO y del INIAP para la tasa de arcilla.

Estructura Cromatografía

La cromatografía permite analizar la estructura del suelo a través de la interpretación del tamaño, coloración, integración y formación de la zona interna del cromograma (figura 6).

Compactación

Solamente para el estudio del 2020 realizado por Diana Verdezoto (UCE) se tiene este indicador. Permite evaluar el nivel de compactación del suelo a través de los valores de resistencia del suelo a la penetración. Unos valores elevados de compactación indican una degradación de la calidad del suelo. En un suelo compactado, las raíces de las plantas pueden explorar un volumen limitado de suelo y eso detiene proporcionalmente su potencial de desarrollo y salud. De la misma forma, todas las funciones evocadas antes, que permiten una buena estructura de suelo se ven afectadas por la compactación.

³¹ Después de haber sido mojado y secado de forma significativa

iv. Fertilidad química

La fertilidad química se refiere a la nutrición mineral de los vegetales vía los conceptos de biodisponibilidad³² de los minerales, carencias, toxicidades y equilibrios. Una nutrición equilibrada supone que las plantas puedan conseguir, en cantidad suficiente, y puedan adsorber el conjunto de elementos que necesitan. Aquellos elementos se encuentran presentes bajo diferentes formas bioquímicas y solamente una parte es disponible para las plantas. La MO y los minerales del suelo deben ser transformados (mineralización y disolución) para que los elementos constitutivos puedan ser disponibles para las plantas. La fertilidad química del suelo depende del tipo de suelo (roca madre), del clima, de la vegetación, de la MO, de la actividad biológica y sobre todo del uso que se hace del suelo. La cantidad y diversidad de microorganismos del suelo influyen fuertemente los procesos de disolución y son responsables (las bacterias en particular) de la mineralización. Así que en función del uso que se hace del suelo, de las prácticas agrícolas, se puede favorecer o disminuir la flora microbiana y así influir sobre la dinámica fisicoquímica del suelo de una u otra forma.

En los análisis de suelo realizados en 2017 (INIAP) y en 2021 (Ward; Agrobiolab), se reportan los valores de aproximadamente 10 minerales distintos. Sin embargo, se ha tomado la decisión de no tomar en cuenta la totalidad de estos para favorecer la claridad y pertinencia en el momento de realizar la interpretación de los resultados. Además, los valores de cantidad de minerales presentes en los resultados de análisis de suelo no dicen si estos están en una forma química accesible para la planta. Tampoco se sabe el origen de aquellos minerales y dado que hasta el 2017 se aplicaron cantidades importantes de fertilizantes de síntesis, una cierta proporción de los minerales presentes indudablemente tienen su origen en aquellos fertilizantes. Esta última práctica genera una fertilidad "artificial", incomparable con la fertilidad química generada de forma natural con las prácticas agroecológicas implementadas por el SEICAS. Pese a este argumento, en el capítulo IV, se analizará ciertos resultados de micro y macroelementos.

Por su pertinencia, se ha escogido los siguientes indicadores de la fertilidad química del suelo:

pH

Los valores de pH son función del tipo de suelo (roca madre), del clima, de la vegetación, de las prácticas agrícolas (aplicación de insumos de síntesis en particular) y de la actividad biológica. El pH es un parámetro de la salud del suelo que tiende a ser estable en el tiempo (al menos que se haga un aporte masivo de algún insumo muy ácido o alcalino).

Este indicador nos informa sobre el nivel de acidez y alcalinidad del suelo (en su horizonte superficial 0-30cm) y depende de la cantidad de iones de hidrogeno presentes. En el contexto agrícola, se considera que los valores de pH ideales son entre 6,5 y 7,5 para la disponibilidad de los nutrientes de las plantas y también para la actividad biológica.

Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE)

La CICE es la capacidad del suelo para fijar cationes gracias a las cargas negativas de las arcillas y/o de la MO (coloides). Por lo tanto, la CICE nos indica la capacidad que tiene el suelo de intercambiar cationes con la solución del suelo y con las raíces de las plantas. Un suelo con baja CICE indica que tiene poca capacidad de retener nutrientes para las plantas. Por ello es un buen indicador de la fertilidad química del suelo.

³² En este estudio se trata del grado al cual sustancias químicas (minerales) en el suelo pueden ser absorbidas o metabolizadas por las raíces de las plantas y/o los organismos vivos del suelo.



Carbono orgánico extractable de la solución del suelo (WEOC)

El WEOC representa la cantidad de carbono orgánico inmediatamente accesible para las plantas. El WEOC constituye una fracción menor de la tasa de MO total del suelo. Representa más la calidad que la cantidad de la MO del suelo. Generalmente, entre más alto el valor mejor, porque significa que hay más alimento, energía disponible para la flora microbiana (Anexo 9).

Nitrógeno orgánico extractable de la solución del suelo (WEON)

El WEON representa la cantidad de nitrógeno orgánico disponible para los microbios del suelo. Se trata por ejemplo de aminoácidos y proteínas vinculadas a átomos de carbono o a tejidos vegetales o animales que los microbios están descomponiendo. Entre más nitrógeno orgánico disponible para los microbios mejor se va a hacer la mineralización y se va a liberar elementos nutritivos para las plantas. Sin embargo, siempre hay que velar a respetar un equilibrio entre los valores de carbono y nitrógeno orgánico (Anexo 9).

Amonio (NH_4^+) y Nitrato (NO_3^-)

Estas dos variables constituyen indicadores de la nutrición nitrogenada inorgánica de las plantas. Las plantas se nutren tanto de amonio como nitrato, de manera más o menos balanceada, y la preferencia por el uno o el otro va a depender: del cultivo, del estado de crecimiento de la planta y de la temperatura. El nitrógeno siendo uno de los elementos más importantes y limitantes en la nutrición vegetal,) se vuelve un indicador relevante para evaluar la fertilidad química del suelo. Este elemento entra en la síntesis de varios componentes moleculares del anabolismo celular.

Fertilidad bioquímica cromatografía

La cromatografía permite analizar la fertilidad bioquímica del suelo a través de la interpretación del tamaño, coloración, integración y formación de la zona intermedia del cromatograma.

v. Fertilidad multidimensional

La fertilidad multidimensional aquí es un tipo de fertilidad que combina varios de los tipos de fertilidad analizados anteriormente. De igual forma, los indicadores que la componen en este estudio combinan aspectos de fertilidad biológica, física y química.

Salud del suelo (Ward)

Este indicador es la combinación de: la respiración del suelo, el WEOC y el WEON. Es un indicador que hay que relativizar en función de las condiciones pedoclimáticas y del uso del suelo (Anexo 9).

Salud del suelo cromatografía

Este indicador se calcula a partir de los valores de cada uno de los indicadores de la cromatografía (MO, actividad biológica, expresión enzimática, estructura, fertilidad bioquímica) para dar una interpretación multidimensional de la salud del suelo.

Rendimientos

En la metodología (III. A. ii.), se explica cómo se ha evaluado los rendimientos.

vi. Esfuerzo agronómico

Este concepto se entiende como el conjunto de prácticas agronómicas realizadas con la meta de regenerar y luego conservar la salud del suelo de la propiedad La Esperanza. Tanto al inicio del proyecto con aportes masivos de MO, como a lo largo del proyecto vía las prácticas agroecológicas desarrolladas por el SEICAS. Los indicadores descritos a continuación se han construido a partir de los datos de campo sistematizados por la coordinación del SEICAS y reportan las cantidades de MO aportadas al suelo:



Materia orgánica aportada al suelo de forma inicial

Este indicador reporta las cantidades de MO aportadas de forma inicial en 2018 (II. B. i) en vista de mejorar el porcentaje de MO del suelo, como primera práctica de regeneración (Anexo 1).

Materia orgánica aportada al suelo de forma continua

Pese a que el esfuerzo agronómico de regeneración y conservación del suelo, de forma continua en el tiempo, no se limita al aporte de MO al suelo sino al conjunto de prácticas agroecológicas descritas en la parte II. B. ii. Se ha escogido este indicador para poder interpretar los resultados y ponerlos en relación con los otros indicadores de los conceptos esfuerzo agronómico y económico.

Este indicador reporta las cantidades de MO aportadas de forma continua a través de varias prácticas como mulch de paja, pseudo mulch de tierra negra, aplicación de bocashi.

Materia orgánica aportada al suelo en total

Este indicador reporta la suma de las cantidades de MO aportadas de forma inicial y continua. Por ello refleja el esfuerzo agronómico total de regeneración y conservación del suelo del SEICAS durante 3 años de proyecto (Anexo 1).

vii. Esfuerzo económico

Por esfuerzo económico se entiende los costos derivados de las distintas actividades de regeneración y conservación del suelo en la finca La Esperanza consideradas en el presente estudio. Los indicadores descritos a continuación se han construido a partir de los datos de campo sistematizados por la coordinación del SEICAS:

Costo del aporte de MO al suelo de forma inicial

Este indicador reporta los costos generados por los aportes iniciales de MO al suelo (Anexo 1).

Costo del aporte de MO al suelo de forma continua

Este indicador reporta los costos generados por los aportes continuos de MO al suelo a través de las prácticas agroecológicas implementadas (ver II. B. ii.) (Anexo 1).

Costo total del proceso de aporte de MO al suelo

Este indicador reporta el costo total generado por los aportes de MO al suelo realizados por SEICAS (Anexo 1).

C. Metodología de interpretación de los resultados

El enfoque y el contexto del presente trabajo es principalmente agrícola. El manejo agrícola del suelo y sus efectos sobre la salud del suelo es el objeto de este estudio. El objetivo es evaluar diferentes prácticas, itinerarios técnicos de regeneración y conservación del suelo aplicadas, por el SEICAS, en la finca La Esperanza y analizar cuáles son las más eficientes agronómica y económicamente.

Responder a la pregunta directriz del estudio necesita tratar, en primer lugar, las subpreguntas siguientes:

- 1) ¿Cuál era el nivel de salud del suelo inicial de las parcelas analizadas (antes que empiece el proyecto SEICAS)?
- 2) ¿Cuál es el nivel de esfuerzo agronómico que ha sido aplicado en cada parcela analizada, al inicio del proyecto, de forma continua y en total?
- 3) ¿Cuál es el nivel de esfuerzo económico que ha sido aplicado en cada parcela analizada, al inicio del proyecto, de forma continua y en total?

4) ¿Cuál es el nivel de salud del suelo alcanzado, en cada parcela analizada, a finales del 2021?

Una vez que se haya contestado a estas 4 subpreguntas, a partir de aquellos elementos de respuesta, se va a poder responder a:

- 5) ¿Ha mejorado la salud del suelo en las parcelas analizadas y con qué nivel de intensidad?
6) ¿Cuáles prácticas han sido las más eficientes agronómica y económicamente para mejorar la salud del suelo?

Para contestar a la primera subpregunta, se ha utilizado los indicadores del concepto “Salud del suelo” en 2017 (tabla 8) a partir de 6 indicadores construidos en función de los análisis de suelo realizados a través del laboratorio de suelos del INIAP (2017) y de laboratorio de la UCE (2020)³³. Los subconceptos de: fertilidad biológica, física y química son representados, cada uno, por 2 indicadores:

Subconcepto	Indicador	Variable	Unidad	Fuente /Laboratorio
Fertilidad Biológica	ADN	Cantidad de ADN	µg/g de suelo	UCE
	Materia Orgánica	% de MO	%	INIAP
Fertilidad Física	Calidad de la estructura	% MO / % Arcilla	puntos	INIAP
	Compactación	Resistencia del suelo a la penetración (a 15cm)	Psi	Estudio UCE-FAG
Fertilidad Química	pH	Nivel de pH del suelo	puntos	INIAP
	NH4+ (Amonio)	Cantidad de NH4+	ppm	INIAP

Tabla 8. Indicadores y variables del concepto: Salud del suelo en 2017. Fuente: elaboración propia.

Para contestar a la segunda y tercera subpreguntas, se ha utilizado los indicadores de los conceptos “esfuerzo agronómico” y “esfuerzo económico” de la tabla 9:

Concepto	Indicador	Variable	Unidad	Fuente /Laboratorio	Año
Esfuerzo agronómico	Materia Orgánica aportada al suelo de forma inicial	Cantidad de MO aportada al suelo de forma inicial	t/ha	Coordinación SEICAS	2018; 2019;2020;2021
	Materia Orgánica aportada al suelo de forma continua	Cantidad de MO aportada al suelo de forma continua	t/ha	Coordinación SEICAS	2018; 2019;2020;2021
	Materia Orgánica aportada al suelo en total	Cantidad total de MO aportada al suelo	t/ha	Coordinación SEICAS	2018; 2019;2020;2021
Esfuerzo económico	Costo del aporte de MO al suelo de forma inicial	Valor del proceso de aporte de MO al suelo de forma inicial	USD/ha	Coordinación SEICAS	2018; 2019;2020;2021
	Costo del aporte de MO al suelo de forma continua	Valor del proceso de aporte MO al suelo de forma continua	USD/ha	Coordinación SEICAS	2018; 2019;2020;2021
	Costo total del proceso de aporte de MO al suelo	Valor total del proceso de aporte de MO al suelo	USD/ha	Coordinación SEICAS	2018; 2019;2020;2021

Tabla 9. Indicadores y variables de los conceptos: Esfuerzo agronómico y económico. Fuente: elaboración propia.

Para contestar a la cuarta subpregunta, se ha definido 18 indicadores de salud del suelo (tabla 10) para analizar las muestras recolectadas en el 2021. El subconcepto fertilidad biológica esta representados por 6 indicadores, la fertilidad física por 2 indicadores, la fertilidad química por 7 indicadores y la fertilidad multidimensional (que contiene indicadores que combinan varias variables) por 3 indicadores.

³³ Se recuerda que la recolección de muestras en 2020 se hizo en zona las menos intervenidas por el SEICAS.

Concepto	Indicador	Variable	Unidad	Fuente /Laboratorio
Fertilidad biológica	Materia Orgánica	% de MO	%	Ward
	ADN	Cantidad de ADN	µg/g de suelo	UCE
	Respiración del suelo	Cantidad de CO2 emitido por el suelo	ppm de C	WARD
	MO Cromatografía	Cantidad de MO y nivel de integración	Puntos de 1 a 5	CESA
	Actividad Biológica Cromatografía	Cantidad de actividad biológica	Puntos de 1 a 5	CESA
	Expresión enzimática Cromatografía	Cantidad de actividad enzimática	Puntos de 1 a 5	CESA
Concepto	Indicador	Variable	Unidad	Fuente /Laboratorio
Fertilidad Física	Calidad de la estructura	% MO / % Arcilla	Puntos	WARD; INIAP
	Estructura Cromatografía	Nivel de calidad de la estructura	Puntos de 1 a 5	CESA
Concepto	Indicador	Variable	Unidad	Fuente /Laboratorio
Fertilidad Química	pH	Nivel de pH del suelo	Puntos de 2 a 14	Agrobiolab; WARD
	CICE	Nivel de CEC	meq/100mL	Agrobiolab
	WEOC (Carbono Orgánico en solución)	Cantidad de carbono orgánico en la solución del suelo	ppm de C	WARD
	WEON (Nitrógeno Orgánico en solución)	Cantidad de nitrógeno orgánico en la solución del suelo	ppm de N	WARD
	NO3- (Nitrato)	Cantidad de NO3-	ppm	WARD
	NH4+ (Amonio)	Cantidad de NH4+	ppm	Agrobiolab
	Fertilidad bioquímica Cromatografía	Cantidad de minerales y su nivel de integración	Puntos de 1 a 5	CESA
Concepto	Indicador	Variable	Unidad	Fuente /Laboratorio
Fertilidad multidimensional	Salud del Suelo Haney Test	Nivel de salud del suelo	Puntos	WARD
	Salud del Suelo Cromatografía	Nivel de salud del suelo	Puntos de 1 a 5	CESA
	Rendimiento	Nivel de rendimiento	Puntos	equipo SEICAS

Tabla 10. Indicadores y variables del concepto Salud de Suelo en 2021. Fuente: Elaboración propia.

Para poder interpretar los datos de salud del suelo del año 2017 y 2021 y poder compararles se ha establecido un código de color asociado a un puntaje de 1 a 5. Los indicadores se han interpretado de la siguiente forma:

1 punto	2 puntos	3 puntos	4 puntos	5 puntos
Malo	Regular	Bueno	Muy bueno	Excelente

Puntaje asociado al código de color. Fuente: elaboración propia.

Concepto	Subconcepto	Indicador	Método de interpretación	Referencias del código de color				
Salud del suelo en 2017	Fertilidad Biológica	ADN	Rangos - Comparación de valores de los resultados de análisis del 2017 y del 2021 - entre más mejor	1 a 3	3 a 6	6 a 9	9 a 12	12 a 15
		Materia Orgánica	Rangos con referencia bibliográfica (INIAP)	Muy bajo 0 a 1	Bajo 1 a 2	Regular 2 a 3	Bueno 3 a 5	Muy bueno > 5

Fertilidad Física	Calidad de la estructura	Rangos con referencia bibliografía (P. Boivin)	Muy Malo 0 a 6	Malo 6 a 12	Regular 12 a 17	Bueno 17 a 24	Muy bueno >24
	Compactación	Rangos con referencia bibliográfica (Camacho, 2012 y Junior, Reinei & Reichert, 2004)	Muy crítico > 2,5	Critico 2 a 2,5	Regular 1,5 a 2	Bueno 0,5 a 1	Optimo 0 a 0,5
Fertilidad Química	pH	Rangos según revisión bibliográfica	Muy Malo 2 a 3,9 y 11 a 12	Malo 4 a 4,9 y 9 a 10,9	Tolerable 5 a 5,9 y 8 a 8,9	Bueno 6 a 6,5 y 7,5 a 7,9	Ideal 6,6 a 7,4
	NH4+ (Amonio)	Rangos con referencia bibliográfica (INIAP)	Muy baja 0 a 20	Baja 20 a 50	Media 50 a 80	Alta 80 a 110	Muy Alta >110

Tabla 11. Método de interpretación por indicadores para elaboración de un código de color para el 2017. Fuente: elaboración propia.

Concepto	Indicador	Método de interpretación	Referencias del código de color				
Fertilidad Biológica	Materia Orgánica del suelo	Rangos con referencias bibliográfica (INIAP)	Muy bajo 0 a 1	Bajo 1 a 2	Regular 2 a 3	Bueno 3 a 5	Muy bueno > 5
	ADN	Rangos y comparación de valores de los resultados de análisis del 2017 y del 2021 - entre más, mejor	1 a 3	3 a 6	6 a 9	9 a 12	12 a 15
	Respiración del suelo	Rangos - adaptación de los rangos del Haney Test (Ward Laboratories)	0 a 20	20 a 50	50 a 100	100 a 150	> 150
	MO Cromatografía	Apreciación de expertos	Malo	Regular	Bueno	Muy bueno	Excelente
	Actividad Biológica Cromatografía	Apreciación de expertos	Malo	Regular	Bueno	Muy bueno	Excelente
	Expresión enzimática Cromatografía	Apreciación de expertos	Malo	Regular	Bueno	Muy bueno	Excelente
Fertilidad Física	Calidad de la estructura	Rangos con referencia bibliografía (P. Boivin)	Muy Malo 0 a 6	Malo 6 a 12	Regular 12 a 17	Bueno 17 a 24	Muy bueno >24
	Estructura Cromatografía	Apreciación de expertos	Malo	Regular	Bueno	Muy bueno	Excelente
Fertilidad Química	pH	Rangos según revisión bibliográfica	Muy Malo 2 a 3,9 y 11 a 12	Malo 4 a 4,9 y 9 a 10,9	Tolerable 5 a 5,9 y 8 a 8,9	Bueno 6 a 6,5 y 7,5 a 7,9	Ideal 6,6 a 7,4
	CEC	Rangos con referencia bibliográfica para suelos francos (Doucet, 2006)	Muy baja < 4	Baja 10 a 15	Media 15 a 20	Buena 20 a 25	Muy buena >25
	WEOC (Carbono Orgánico en solución)	Rangos - adaptación de los rangos del Haney Test (Ward Laboratories)	Muy baja 0 a 50	Baja 50 a 100	Media 100 a 150	Buena 150 a 300	Muy buena >300
	WEON (Nitrógeno Orgánico en solución)	Rangos - adaptación de los rangos del Haney Test (Ward Laboratories)	Baja 0 a 10	Regular 10 a 20	Buena 20 a 30	Muy Buena 30 a 60	Excelente >60
	NO3- (Nitrato)	Rangos con referencia bibliográfica (INIAP)	Muy baja 0 a 5	Baja 5 a 10	Media 10 a 20	Alta 20 a 40	Muy Alta >40
	NH4+ (Amonio)	Rangos con referencia bibliográfica (INIAP)	Muy baja 0 a 20	Baja 20 a 50	Media 50 a 80	Alta 80 a 110	Muy Alta >110
	Fertilidad bioquímica Cromatografía	Apreciación de expertos	Mala	Regular	Buena	Muy buena	Excelente
Fertilidad multidimensional	Salud del Suelo Haney Test	Rangos - adaptación de los rangos del Haney Test (Ward Laboratories)	Malo < 7	Regular 7 a 14	Bueno 14 a 20	Muy bueno 20 a 30	Excelente >30
	Salud del Suelo Cromatografía	Apreciación de expertos	Mala	Regular	Buena	Muy buena	Excelente
	Rendimiento	Apreciación de expertos	Mala	Regular	Buena	Muy buena	Excelente

Tabla 12. Métodos de interpretación por indicadores para elaboración de un código de color para el 2021. Fuente: elaboración propia.

Luego se ha evaluado cada indicador y cada muestra con el código de color y aplicado un puntaje ponderado de la manera comentada anteriormente (Tablas 11 y 12). Se analizará también el comportamiento de ciertos indicadores individualmente para completar la interpretación de los diferentes resultados obtenidos.

Para contestar a la quinta subpregunta, se va a comparar la salud del suelo de las parcelas antes y después de la intervención del SEICAS, se va a comparar los indicadores del 2017 con los del 2021. Pero como son 6 indicadores en 2017 y 18 en 2021, cuando no hay comparación posible con el 2017 se utilizará el promedio de los valores de las muestras M5 y M6 (zona de pasto) como “falsos testigos”; porque es donde se ha intervenido menos en términos de prácticas de regeneración del suelo. Para evaluar el nivel de salud global del suelo o por tipo de fertilidad o por parcelas analizadas (M1 a M6) en 2021 se utilizará el **porcentaje del puntaje máximo posible (% PMP)** que cada indicador hubiese podido alcanzar si hubiese obtenido un puntaje máximo de 5. Eso va a permitir comparar los valores de los indicadores y conceptos entre el 2017 y el 2021, y entre muestras del mismo año.

Finalmente, para contestar a la subpregunta 6, se va a comparar el nivel de salud del suelo alcanzado en 2021 con el nivel de esfuerzo agronómico y económico aplicado en las parcelas analizadas. Así se va a analizar la eficiencia agronómica y económica de las prácticas de regeneración y conservación de la salud del suelo implementadas.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Estado inicial de salud del suelo del predio (2017)

A parte de los resultados de análisis de suelo del INIAP que se han obtenido en 2017, vale mencionar que cuando el SEICAS llegó al predio (mitad del 2018), se ha podido observar, como lo ilustra la foto 12, un suelo con un nivel de compactación tal que un pico, así se le maneje con fuerza, no podía entrar a más de 15cm de profundidad. Según L. Bourguignon (2008), edafóloga, las formas geométricas de los terrones indican un suelo compactado y con poca actividad biológica (la vida produce formas redondas).



Foto 11. Suelo de la finca La Esperanza a inicios del 2018. Fuente: elaboración propia.

A partir del análisis de las muestras de suelo realizado por el INIAP en 2017 (Anexo 4), de la cantidad de ADN del suelo y de la medición del nivel de compactación del suelo realizado en 2020 por D. Verdezoto en el estudio de línea base (Anexo 2 y 7), se ha calculado los promedios de cada una de las 6 variables de las 9 muestras recolectadas en 2017 y de las 7 recolectadas en 2020:

Concepto	Indicador	Variable	Unidad	Valor Promedio	Código de color	Puntaje Ponderado	Puntaje/ tipo de fertilidad	% Puntaje Máximo
Fertilidad Biológica	ADN	Cantidad de ADN/ g de suelo	µg/g	2,91	1	1,7	6,7	40
	Materia Orgánica	% de MO	%	2,1	3	5,0		
Fertilidad Física	Calidad de la estructura	% (tasa MO / tasa Arcilla)	%	14	3	3,0	5	50
	Compactación	Nivel de resistencia del suelo a la penetración	Psi	2,08	2	2,0		
Fertilidad Química	pH	Nivel de pH del suelo	Puntos	6,5	4	2,7	4,7	70
	NH4+ (Amonio)	Cantidad de NH4+	ppm	54	3	2,0		
TOTAL					16	16,4	% Puntaje Máximo Total	49

Tabla 13. Interpretación de los valores promedios de los 6 indicadores de salud del suelo del 2017. Fuente: elaboración propia.

La fertilidad biológica en 2017 no es buena, pues hay muy poca actividad biológica y el nivel promedio de materia orgánica (MO) es bajo, sin ser crítico. La fertilidad física tiende a ser mala según los indicadores evaluados: la calidad de la estructura se ha calculado a partir de la relación entre tasa de MO y tasa de arcilla, vemos que tiene valores regulares pero que no es buena. El nivel de compactación es alto. Respecto a la fertilidad química, el pH es bueno para la actividad agrícola y el nivel de amonio es regular.

Podemos asegurar que el suelo tiene un nivel de salud global malo. Sobre todo, a través de los indicadores de fertilidad biológica que alcanzan un 40% del puntaje máximo posible (PMP). La actividad biológica, es decir los organismos vivos del suelo tienen un papel fundamental para la salud del suelo. Con poca actividad biológica el suelo no puede tener buena estructura y el suelo se compacta fácilmente.

Si se aplica la ponderación del puntaje se obtiene 16,4 sobre 33,4 puntos posibles. Es decir que se obtiene un 49% del PMP a partir de los valores promedios calculados. Hay que tomar en cuenta que se han podido evaluar solamente 6 variables y eso debilita la pertinencia del resultado de 49%. Vemos que la fertilidad química tiene un 70% del puntaje máximo posible. Eso es gracias al pH que es una característica que se suele calificar de estática o inherente al suelo, es decir que se modifica naturalmente en lapsos de tiempo largos (siglos o más) (E. K. Bünemann & al, 2018). Solo el puntaje del pH hace subir casi de 10% el valor del porcentaje del puntaje máximo. Por lo que hay que analizar este resultado de salud del suelo tomando en cuenta su debilidad estadística. Pese a esta limitación, es interesante comparar este primer resultado con el puntaje del suelo obtenido en 2021.

B. Análisis del esfuerzo agronómico y económico de regeneración y conservación del suelo realizado por el SEICAS

Aquí se analiza la totalidad de aportes en MO (inicial y continuos) en toneladas por hectárea (t/ha); lo que constituye el esfuerzo agronómico de regeneración del suelo. El esfuerzo económico es el costo que ha representado realizar aquellos aportes. Aquellos datos han sido sistematizados por la coordinación del SEICAS a lo largo del proyecto.

i. Esfuerzo agronómico y económico de los aportes iniciales de MO al suelo

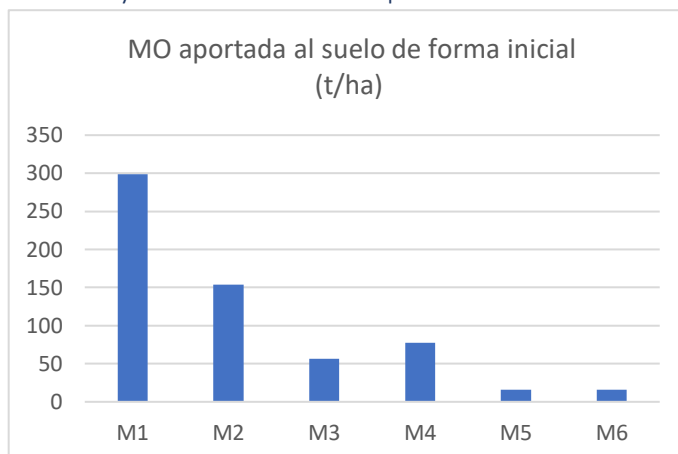


Figura 5. Síntesis de las cantidades de MO aportadas al suelo de forma inicial. Fuente: elaboración propia.

Las cantidades de MO aportadas por bloque han sido extrapoladas a una hectárea³⁴ con el fin de poder comparar entre muestras. M1 ha recibido el equivalente de 299 t/ha, dos veces más que M2 (154 t/ha); seis veces más que M3. Si M4 ha recibido 21 t/ha más de MO que M3 es por haber tenido 4,5 ciclos de abono verde incorporados contra 2,5 para M3 (10 t/ha más) y haber tenido 11 t/ha más de pollinaza. Como explicado en el capítulo II, M5 y M6 han recibido 16 t/ha de materia seca con distintas incorporaciones de barbecho y restos de cultivos de avena y vicia. La proporción de estos últimos aportes es marginal en comparación con los de M1 a M4.

El patrón de la figura 7 se va a reflejar en varios gráficos de los indicadores de salud del suelo, mostrando la importancia del efecto de la “MO aportada al suelo de forma inicial” y de la “tasa de MO” sobre la salud del suelo.

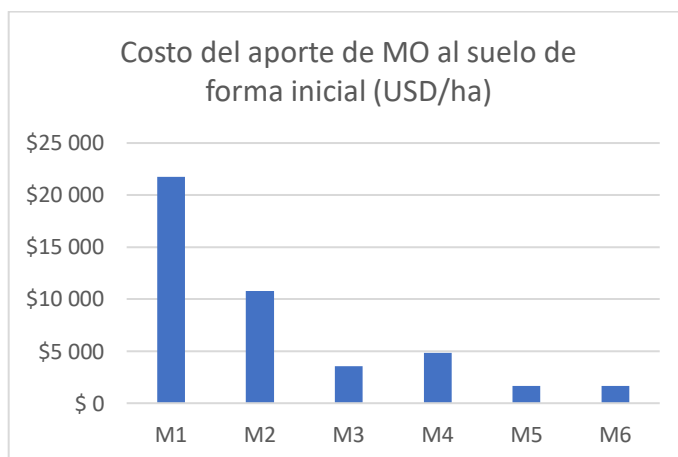


Figura 6. Síntesis del costo del aporte de MO al suelo de forma inicial. Fuente: elaboración propia.

De igual forma que con la MO, se ha extrapolado los valores en USD/ha para poder compararlos entre muestras. Dado que la MO incorporada ha sido comprada en su mayoría, la correlación es lógicamente muy fuerte entre la figura 7 y el costo que ha representado aquellos aportes (figura 8). Para M1, se ha invertido el equivalente de 21 762 USD /ha y en M5 y M6 1 634 USD/ha.

³⁴ No son las cantidades efectivamente aportadas al suelo. Las cantidades aportadas son 10 veces inferiores en promedio porque los aportes han sido realizados en parcelas de aproximadamente 1 000 m².

ii. Esfuerzo agronómico y económico de los aportes continuos de MO al suelo

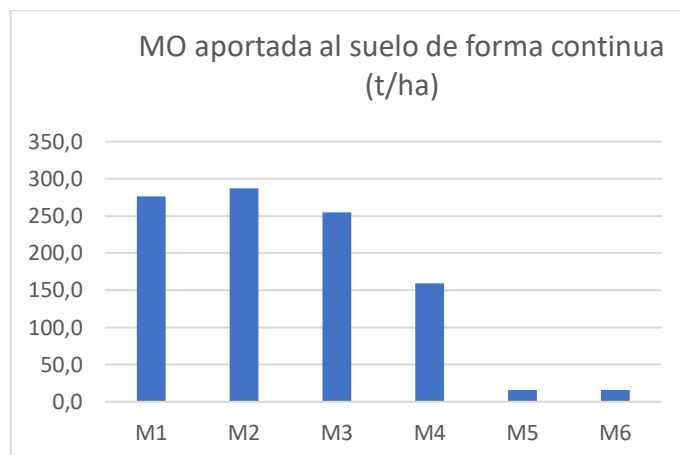


Figura 7. Síntesis de las cantidades de MO aportadas al suelo de forma continua. Fuente: elaboración propia.

Los aportes continuos de MO sostenidos por las prácticas agroecológicas y de agricultura regenerativa llevadas adelante por el SEICAS fueron detallados en el capítulo II. Aquellos empezaron una vez armadas las camas permanentes (Figura 3). Las diferencias de valor entre M1 a M4, en la figura 9, se deben al tiempo que aquellas parcelas han estado cultivadas³⁵. M2 que corresponde a los bloques 1 y 2 (Mapa 1) son las parcelas que llevan más tiempo cultivadas por el SEICAS (2,25 años). M4 ha recibido menos MO proveniente de los aportes continuos porque empezó a ser cultivada después de las parcelas M1 a M3 (entre finales del 2019 e inicios del 2020). En cambio, es importante resaltar que ha recibido más ciclos de abono verde que las otras parcelas (4,5). Eso constituye un dato importante al momento de analizar la eficiencia agronómica de las prácticas de regeneración de la salud del suelo.

Vale mencionar que cuando se ponderan las cantidades de **MO aportada de forma continua** en función del tiempo que cada parcela ha sido cultivada, pues resultan casi iguales para M1 a M4 y son **127,5 t/ha/año que han sido aportadas en cada parcela**.

Respecto a M5 y M6, se ha tomado los valores de los aportes iniciales de MO (16t/ha)³⁶.

En el siguiente gráfico (Figura 10), se puede analizar que los valores son lógicamente correlacionados con los valores de la figura 9. Las diferencias de tendencias entre la figura 9 y 10 se explican por el hecho que en la figura 9, no se ha tomado en cuenta las cantidades de microorganismos y biofertilizantes líquidos aplicados a los cultivos. Porque aquellas aplicaciones no influyen directa y significativamente la cantidad de MO (II. B. ii.). En cambio, esas prácticas tienen un gran interés agronómico en términos de regeneración de la actividad biológica del suelo y también un costo significativo en materiales y mano de obra (Anexo 1). Por ello se ha decidido tomarles en cuenta para el siguiente indicador.

³⁵ Es decir, con producción de cultivos para la comercialización (alimentos)

³⁶ Estos mismos valores aparecen en los gráficos de aportes de MO de forma inicial y continua con el objetivo tener una mirada comparativa con el proceso llevado en aquellas parcelas. Sin embargo, vale aclarar que en los valores de la variable "MO total aportada al suelo" que se va a tratar a continuación, aparece el mismo valor de 16 t/ha y no se suman dos veces.

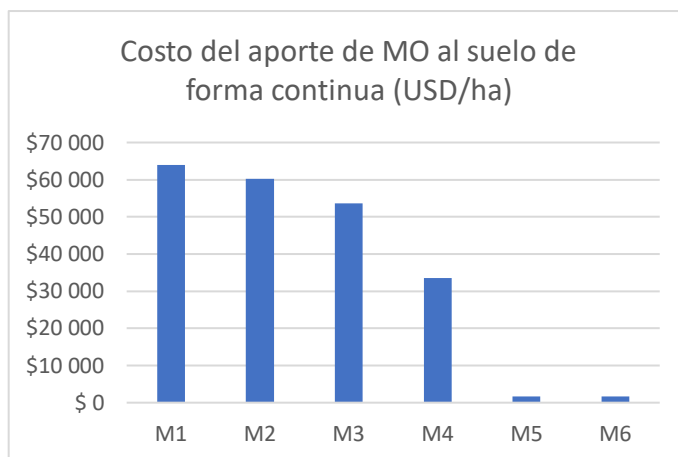


Figura 8. Síntesis del costo del aporte de MO al suelo de forma continua. Fuente: elaboración propia.

De hecho, las aplicaciones más frecuentes realizadas en el invernadero, por ser un micro agroecosistema sensible agronómica y económicamente, se reflejan en los valores de M1 que presenta el valor más alto³⁷: 63 897 USD/ha durante los 2,2 años que ha estado cultivado. M2 tiene el segundo valor más alto por ser la parcela con más tiempo en cultivo (2,25 años), pero no sobrepasa el valor de M1 porque las aplicaciones de biofertilizantes y microorganismos han sido menos frecuentes en M2. Los valores de M3 y M4 bajan porque aquellas parcelas han sido cultivadas menos tiempo (respectivamente 2 y 1,3 años en promedio) y por ello se ha aplicado menos biopreparados.

iii. Esfuerzo agronómico y económico total del proceso de aporte de MO al suelo

Finalmente, cuando se suman los aportes iniciales y continuos de MO realizados al suelo, se da una curva decreciente, casi lineal, de M1 a M4 (figura 11). Para M5 y M6 las parcelas con menos aportes se hace notorio el descenso en comparación con las otras muestras. Por ello, en la interpretación, a pesar de que no sea realmente así, se pueden asimilar a estas parcelas como “falsos testigos”.

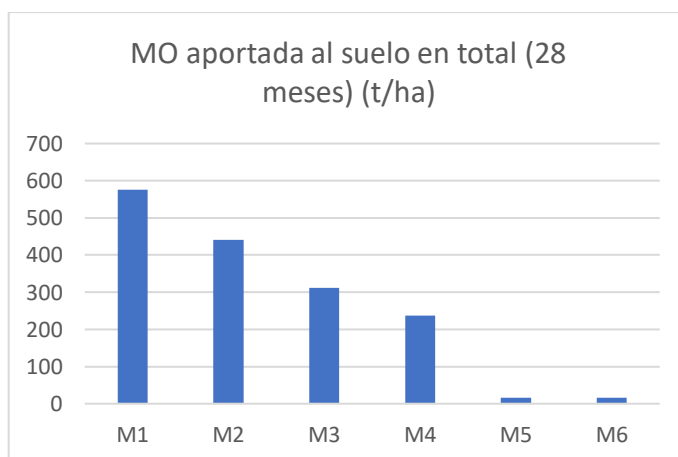


Figura 9. Síntesis de las cantidades de MO aportadas al suelo a lo largo de todo el proyecto. Fuente: elaboración propia.

Los aportes continuos de MO han permitido matizar las diferencias importantes que existían entre los valores de aportes iniciales de MO al suelo. En M1, a lo largo de 28 meses del proyecto, se ha aportado el equivalente de 575 t/ha de MO (en total); 237 t/ha en M4. Expertos del suelo dicen que para no

³⁷ Vale precisar que los valores en USD/ha calculados no corresponden a valores realmente gastados por CESA sino a la extrapolación por hectárea de lo que se ha gastado. En el anexo 1 están reportados todos los gastos reales realizados por CESA en cada bloque de aproximadamente 1 000 m².

perder MO se necesita aportar al suelo de 20 a 30 t/ha/año de MO (materia seca). Cuando se necesita incrementar la tasa de MO del suelo, se necesita aportar más que esta proporción. SEICAS ha aportado en el caso de M1 más de 20 veces esta cantidad y en el caso de M4 cerca de 10 veces más. En los resultados de análisis de laboratorio se va a analizar los efectos de aquellos aportes.

La misma tendencia se observa a nivel de los valores de costo total del proceso de aporte de MO en las diferentes parcelas analizadas. Los costos son proporcionales a las cantidades de MO aportadas.

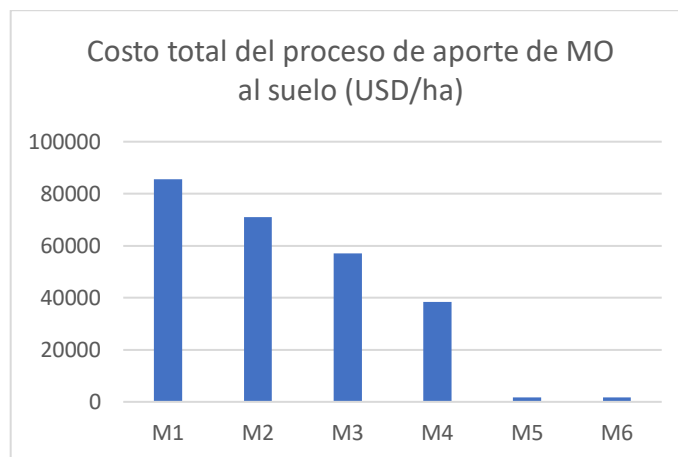


Figura 10. Síntesis del costo total del proceso de aporte de MO al suelo. Fuente: elaboración propia.

Es a la luz de estos últimos resultados que se va a interpretar los valores de los indicadores de salud del suelo elaborados a partir de los datos de análisis, de cuatro laboratorios distintos, realizados en el 2021. La comparación y puesta en perspectiva de estos últimos resultados con los que siguen es lo que va a permitir evaluar el impacto y la eficiencia de las prácticas de regeneración del suelo implementadas por el SEICAS.

C. Evaluación de los efectos de la intervención del SEICAS sobre la salud del suelo

En esta parte se analiza la evolución de la salud del suelo de la finca La Esperanza, luego de cerca de tres años de intervención a través de las actividades del SEICAS. Se evalúa la fertilidad biológica, física y química, a partir de los resultados de análisis de suelo obtenidos en 2021 los que se compara con los resultados con los del 2017 y 2020 (ver IV. A). También se realiza un análisis de los indicadores descritos frente a los indicadores de esfuerzo agronómico y económico. El análisis se hará por concepto, por indicador y por muestra.

Los resultados del 2017 se basan en 6 indicadores, mientras que para el 2021 se tiene 18 indicadores. Cuando no se tiene la posibilidad de comparar un indicador con el 2017, se utiliza el valor promedio de M5 y M6 como “falsos testigos”, como explicado en la metodología (III. C.). Se recuerda también que en la tabla 1 (II. B. i.), está detallada la correspondencia entre las muestras (M1 a M6) y las diferentes parcelas y sus niveles de aporte de MO.

i. Evolución de la fertilidad biológica

La tabla a continuación contiene la evaluación de los indicadores de fertilidad biológica del suelo:

Concepto	Indicador	Variable	Unidad	Laboratorio	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Puntaje Ponderado
Fertilidad Biológica	Materia Orgánica	% de MO	%	Ward	5	4	4	4	2	2	22
	ADN	Cantidad de ADN	µg/g de suelo	UCE	5	5	5	5	3	3	28
	Respiración del suelo	Cantidad de CO2 emitido por el suelo	ppm de C	WARD	5	2	3	2	1	2	16
	MO Cromatografía	Cantidad de MO	Puntos de 1 a 5	CESA	4	4	3	4	2	1	21
	Actividad Biológica Cromatografía	Nivel de actividad biológica	Puntos de 1 a 5	CESA	4	3	2	2	1	1	14
	Expresión enzimática Cromatografía	Nivel de actividad enzimática	Puntos de 1 a 5	CESA	4	3	2	3	2	1	16
SUB-TOTAL FERTILIDAD BIOLÓGICA					27	21	19	20	11	10	117
% Puntaje Máximo					90	70	63	67	40	37	61

Tabla 14. Interpretación de los indicadores del concepto de fertilidad biológica en 2021. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de los laboratorios Ward, UCE y CESA.

La materia orgánica:

El siguiente gráfico indica la tasa de MO del suelo de las diferentes parcelas analizadas en 2021 y se puede constatar un incremento significativo en comparación con el 2017.

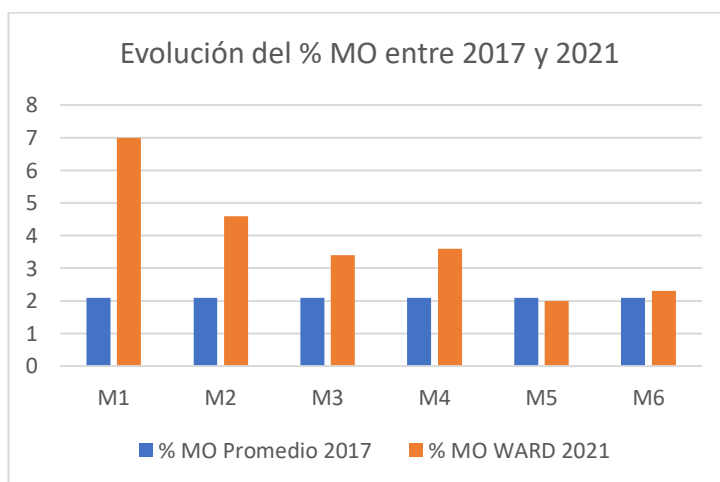


Figura 11. Evolución de la tasa MO entre 2017 y 2021. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Ward Laboratories e INIAP.

La tasa de MO promedio del 2017 era de 2,1 contra 3,8 en 2021. De M1 a M4 se nota una mejora significativa del valor del % MO: promedio de 4,65. En las parcelas donde se ha intervenido menos que son M5 y M6 casi no ha habido variación del porcentaje de MO. En M3 y M4 en cambio, se ha ganado respectivamente 1,3 y 1,5 % de MO. Las parcelas correspondientes a M2 han mejorado de 2,5 % y de 4,9 %³⁸ en M1.

Para evaluar si la tasa de MO de un suelo es buena o mala es necesario ponerla a en relación con su tasa de arcilla (Johannes & al., 2019), esto lo analizamos más adelante con el indicador “calidad de la estructura del suelo”. Sin embargo, se puede adelantar que M1 tiene una excelente tasa de MO, M2 muy buena y M3 y M4 tienen una buena tasa de MO. En M5 y M6 los valores son calificados de

³⁸ Se compara los resultados del 2021 con el promedio del % MO del 2017 (2,1%).

regulares e insuficientes para alcanzar una buena calidad de suelo agrícola. Esto se debe a que los aportes de MO durante el proyecto fueron muy bajos en comparación con las otras parcelas analizadas y al trabajo del suelo con rastra (oxigenación de la MO) aplicado dos veces.

Existe correlación entre la figura 13 y la del indicador “MO aportada de forma inicial” (Figura 7). Se puede interpretar dos elementos: el uno es que los aportes iniciales de MO han permitido mejorar la tasa de MO significativamente y de forma proporcional a las cantidades aportadas; el segundo es que, esta proporcionalidad se observa después de 2 a 2,5 años de haber realizado aquellos aportes. Eso significa que las prácticas agrícolas (continuas) del SEICAS han permitido, por lo menos, mantener el mejoramiento de la fertilidad generada por los aportes iniciales de MO. Los aportes continuos de MO han sido de 127 t/ha/año, es decir 5 veces lo que se necesita para mantener la tasa de MO de un suelo³⁹. Por lo tanto, es muy probable que aquellos aportes hayan permitido no solamente mantener sino incrementar el porcentaje de MO del suelo en las parcelas correspondientes a M1 a M4. El hecho de que se haya aportado aproximadamente la misma cantidad de MO de forma continua en M1 a M4 no permite comprobar esta hipótesis.

Desde la técnica de la cromatografía (Foto 13), la evaluación de la cantidad de MO refleja la misma tendencia que el análisis del laboratorio Ward. Es decir, que M1 a M4 tienen una cantidad de MO significativamente mayor a M5 y M6. El ancho de la zona intermedia de M1 a M4 está entre 1,5cm y 1,7cm, mientras la zona intermedia de M5 y M6 está entre 1cm y 1, 2cm. Con esta técnica, la apreciación es visual y también cuantitativa a través de la medición del ancho de la zona intermedia.

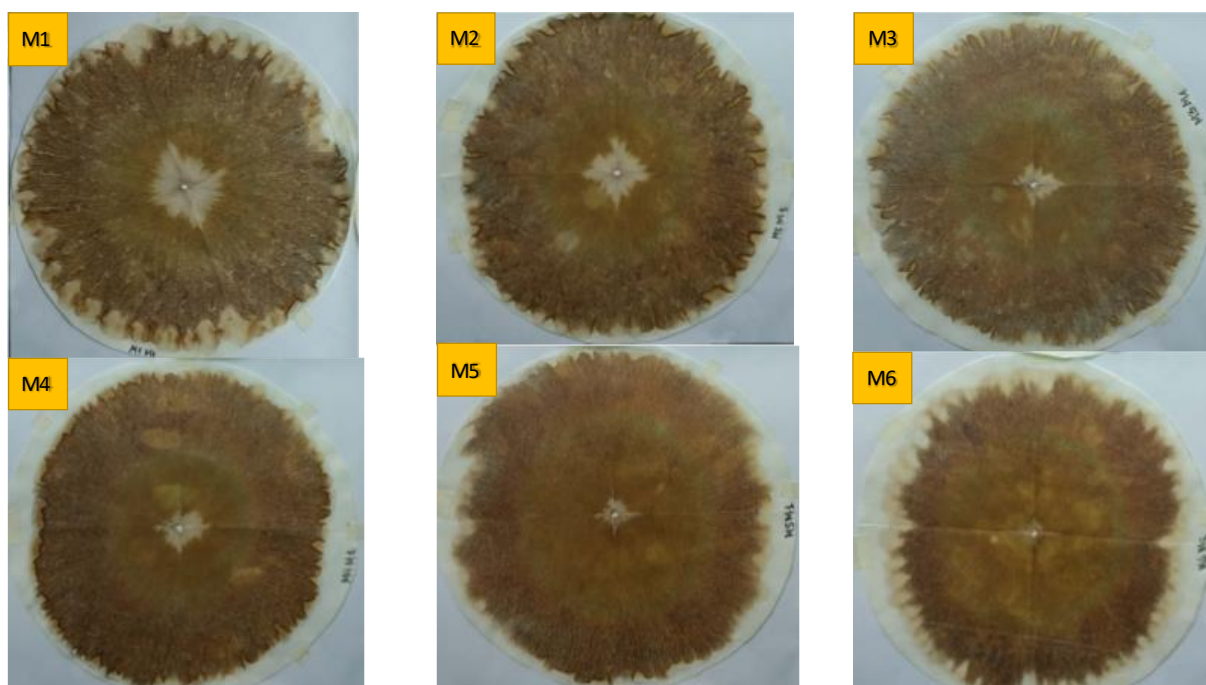


Foto 12. Cromatografía de las 6 muestras de suelo del 2021 realizadas por el laboratorio de CESA. Fuente: elaboración propia a partir de los cromas realizados por CESA.

Lo que se puede apreciar en el croma de M1, es una zona intermedia más ancha que en los otros cromas y mucho más integrada a la zona interna (zona mineral). De un lado eso dificulta un poco la medición exacta de donde empieza la zona intermedia y de otro lado, indica que la MO contiene una buena actividad biológica, como se lo va a ver a continuación.

³⁹ Se recuerda que el suelo requiere en promedio (varía en función de las condiciones pedoclimáticas) recibir 25 t/ha/año de MO (materia seca) para que su contenido en MO no disminuya.

Actividad Biológica:

La actividad biológica está representada en este estudio por los siguientes indicadores: “cantidad de ADN”, “respiración del suelo”, “actividad biológica cromatografía” y “actividad enzimática cromatografía”.

Respecto a la **cantidad de ADN** presente en el suelo, podemos observar las siguientes diferencias entre 2021 y el valor promedio de los análisis del año 2020⁴⁰ (2,91 µg/g):

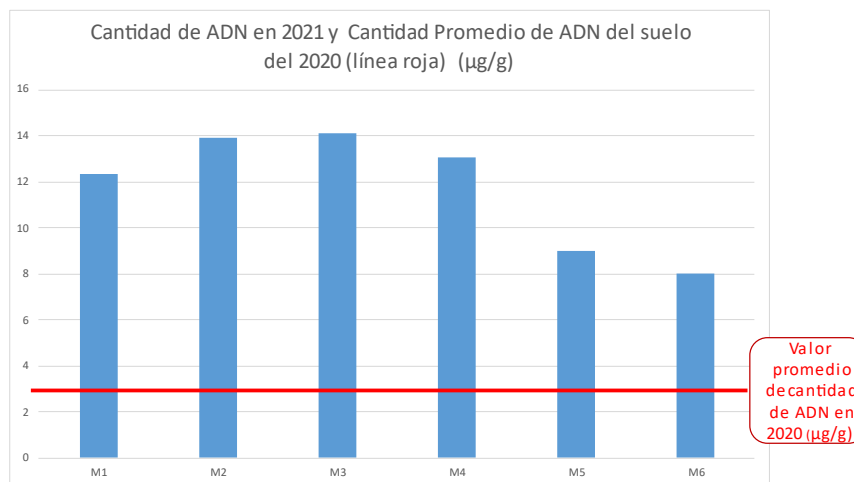


Figura 12. Diferencia entre la cantidad promedio de ADN (2,91 µg/g) en 2020 y las cantidades analizadas en 2021. Fuente: elaboración propia a partir de los datos del estudio de D. Verdezoto (2020) y de los resultados de análisis del laboratorio de microbiología de la UCE (2021).

Observamos, en primer lugar, que todas las muestras han mejorado su cantidad de ADN entre 2020 y 2021. El promedio ha pasado de 2,91 a 11,73 µg de ADN por gramo de suelo. De M1 a M4 ha habido un incremento mayor (entre 9,44 y 11,19 µg/g) de la cantidad de ADN que en M5 y M6 (5,09 a 6,07 µg/g). Podemos analizar que los 5 a 6 µg de ADN por gramo de suelo han sido ganados gracias a las prácticas implementadas en aquellas parcelas. Es decir, a la limitación de la frecuencia y profundidad de la labranza, a la ausencia de aplicación de pesticidas y fertilizantes de síntesis, a la incorporación de MO y a la aplicación de microorganismos y biofertilizantes.

Un dato sorprendente es que el valor de M1 es más bajo que el de M2, 3 y 4 a pesar de la cantidad de MO aportada y aplicaciones de microorganismos en esta parcela. Sin embargo, los indicadores tanto de respiración del suelo como de actividad biológica en la cromatografía no son coincidentes con esta tendencia, e indican más bien una mayor actividad biológica en M1 que en el resto de las muestras.

Según el Instituto Nacional de Investigación Agronómica (INRA) de Dijon, Francia⁴¹, se ha medido que en promedio en los suelos cultivados hay entre 30 y 40 µg de ADN por gramo de suelo; entre 70 y 80 µg/g en bosques y pastos. Tomando este dato como referencia para el análisis de la situación en el suelo que estamos analizando vemos que a pesar de haber aumentado la cantidad de ADN después del trabajo de SEICAS, estos valores (entre 8 y 14 µg/g) siguen siendo bajos.

En cuanto al indicador **respiración del suelo**, según Ward Laboratories, las muestras analizadas tienen los siguientes valores:

⁴⁰ Las muestras habían sido recolectadas en sitios de la finca los menos intervenidos para el estudio de línea base de Diana Verdezoto (UCE-FAG).

⁴¹ No se ha encontrado datos de cantidad de ADN promedio de los suelos a nivel del Ecuador o de los Andes.

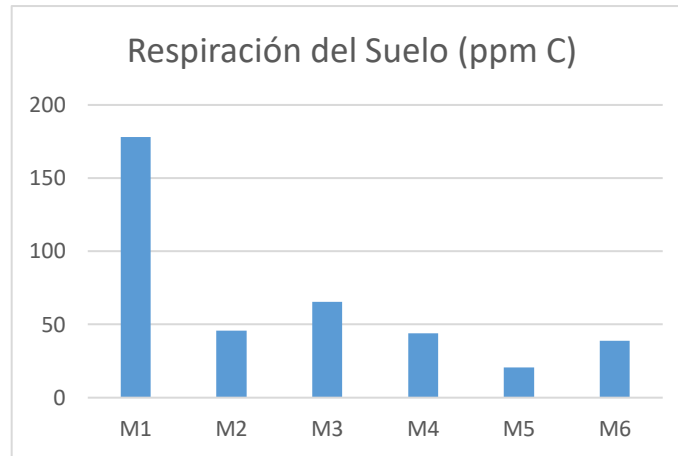


Figura 13. Nivel de respiración del suelo (en 2021). Fuente: elaboración propia a partir de los datos de Ward Laboratories.

Existe una diferencia importante entre M1 y el resto de las muestras. Según Ward Laboratories, el valor medio de respiración del suelo es de 50. Las muestras de M2 a M4 están cerca de este valor. Los falsos testigos M5 y M6, donde se ha intervenido menos, tienen un valor promedio de 30 ppm C.

Un dato que interpela es el obtenido en la parcela M2 (45,8 ppm C) un resultado que coloca a la actividad biológica de esta parcela en un rango de media a baja. Este resultado difiere del obtenido en la cromatografía. Además, dado de que la actividad biológica estaría relacionada con la capacidad productiva del suelo, este resultado sería contradictorio con los resultados productivos de esta parcela que después de la parcela M1 presentó los mejores rendimientos. Hubiese sido interesante tener repeticiones de las mismas parcelas para confirmar aquellos valores de respiración del suelo.

Finalmente, a partir de los análisis de cromatografía se afirma una evaluación positiva sobre la calidad biológica aducidas a las prácticas agronómicas (agroecológicas) aplicadas en SEICAS (foto 13). Como evocado anteriormente, M1 presenta una muy buena integración de la zona intermedia con la zona interna, reflejo de una buena actividad biológica; el buen tamaño de las plumas y su formación bien marcada demuestran también una actividad biológica importante; los dientes anchos y de color crema de las nubecillas permiten interpretar una muy buena actividad enzimática misma que es resultado de la actividad biológica. Este análisis se repite para M2, aunque con menor intensidad. La actividad biológica disminuye un poco más en M3 y mejora levemente en M4. En cambio, M5 tiene este indicador muy bajo y M6 no presenta ningún aspecto de actividad biológica.

Una mejora de la fertilidad biológica significativa y proporcional a los aportes de MO

En la figura 18, analizamos el porcentaje del puntaje máximo posible (% PMP) de la fertilidad biológica.

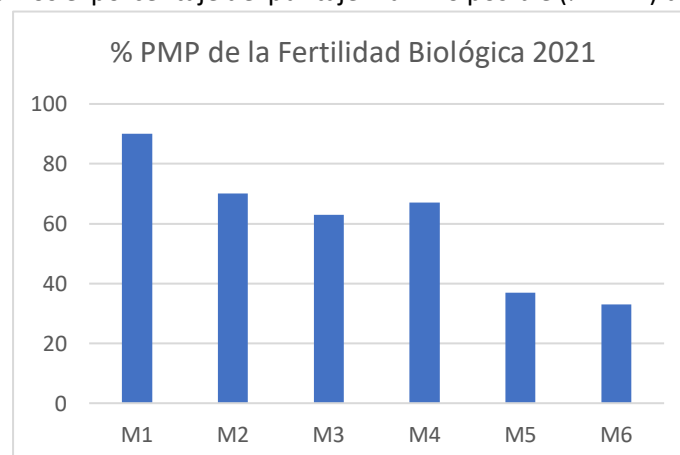


Figura 14. Porcentaje del puntaje máximo posible para la fertilidad biológica 2021. Fuente: elaboración propia.

M1 con 90% obtiene el mejor puntaje, M2 le sigue con 70%, M4 con 67% y M3 con 63%. M5 y M6 tienen puntajes más bajos con 37% y 33%. Estos datos se pueden comparar con el 2017 donde la fertilidad biológica alcanzaba el 40% del PMP (tabla 13). Se recuerda que, en el caso del 2017, solo se consideraron 2 indicadores (MO y ADN). Sin embargo, se constata un mejoramiento importante de la fertilidad biológica en las parcelas más intervenidas que son de M1 a M4 que obtienen un promedio de 72,5% del PMP, contra un promedio de 35% en M5 y M6 donde la intensidad de intervención ha sido mucho menor.

Si se compara la figura 16 con los valores de los indicadores del concepto “esfuerzo agronómico” (Figura 7 y 9), se nota que los aportes continuos de MO han tenido un efecto fuerte sobre la actividad biológica y eso ha mermado las diferencias de valor de la fertilidad biológica entre las muestras M1 a M4, en comparación con las diferencias de valor de la figura 7. De otro lado, a pesar de que las prácticas de regeneración del suelo han sido de menor intensidad en M5 y M6, se ha logrado mejorar levemente la actividad biológica, y por lo tanto la fertilidad biológica.

Para mejorar la tasa de MO, los aportes iniciales y los ciclos de abono verde han sido los factores determinantes. Mientras que para mejorar la actividad biológica las prácticas continuas de manejo del suelo han sido más determinantes.

ii. Evolución de la fertilidad física

Ahora se va a interpretar los datos de la fertilidad física del suelo a partir de la tabla 15:

Concepto	Indicador	Variable	Unidad	Fuente /Laboratorio	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Puntaje Ponderado
Fertilidad Física	Calidad de la estructura	% MO / % Arcilla	%	WARD; INIAP	5	5	4	4	2	3	42
	Estructura Cromatografía	Nivel de calidad de la estructura	Puntos	CESA	5	4	3	3	2	1	33
Subtotal fertilidad física					10	9	7	7	4	4	75
% PMP					100	90	70	70	40	40	68

Tabla 15. Interpretación de los indicadores del concepto de fertilidad física en 2021. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de los laboratorios Ward, INIAP y CESA.

Calidad de la estructura

Para el primer indicador de la tabla, se ha tomado 17,5% como valor de la tasa de arcilla⁴². Podemos constatar que la calidad de la estructura de M1 llega a un valor de 40% (figura 17), lo que según Johannes y Boivin (2019), denota una excelente calidad de estructura de suelo por estar encima del umbral de 24%. Mientras tanto, M3 y M4 tienen una buena calidad estructura de suelo con un 20% aproximadamente. M5 y M6 tienen 13 y 11% de calificación respectivamente. Estos valores reflejan una mala calidad de la estructura del suelo⁴³, un suelo degradado.

⁴² Este valor corresponde al promedio de los valores de los análisis del INIAP en 2017 (15%) y al promedio de los valores de Agrobiolab en 2021 (20%); entre estos dos valores se calculó un promedio.

⁴³ Referirse a la tabla 12 (fertilidad física, calidad de la estructura) para la interpretación de aquel indicador.

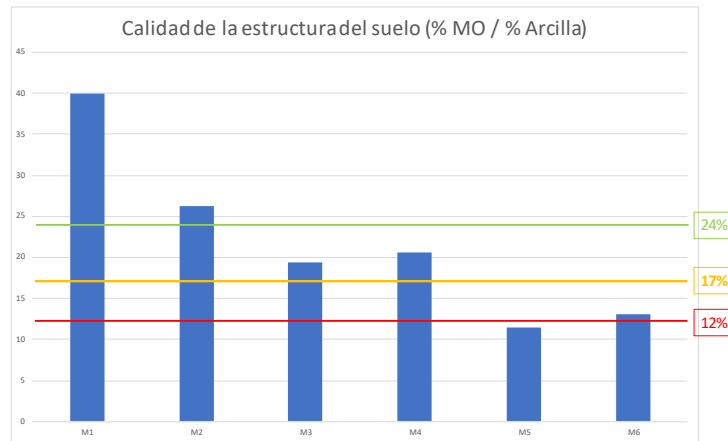


Figura 15. Calidad de la estructura del suelo (2021). Fuente: elaboración propia a partir de los datos de Ward, INIAP y Agrobiolab.

Los resultados de la cromatografía muestran la misma tendencia, aunque destacan una diferencia más pronunciada en la calidad de la estructura entre M1 (5 puntos) y M2 (4 puntos) (tabla 15). De igual forma que con el anterior indicador, M3 y M4 tienen una estructura de menor calidad. M5 y M6 tienen valores (13 y 11%) que indican una mala calidad de estructura, un suelo muy compactado y desestructurado debido, en el caso de las prácticas agrícolas, a un uso inadecuado de maquinaria agrícola desde hace tres décadas y a la aplicación de pesticidas y fertilizantes de síntesis. Aquellos valores son similares a los del 2017 (14%), así que la calidad de la estructura no ha mejorado en las parcelas que corresponden a M5 y M6.

Para el concepto de fertilidad física en 2021 se ha obtenido 70% del PMP (Figura 18) contra 50% en 2017 (Tabla 13), lo que representa una mejora significativa para estos indicadores claves de la salud del suelo. No se ha realizado la prueba de resistencia a la penetración en 2021, lo que si se hizo en 2020. Según las observaciones de campo⁴⁴, es probable que si este indicador hubiese sido incorporado en 2021 el % del PMP de la fertilidad física en las parcelas de M1 a M4 hubiese sido más alto aún.



Figura 16. Porcentaje del puntaje máximo posible para la fertilidad física 2021. Fuente: elaboración propia.

En la figura 18, a diferencia de los resultados de la fertilidad biológica del 2021 (Figura 16) donde M1 se destaca de las otras muestras, en términos de fertilidad física tanto M1 como M2 se destacan con

⁴⁴En estas parcelas después de los tres años de regeneración del suelo, se podía penetrar el suelo entre 50-70 cm sin dificultad

resultados de 100 y 90% para el % PMP. En las parcelas M3 y M4, el promedio es de 70% del PMP, un 30% más que M5 y M6 que puntuaron con 40%.

Si hacemos un promedio del %PMP de las parcelas intervenidas durante el proyecto (M1 a M4) obtenemos un valor de 82,5% del PMP, esto es más del doble del promedio de M5 y M6. Este resultado refleja el efecto del esfuerzo de regeneración del suelo del SEICAS.

Es difícil identificar cuál de los dos tipos de aportes (iniciales o continuos) de MO ha sido más determinante para mejorar la fertilidad física. Las diferencias entre los valores de % PMP M1 a M4 son significativamente menos marcadas que en el gráfico “MO aportada de forma inicial”. A partir de este dato se puede interpretar que los aportes continuos de MO han contribuido a mejorar la fertilidad física del suelo por lo menos al mismo nivel que los aportes iniciales.

De un lado la calidad de la estructura es proporcional a la tasa de MO así que los aportes de MO iniciales han automática y fuertemente influenciado este indicador. De otro lado, la porosidad es una característica clave de la calidad de la estructura del suelo y se construye gracias a la presencia de MO y a la actividad biológica. En este sentido, las prácticas agroecológicas (aportes continuos de MO) han favorecido el mejoramiento de la fertilidad física, en particular las coberturas vegetales vivas y/o muertas que había en permanencia en las parcelas correspondientes a M1 a M4. Limitan la compactación y protegen los organismos del suelo de los eventos climáticos. En el caso de una cobertura viva, las raíces de las plantas cumplen la función de estructurar físicamente el suelo.

La porosidad del suelo permite los flujos de gases y de agua entre otras funciones. Son los microorganismos del suelo que alimentan las plantas y una de las dos maneras que tienen para hacerlo es vía la oxidación de minerales. Ella depende directamente de la disponibilidad de oxígeno en los primeros 20-30cm de suelo. Se entiende entonces la importancia de la calidad de la estructura del suelo para la nutrición de las plantas. Si el oxígeno no puede circular adecuadamente, aquella oxidación será afectada y de igual manera la nutrición de las plantas y su salud. Se entiende que la fertilidad biológica influencia la fertilidad física que influencia a su vez la fertilidad química, que se va a analizar ahora.

Al igual que para la fertilidad biológica, el nivel de la fertilidad física para las parcelas M5 y M6 es parecido al que tenía el suelo antes de la intervención del SEICAS.

iii. Evolución de la fertilidad Química

Concepto	Indicador	Variable	Unidad	Fuente /Laboratorio	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Puntaje Ponderado
Fertilidad Química	pH	Nivel de pH del suelo	Puntos de 2 a 14	Agrobiolab; WARD	5	5	5	5	5	5	11
	CICE	Nivel de CICE	meq/100mL	Agrobiolab	4	4	3	3	2	2	7
	WEOC (Carbono Orgánico en solución)	Cantidad de carbono orgánico en la solución del suelo	ppm de C	WARD	4	3	3	4	2	2	7
	WEON (Nitrógeno Orgánico en solución)	Cantidad de nitrógeno orgánico en la solución del suelo	ppm de N	WARD	3	2	2	3	2	2	5
	NO3-	Cantidad de NO3-	ppm	WARD	5	2	2	3	1	1	5
	NH4+ (Amonio)	Cantidad de NH4+	ppm	Agrobiolab	5	4	3	3	2	2	7
	Fertilidad bioquímica Cromatografía	Cantidad de minerales y su integración a la parte orgánica del suelo	Puntos de 1 a 5	CESA	4	4	3	2	2	1	6
Subtotal Fertilidad Química					30	24	21	23	16	15	49
% PMP					86	69	60	66	46	43	61

Tabla 16. Interpretación de los indicadores del concepto de fertilidad química en 2021. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de los laboratorios Ward, Agrobiolab y CESA.

El indicador **pH** está en el rango óptimo para la agricultura en todas las muestras. En 2017, el pH promedio de las parcelas analizadas llegaba a 6,5 que es el límite inferior del rango óptimo. Este indicador no es discriminante para evaluar la evolución de la salud del suelo en este caso.

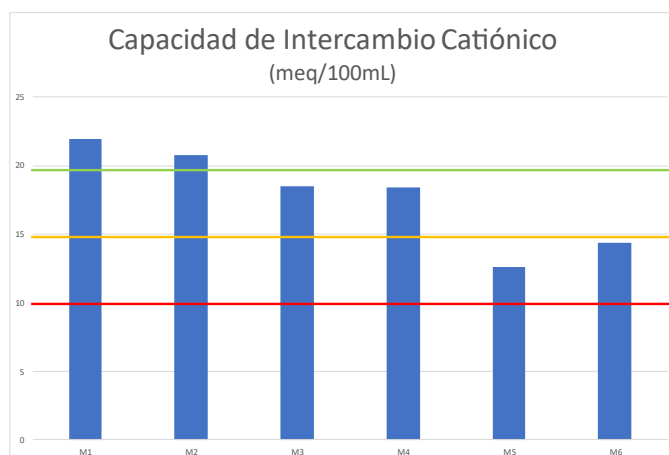


Figura 17. Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva, 2021. Fuente: elaboración propia a partir de los análisis de Agrobiolab.

En cuanto a la **CICE**, las parcelas M1 y M2 presentan una calificación buena (respectivamente 22 y 20,8 meq/100mL); mientras en las parcelas M3 y M4 tienen una CICE catalogada como media, aproximadamente 18 meq/100mL. Las parcelas menos intervenidas M5 y M6 tienen una CICE entre y baja CICE (debajo de los 15 meq/100mL) debido al tipo de suelo de la finca. En un suelo franco arenoso, como es el caso aquí, los cationes están retenidos e intercambiados casi solamente gracias a la MO del suelo, en particular de los ácidos fúlvicos y húmicos (con carga negativa). Así que en el caso de la finca La Esperanza, la CICE es función, casi exclusivamente, de la tasa de MO. Eso explica los valores más altos de M1 y M2 donde el SEICAS ha incorporado mayores cantidades de MO en comparación con el resto de las parcelas. De igual forma explica la mejor CICE de M3 y M4 en comparación con M5 y M6.

Dado que la CICE aquí es función de la tasa de MO se hubiese esperado tener una diferencia más marcada de M1 con las otras muestras⁴⁵. Por ello, se interpreta que los aportes continuos de MO y las prácticas agroecológicas en general han matizado la diferencia de CICE con las otras muestras. La actividad biológica ha sido incrementada por aquellas prácticas y eso ha favorecido la transformación de la materia seca en humus (que tiene una CICE 10 a 40 veces superior a la arcilla).

Entre más alta es la CICE, más limitada va a ser la lixiviación de minerales y más posibilidades de acceso a nutrientes va a tener la planta, en particular a los cationes: potasio, amonio, magnesio, calcio, manganeso, sodio, hierro, zinc y cobre. Por ello es el indicador más importante de la fertilidad química.

El indicador **Carbono orgánico en la solución del suelo (WEOC)** está directamente vinculado a la tasa de MO; sin embargo, en este caso se nota un comportamiento diferente al gráfico de la MO aportada de forma inicial (Figura 7). La guía de interpretación de la prueba Haney (Ward Laboratories) afirma que “esta variable refleja más la calidad que la cantidad de MO presente en el suelo. Representa la comida lista, disponible para los microbios (verlo como los carbohidratos en la alimentación microbiana)”.

⁴⁵ Aunque ser función no quiere decir ser proporcional.

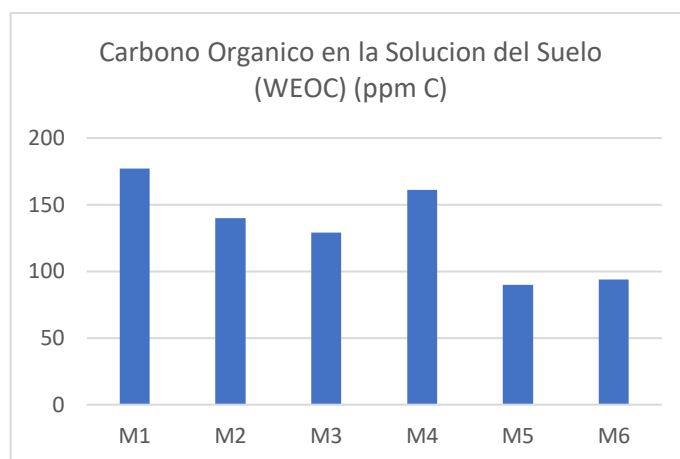


Figura 18. Cantidad de carbono orgánico presente en la solución del suelo (WEOC) (ppm C). Fuente: elaboración propia a partir de los análisis de suelo de Ward Laboratories.

Se puede suponer que, en el invernadero, donde se encuentra M1 ocurre una alta mineralización por el microclima presente y una biomasa microbiana importante. Eso deja poco carbono orgánico disponible en el suelo. Según Ward, la mayoría de los suelos está entre 100 y 300 ppm. La aplicación de MO (bocashi, cobertura vegetal etc.) tiende a incrementar el WEOC. Eso explica porque M2, 3 y 4 tienen valores cercanos a M1 a pesar de la gran diferencia de cantidad de MO incorporada inicialmente. Ahí vemos el impacto del manejo agroecológico del día a día. También vale destacar que en los 2 últimos meses del proyecto no se aplicó paja ni bocashi. Podemos interpretar que la alta biomasa microbiana del invernadero ha consumido parcialmente el stock de carbono presente en el suelo durante este tiempo, más que en M2, 3 y 4. En M4, probablemente los 4,5 ciclos de abono verde han generado esta diferencia de valor, gracias a la rizodeposición y a la incorporación del carbono constituyente de aquellas plantas.

Para evaluar **el nitrógeno orgánico e inorgánico** del suelo se va a analizar los indicadores siguientes: “nitrógeno orgánico del suelo”; “nitrato (NO₃-)”; “amonio (NH₄+)”.

El gráfico del **nitrógeno orgánico** de la solución del suelo (WEON; Figura 23) es muy similar al gráfico del WEOC (Figura 22). Según Ward, usualmente los suelos tienen un WEON de 10-30ppm (30ppm= 70 UN⁴⁶/ha). Los valores de las parcelas que van de M1 a M4 son más altos que los de M5 y M6. Se entiende que las prácticas agroecológicas aplicadas con más intensidad en M1 a M4 han producido más N orgánico. Sin embargo, igual que en el WEOC, la diferencia de valor es muy leve entre M1 y M2-3-4; lo que deja pensar que los valores dependen más del manejo continuo que de los aportes iniciales de MO.

⁴⁶ Unidad de nitrógeno.

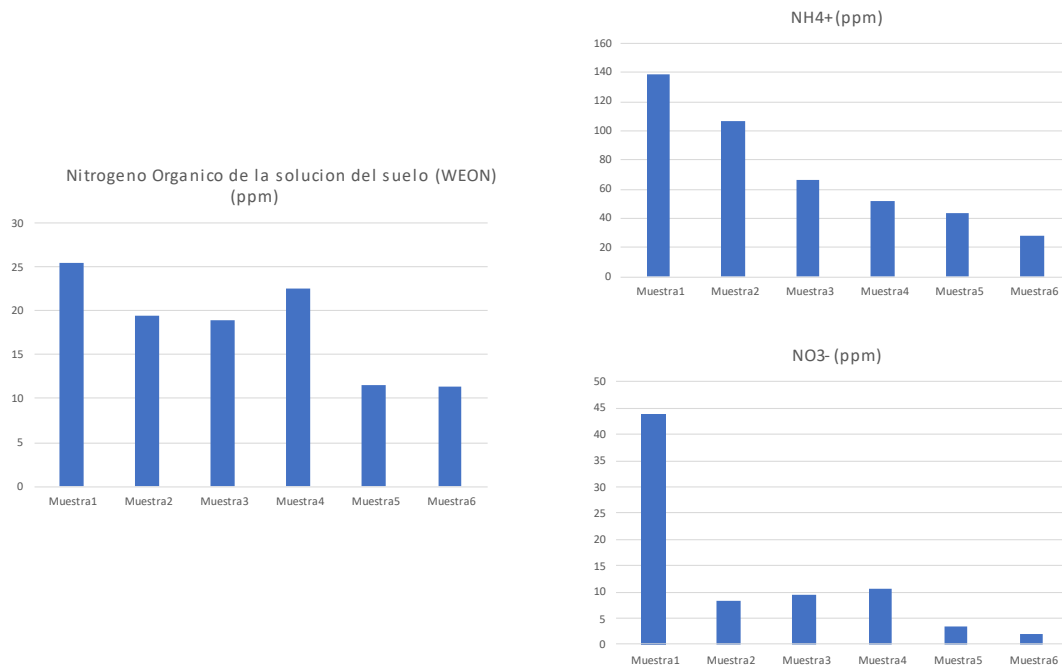


Figura 19. Izquierda: Nitrógeno orgánico de la solución del suelo (Ward). Derecha arriba: Cantidad de amonio del suelo (Agrobiolab). Derecha abajo: Cantidad de nitrato del suelo (Ward). Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de análisis de Ward y Agrobiolab.

El gráfico del **amonio (NH4+)** se parece al gráfico de la “MO aportada al suelo en total” (Figura 12), que representa la suma de los dos tipos de aportes de MO. A partir de ello se puede interpretar que los dos tipos de aportes de MO han tenido un efecto similar sobre la cantidad de amonio disponible en el suelo.

En el caso del **nitrato**, el valor más alto de M1 en comparación con las otras muestras puede ser debido a: la frecuencia de fumigaciones de ciertos biofertilizantes y/o al hecho que el riego sea solo por goteo en esta parcela (invernadero), es decir un riego localizado y a la calidad del agua de riego del canal del Pisque⁴⁷. El hecho que sea una parcela bajo invernadero hace que no exista el aporte de agua de lluvia que es de mejor calidad y es menos cargada en nitrato. Sin embargo, el valor de 44 ppm de nitrato de M1 no es muy alto. Corresponde a 102 unidades de nitrógeno por hectárea (UN/ha) y para la mayoría de los cultivos se necesita 150 a 250 UN/ha. Por lo tanto, todas las parcelas presentan poca presencia de nitrato.

La fertilidad bioquímica en la cromatografía se interpreta a través del tamaño de la zona interna y su grado de integración con la zona intermedia. Una mayor o menor integración es el reflejo de la actividad biológica que permite por un lado la formación del complejo arcilloso-húmico, y por otro que los minerales del suelo estén siendo solubilizados.

La muestra de la parcela M1 se demarca de las otras muestras por su nivel de integración superior. Le sigue de cerca M2 con un muy buen nivel de integración. M3 y M4 tienen un nivel menor de integración y en M5 y M6 el nivel de compactación y la escasa actividad biológica no permiten una mineralización eficiente, así haya presencia de minerales en el suelo.

⁴⁷ El agua de este canal de riego puede contener a veces un exceso de nitrato por la fertilización de síntesis aplicada por los usuarios.

La combinación del comportamiento de todos los indicadores analizados nos proporciona el %PMP para la fertilidad química del suelo. En el 2017, el porcentaje del PMP de la fertilidad química era de 70%. Eso gracias a un pH muy bueno y a una cantidad de amonio media. Con solamente estos 2 indicadores el resultado no provee una información comparable con el % PMP del 2021 que contiene 7 indicadores, resultados que provienen de 3 laboratorios con aproximaciones y técnicas diferentes. Por ello es preferible comparar el promedio de M5 y M6 con los resultados de M1 a M4.

El gráfico del % PMP de la fertilidad química es muy similar al del %PMP de la fertilidad biológica. Sin embargo, existe una diferencia menos marcada entre M5, M6 y las otras muestras. Eso se debe al valor de pH muy bueno que tienen todas las muestras. Como mencionado anteriormente el pH, a pesar de ser un indicador agrícola muy importante, es una característica más estática e inherente al tipo de suelo y al clima, y no depende tanto de las prácticas agrícolas.

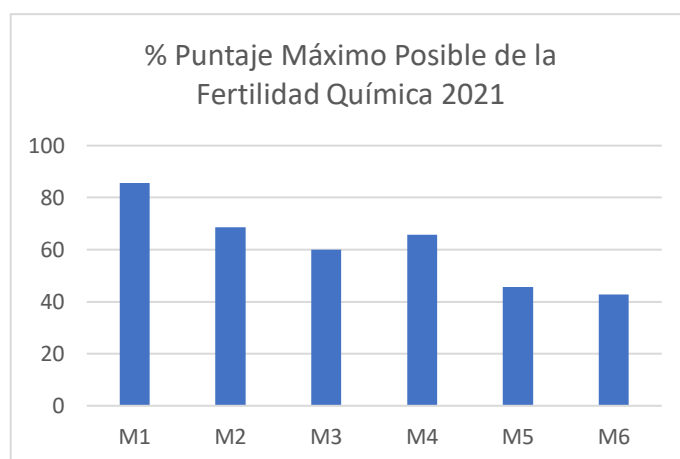


Figura 20. Porcentaje del puntaje máximo posible para la fertilidad química 2021. Fuente: elaboración propia.

Respecto a los efectos de los diferentes esfuerzos agronómicos aplicados, la poca diferencia entre los valores de M1 a M4 y la interpretación por indicador sugiere que las prácticas continuas agroecológicas han tenido un impacto un poco más importante que los aportes iniciales de MO sobre la fertilidad química del suelo.

iv. Fertilidad Multidimensional

A continuación, se analiza indicadores que combinan varios indicadores de la salud del suelo que proveen una mirada multidimensional de la fertilidad.

Concepto	Indicador	Variable	Unidad	Fuente /Laboratorio	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Puntaje Ponderado
Fertilidad Multidimensional	Salud del Suelo Haney Test	Puntaje del nivel de salud del suelo	Puntos de 1 a 5	WARD	4	2	2	2	1	1	21
	Salud del Suelo Cromatografía	Puntaje de nivel de salud del suelo	Puntos de 1 a 5	CESA	4	4	3	3	2	1	30
	Rendimiento	Nivel de Rendimiento	Puntos de 1 a 5	Coordinación SEICAS	5	4	2	3	2	1	30
Subtotal Fertilidad Multidimensional					13	10	7	8	5	3	81
% PMP					87	67	47	53	33	20	51

Tabla 17. Interpretación de los indicadores del concepto de fertilidad multidimensional (2021). Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de Ward, CESA y SEICAS.

El indicador **Salud del suelo (Haney Test)**, se calcula a partir de: la respiración del suelo, el WEOC y el WEON. En el caso de M1 es muy buena y más alta que el resto de las muestras (Tabla 17). Como ya se ha hecho la interpretación de los 3 indicadores que componen este último, se puede referir a aquellas

interpretaciones para entender aquellos valores. Sin embargo, en la guía de interpretación de Ward (Anexo 9), se afirma que el tipo de suelo tiene una fuerte influencia sobre este indicador, y en el caso de un suelo franco arenoso se podría interpretar los valores reportados como más altos de lo que son.

La **Salud del suelo cromatografía**, globalmente las cromatografías realizadas indican que M1 y M2 tienen una muy buena salud del suelo lo que coincide con los aportes de MO más importantes realizados en un inicio. Las parcelas correspondientes a M3 y M4, han recibido menos MO inicialmente y tienen un nivel regular de salud del suelo. En cambio, M5 y M6 aparecen en los cromas como suelos compactados con poca MO y poca actividad biológica, lo que se traduce en una salud del suelo baja.

Los **Rendimientos**, en las observaciones semanales del equipo SEICAS de los rendimientos de las diferentes parcelas, llevaron a establecer la calificación correspondiente. Esta clasificación refleja la tendencia global observada en los resultados de los 3 tipos de fertilidad analizados.

Vale mencionar que la calidad organoléptica de los productos no ha sido utilizada como indicador para contestar a la pregunta directriz. Sin embargo, se quiere valorar este criterio de evaluación. La calidad organoléptica (intensidad del color, textura, olor y sabor) es función de la salud del suelo. Es decir, solo un suelo que contiene la cantidad y diversidad de nutrientes adecuada y en una forma accesible para las plantas y su sistema radicular va a poder generar una alta calidad organoléptica. Los alimentos producidos en el invernadero (M1) y en las parcelas correspondientes de M2 a M4⁴⁸, todos tenían un nivel de calidad organoléptica muy alto, según profesionales de la alimentación (chefs gastronómicos de Quito), a quienes el SEICAS comercializaba sus productos.

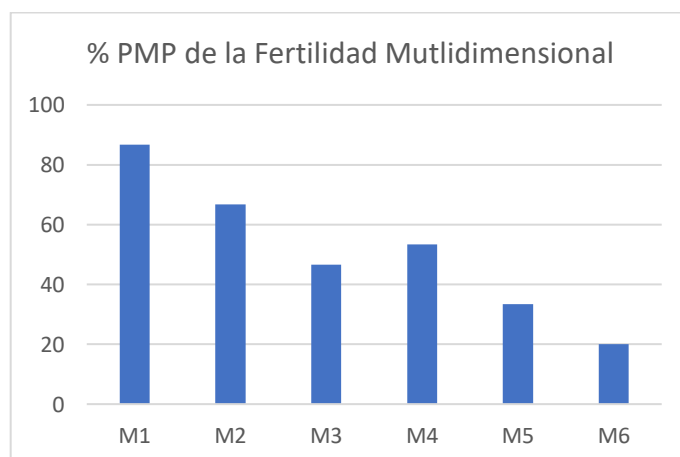
“Son los mejores productos del Ecuador.”

Chef Jérôme Monteillet, Restaurante *Chez Jérôme*.

“Es un gusto y un honor trabajar con sus ingredientes. Estamos 100% felices!”

Chef Juan Sebastián Pérez, Restaurante *Quitú*.

No se ha utilizado estos datos cualitativos porque no se han observado mayores diferencias entre las diferentes parcelas (a parte del tamaño de los productos que se refleja en la variable rendimientos).



⁴⁸ En las parcelas que corresponden a M5 y M6 no ha habido producción de alimentos para el consumo.

Figura 21. Porcentaje de PMP de la fertilidad multidimensional. Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de WARD, CESA y SEICAS.

La figura 23 confirma la tendencia analizada con el indicador “rendimientos”. A continuación, se va a evaluar la eficiencia agronómica de las prácticas de regeneración del suelo aplicadas por el SEICAS.

D. Eficiencia agronómica de las prácticas de regeneración del suelo

En la figura 24 se puede comparar los porcentajes del PMP de los 4 tipos de fertilidades analizados que reúnen todos los indicadores del presente trabajo, y el porcentaje del PMP total. Se puede destacar que M5 y M6 tienen un promedio de 38,5% del PMP total. Es interesante comparar este valor con los de las parcelas de la M1 a la M4 y se puede interpretar que puntos adicionales al 38,5% del PMP total mencionado, son debidos a las prácticas de regeneración del suelo implementadas por el SEICAS.

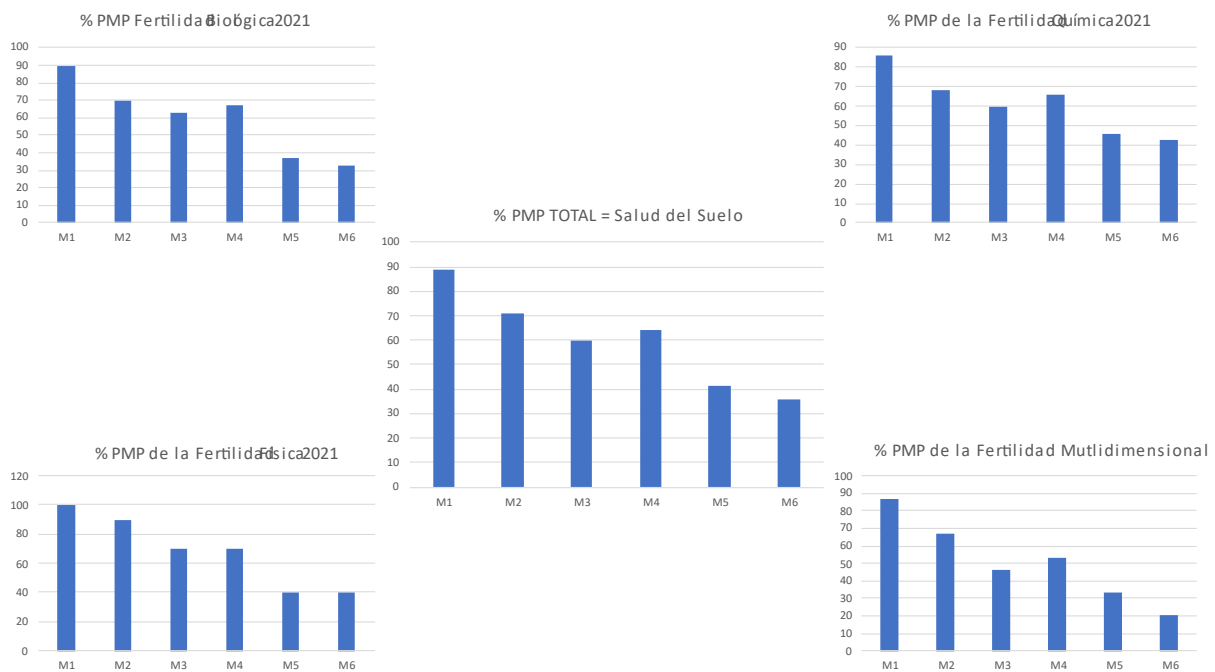


Figura 22. Síntesis de los gráficos del % PMP de los diferentes tipos de fertilidad del suelo analizados y del % PMP total. Fuente: elaboración propia a partir de los datos del SEICAS, INIAP, Ward, UCE y Agrobiolab.

M1 se demarca con 89% del PMP total (+50,5% que el 38,5% promedio de M5 y M6) gracias a los aportes iniciales de MO masivos realizados. Es por la misma razón que M2 sigue a M1 con 71% del PMP (+32,5%). Después, viene M4 con 64% (+25,5%) que supera a M3 60% (+21,5%). En los 5 gráficos de la figura 24, se destaca un mismo patrón de comportamiento, ya analizado anteriormente, con leves matices. Pero globalmente se observa una calidad del suelo, en el 2021, decreciente de M1 hacia M6.

A continuación (Figura 25), se resalta la fuerte correlación entre la tasa de MO en 2021 y el % del PMP total:

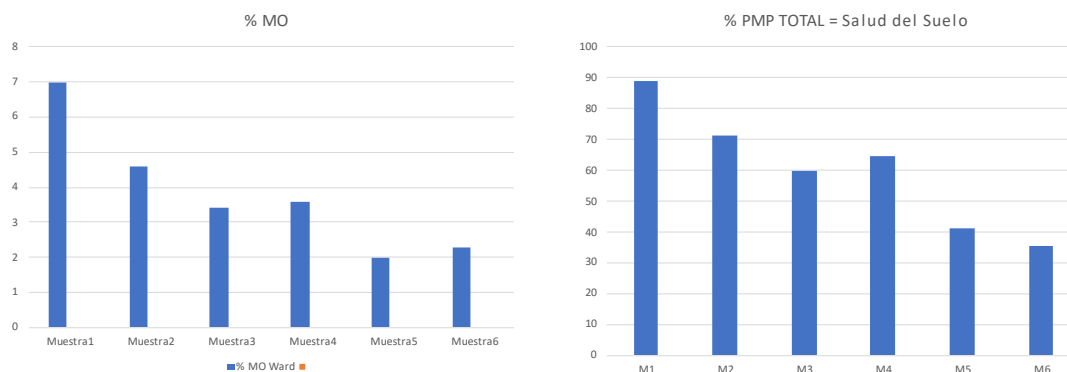


Figura 23. Correlación entre el % MO y el % del PMP total de la salud del suelo. Fuente: elaboración propia.

Esta fuerte correlación confirma que la tasa de MO del suelo es el factor más importante de la salud del suelo de igual forma que el uso del suelo, es decir las prácticas agrícolas. Las del SEICAS han sido agroecológicas y han permitido estimular la actividad biológica, que constituye el otro factor más importante de la salud del suelo.

Ahora, para evaluar la eficiencia agronómica de las prácticas de regeneración de la salud del suelo, dado la importancia demostrada de la influencia del indicador % MO, se va a tomar como referencia su evolución, en función los aportes de MO realizados. Es decir que se analiza la cantidad de MO que se ha necesitado aportar para ganar 1% de MO (Figura 26). Se divide la MO aportada en total para el número de por cientos (o puntos) de MO ganados entre 2017 y 2021, para cada muestra.

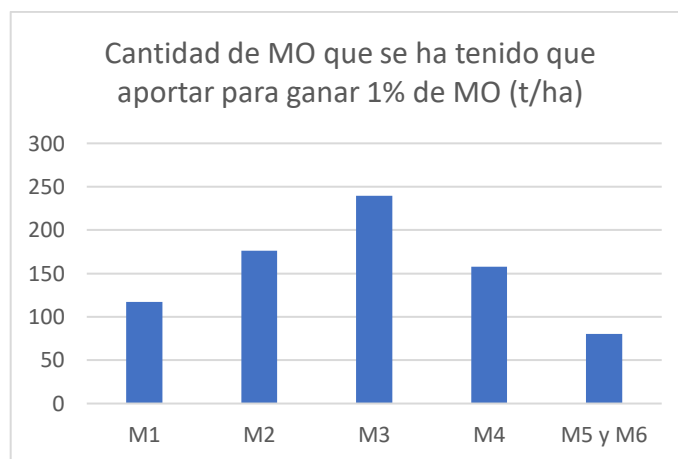


Figura 24. Cantidad de MO que se ha tenido que aportar para ganar 1% de MO. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de SEICAS, Ward e INIAP.

La figura 26 indica que para M1 se ha tenido que aportar, en total, **117 t/ha para ganar 1% de MO**. Es menos que en M2, donde se ha realizado un aporte inicial importante de MO (154 t/ha); se ha necesitado 176 t/ha por punto de MO ganado. En M3 donde el aporte inicial fue menor (57 t/ha), se ha necesitado 239 t/ha por punto de MO adicional. Es interesante notar que en M4 se ha necesitado aportar 34% menos MO que en M3 para ganar 1% de MO. Se explica por la mayor cantidad de pollinaza incorporada y porque M4 ha tenido 2 ciclos más de abono verde que M3 antes de empezar con la producción de cultivos comerciales. Aquellos ciclos de abono verde tomaron aproximadamente 7 meses. Es decir que las parcelas correspondientes a M4 han tenido más tiempo en abono verde que el resto de las parcelas. En cambio, han recibido menos MO proveniente de los aportes continuos. El

resultado de M4 podría ser debido a los ciclos de abono verde que han aportado más MO que lo que se ha estimado. En particular, la biomasa radicular y la cantidad de MO proveniente de la rhizodeposición del abono verde pueden haber sido mayor a lo estimado.

N° de Muestra	Tiempo entre el inicio del proceso de regeneración y la entrada en producción ⁴⁹ (mes)
M1	3
M2	3
M3	7
M4	10,5

Tabla 18. Duración del proceso inicial de regeneración del suelo de las parcelas correspondientes a M1 a M4. Fuente: elaboración propia.

Un productor necesita optimizar sus prácticas de regeneración del suelo en términos de cantidad de MO aportada (por el costo que representa), y en términos de tiempo también para que el proceso de regeneración no le impida producir y comercializar por un tiempo que vaya a poner en peligro su sostenibilidad económica. Por ello, la evaluación de la eficiencia agronómica de las prácticas aplicadas en M1 a M6, considera los resultados del % PMP total, de la figura 26 y las de la tabla 18.

En este contexto, los itinerarios los más eficientes son, en primer lugar, el de M1 y en segundo lugar el de M2, porque se ha empezado a cultivar hortalizas 3 meses después de haber iniciado el proceso de regeneración del suelo. En M3 se ha necesitado aportar más MO que en M4 para ganar 1% de MO. En las parcelas correspondientes a M3 se ha empezado la producción 3,5 meses antes que en M4. Una duración que equivale a un ciclo productivo de cultivos de ciclo corto. Pero M3 tiene un nivel de salud del suelo total inferior a M4 por lo que se considera más eficientes agronómicamente las prácticas de regeneración implementadas en M4 en comparación con M3.

Los resultados de M5 y M6 indican que se ha tenido que aportar 80 t/ha de MO para ganar 1%. A pesar de que se haya necesitado aportar menos MO para mejorar de 1% el contenido de MO. Ahí el proceso de regeneración de la calidad del suelo ha sido más paulatino y exclusivamente a través de incorporación de barbecho y restos de cultivos⁵⁰. El porcentaje de MO ha sido mejorado de 0,2 % en 2,5 años. Además, la tasa de MO sigue en 2%, un valor bajo que genera una calidad de suelo muy débil. Por ello, se considera baja la eficiencia agronómica de las prácticas implementadas por el SEICAS en estas parcelas.

Estos resultados nos permiten concluir que los factores que favorecen la eficiencia agronómica en términos de mejoramiento de la tasa de MO son: en primer lugar, los aportes masivos iniciales de MO⁵¹ y en segundo lugar que entre más importante y concentrado en el tiempo se hace el aporte de MO, más eficiente se vuelve una evolución positiva de la tasa de MO. Quiere decir que es más recomendable realizar un aporte de MO importante de golpe en lugar de aportar la misma cantidad de forma espaciada en el tiempo. Vale destacar que con aproximadamente 120 t/ha o 12 kg/m² incorporada (con rastra) al suelo de golpe se puede ganar 1% de MO⁵².

⁴⁹ Se toma como fecha de inicio del proceso de regeneración del suelo el mes de octubre del 2018. Se toma como fecha de entrada en producción cuando se ha empezado a sembrar y/o transplantar cultivos comerciales. No se toma en cuenta M5 y M6 en la tabla porque no se ha producido cultivos comerciales.

⁵⁰ A parte de la aplicación de microorganismos y biofertilizantes a través del riego.

⁵¹ Es importante que el aporte de MO sea compuesto de una mezcla equilibrada de insumos, en términos de relación carbono nitrógeno, para no generar una carencia de nitrógeno después de la incorporación ni tampoco favorecer solamente la flora bacteriana con aportes muy altos en nitrógeno (ej.: estiércol).

⁵² Es importante decir que este resultado es posible con los tipos y cantidades respectivas de MO aportados. Estos tipos de MO podrían ser sustituidos por otros, y obtener el mismo resultado, siempre y cuando se respete la relación carbono-nitrógeno de cada uno.

Después de haber analizado la eficiencia agronómica, se analiza la eficiencia económica de las diferentes prácticas de regeneración del suelo implementadas por el SEICAS.

E. Eficiencia económica de las prácticas de regeneración de la salud del suelo

Ahora que se ha puesto en evidencia que la eficiencia agronómica de los aportes masivos iniciales es mayor a la de los aportes continuos, se va a analizar cuales prácticas han tenido la mejor relación costo-resultado en el tiempo del proyecto SEICAS; es decir la mejor eficiencia económica.

Una de las metas de este trabajo es poder servir de referencia técnico-científica para los actores del mundo agrícola en general y en particular para la agricultura familiar campesina. Muchas veces, los recursos económicos representan el mayor obstáculo al momento de empezar una transición del modelo convencional a la agroecología. Es necesario sistematizar y analizar los costos de aquellas prácticas con el fin de poder acompañar de la mejor manera posible estas transiciones, optimizando los costos (en coherencia con la aproximación agronómica).



Figura 25. 1 y 2.: costos de los aportes de MO iniciales y de forma continua (abajo). 3.: costo total del proceso de aporte de MO al suelo. 4.: costo por hectárea para incrementar de 1% la tasa de MO por año. Fuente: elaboración propia a partir de los datos del SEICAS, INIAP y Ward.

La figura 27 demuestra que la inversión económica en prácticas de regeneración y conservación del suelo ha sido decreciente de M1 a M6. Los valores de la figura 27 en USD/ha extrapolan lo invertido en la superficie efectiva de las parcelas. Es decir que no se toma en cuenta los caminos entre las camas ni alrededor de los bloques. Es una precisión de alta importancia porque **la superficie efectiva es 40 a 50% inferior a la superficie total de las parcelas.**

La figura 27. 2 indica que, durante un periodo de 3 años, CESA ha invertido el equivalente de 85 659 USD/ha en las parcelas correspondientes a M1 (Anexo 1). En M2 se ha invertido 17% menos que en M1 (71 056 USD/ha), en M3 se ha invertido 20% menos que en M2 (57 111 USD/ha), en M4 se ha invertido 33% menos que en M3 (38 321 USD/ha). En M5 y M6 se ha invertido 1634 USD/ha, es decir 96% menos que en M4 y 98% menos que en M1.

En la figura 27. 4, se ha establecido la relación entre el equivalente del costo total del proceso de regeneración del suelo por hectárea, los porcentajes de MO ganados por muestra (en comparación con el 2017: promedio de 2,1 % MO) y el tiempo que cada parcela ha estado cultivada por el SEICAS. Para analizar la eficiencia económica de las prácticas realizadas, se interpreta: el % PMP total, la tabla 18, y la figura 27. 4.

El proceso de regeneración del suelo que ha tenido la mejor relación costo/resultados es M1. En M1 se ha necesitado el equivalente de 8 068 USD/ha por punto de MO ganado por año en cultivo. El segundo proceso más eficiente es M2. Se ha requerido 57% más inversión que en M1 (12 632 USD/ha/%MO/año). Sigue M4 con 20 438 USD/ha/%MO/año, es decir 153% de inversión más que M1. El proceso menos eficiente, de M1 a M4, es el de M3 con 21 966 USD/ha/%MO/año invertidos; ósea 172 % más que para M1.

Existe una relación inversamente proporcional⁵³ entre el costo total del proceso de aportes de MO (fig. 27. 2) y el costo por %MO y por año en cultivo (fig. 27. 4). El resultado de M1 indica que los aportes iniciales de cantidades importantes de MO fueron determinantes para incrementar la tasa de MO a menor costo y más rápidamente que si se aportase la misma cantidad de forma diluida en el tiempo (semanalmente en este caso) y/o en el espacio. Los resultados de M2, M3 y M4 confirman que, a menor inversión inicial, se requiere mayor inversión en total para el mismo resultado.

El resultado de M5 y M6 indica que a menor inversión menos costo total, pero con un mejoramiento de la tasa de MO insuficiente o ineficiente en el contexto de producción agrícola (0,087 %MO/año). La realidad del mundo agrícola, en la perspectiva de una transición a la agroecología, necesita que este proceso sea el más rápido posible. Aparece claramente el interés agronómico de los ciclos de abono verde y del barbecho, sin embargo, no se puede producir para la venta mientras aquellos procesos están ocupando el suelo.

A partir de estos resultados se puede estimar que estamos en el caso de la hipótesis defendida por algunos científicos, como el agroecólogo Olivier Husson (Centro de Cooperación Internacional y de Investigación para la Agricultura y el Desarrollo (CIRAD)), según el cual existe un umbral de MO o de carbono orgánico que hay que pasar para salir de un proceso de erosión del suelo y lograr su regeneración. La estimación de este umbral depende mucho del tipo de suelo (tasa de arcilla) y del clima. Todavía falta por investigar sobre el tema para definir precisamente estos umbrales, pero según O. Husson (2020), este umbral podría estar entre los 2 y 3% de carbono orgánico es decir 3,45 y 5,2% de MO del suelo. M3 y M4 están justo en los valores del límite inferior del umbral. M2 se ubica cerca del límite superior y M1 tiene una tasa de MO más elevada de 1,8 % que el límite superior del umbral. Eso puede explicar los rendimientos agrícolas significativamente más altos observados en estas parcelas (M1-M2), en comparación con las de M3 y M4; esto también puede contribuir a explicar que la eficiencia agronómica y económica sea mayor en M1 y M2.

Concentrar la cantidad de carbono o de MO incorporada al suelo por unidad de superficie (y no espolvorearla) favorece la superación de aquel umbral. Debajo de este umbral es el suelo que alimenta a la planta, pero la planta no alimenta al suelo porque no hay la productividad de biomasa suficiente para ello. Encima de este umbral, la planta alimenta al suelo y eso genera una retroacción positiva porque la microbiología del suelo se alimenta de los productos de la rizodeposición (provenientes de

⁵³ En el gráfico del costo total del proceso de aporte de MO, aparece que para M4 se ha gastado menos que para M3, pero si se pondera estos valores por el tiempo que las parcelas han sido cultivadas comercialmente por el SEICAS, resulta que se ha gastado más para M4 que para M3. Porque M3 (2 años) ha estado en cultivo más tiempo que M4 (1,25 años).



la fotosíntesis) y a su vez incrementa la mineralización que beneficia a la planta. Este funcionamiento del suelo, basado en la biología, en la relación planta-microbiota, permite cumplir con la triple exigencia de producir cantidad y calidad, de forma sostenible. Para alcanzar la sostenibilidad, es necesario tener una alta productividad y restituir al suelo la cantidad necesaria de biomasa para mantener la tasa de carbono orgánico encima del “umbral de sostenibilidad”.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo de sistematización ha permitido demostrar que el nivel de salud del suelo del predio antes de la entrada del SEICAS era muy bajo, con un alto nivel de degradación debido a las décadas de agricultura convencional con prácticas de preparación del suelo, fertilización y control de plagas y enfermedades que llevó a disminuir la actividad biológica, degradar la MO y compactar el suelo; como principales consecuencias.

Se ha podido demostrar que la salud del suelo del predio La Esperanza, a través de las prácticas implementadas por CESA y el SEICAS, ha mejorado de forma significativa y diferenciada, en las distintas parcelas analizadas. La intensidad de regeneración del suelo ha sido proporcional al esfuerzo agronómico y económico implementado. Se ha llegado a niveles de salud del suelo altos y muy altos en las parcelas con mayor inversión en prácticas de regeneración del suelo (M1: 89%; M2: 71%; M3: 60%; M4: 64% del PMP total).

La salud del suelo de M5 y M6 casi no ha mejorado (salvo por la actividad biológica). Eso lleva a concluir que los aportes de MO (y el manejo en general de aquellas parcelas) han sido insuficientes para lograr una regeneración significativa en las parcelas correspondientes a M5 y M6.

Los aportes iniciales de MO han influenciado fuertemente la tasa de MO y a su vez la influencia de este indicador sobre los otros indicadores de salud del suelo ha sido muy fuerte. De tal forma que se interpreta como el parámetro más eficiente para regenerar la salud del suelo, en este estudio.

Los aportes continuos de MO han permitido mantener y mejorar la salud del suelo. Han tenido un efecto más determinante que los aportes iniciales sobre el mejoramiento de la actividad biológica. Por ello, sus efectos sobre la salud del suelo han sido del mismo nivel de importancia que los aportes iniciales, pero con una eficiencia agronómica y económica menor en comparación con los aportes iniciales masivos realizados en M1 y M2.

En futuros estudios sobre la salud del suelo se recomienda analizar no solamente la cantidad de actividad biológica sino también la diversidad y la red de interacciones entre las comunidades microbiológicas. Según Lionel Ranjard (2021), ecólogo de suelos en el INRAe Dijon, la cantidad y la diversidad de microbiología son indicadores importantes de la salud del suelo, pero se necesita considerar sobre todo las conexiones e interacciones entre los microorganismos del suelo. Entre más compleja es la red microbiológica del suelo más estable, funcional y resiliente va a ser el suelo.

Entre más MO se va a aportar mejor van a ser los efectos sobre la calidad del suelo. Sin embargo, hay que respetar ciertos umbrales, tanto para llegar a un nivel de fertilidad que permita al suelo tener los recursos suficientes para cumplir con sus funciones, como para no agotar el suelo con una cantidad de MO que no sería capaz de biotransformar al ritmo necesario para mantener el equilibrio órgano-mineral deseado para lograr una nutrición adecuada de las plantas. La relación entre tasa de MO y tasa de arcilla constituye una referencia esencial en este sentido. A la luz de los resultados, se hubiese podido aportar menos MO en el invernadero (M1) sin perjuicio agronómico, y más bien con beneficios económicos.

Futuros estudios deberían relacionar con precisión la relación entre la evolución de la salud del suelo y de la productividad en biomasa (biomasa útil (cosechas) y biomasa en general), porque son temas sumamente importantes tanto agronómica como económicamente para los productores.

Las prácticas agroecológicas implementadas por el SEICAS (aportes continuos de MO) favorecen la conservación de la salud del suelo, y pueden mejorarla dependiendo de las cantidades de MO que se aportan de forma continua⁵⁴. Sin embargo, no permiten regenerar tan rápidamente un suelo con un alto nivel de degradación como los aportes masivos de MO y tienen una eficiencia económica menor. En el invernadero (M1), se ha demostrado que para ganar de 1% de MO ha costado 0,81 USD/m² o 8068 USD/ha, contra más de 2 USD/m² o 20 000 USD/ha en los bloques 3 a 6 (M3 y M4).

El presente trabajo aporta resultados que van en el sentido de la hipótesis de O. Husson (2019) según la cual intensificar el aporte de MO⁵⁵ en una superficie de suelo determinada, y en un lapso determinado de tiempo, de forma a pasar el “umbral de sostenibilidad”, vuelve más eficiente agronómica y económicamente la regeneración del suelo que si se aportase aquellas cantidades de MO de forma escalonada en el tiempo y más diluida en la superficie de suelo.

La inversión económica realizada por CESA para regenerar la salud del suelo de una parte del predio La Esperanza ha sido elevada y, por ello, aquella iniciativa no es reproducible por actores de la agricultura familiar campesina. Sin embargo, este estudio aporta elementos que ayudan en la toma de decisión en las estrategias de regeneración de suelos. Si un productor tiene 1 000 m² o 10 000 m², será más eficiente si invierte los recursos materiales y/o económicos que va a dedicar a la regeneración del suelo de tal manera a pasar el “umbral de sostenibilidad” en la superficie que va a regenerar. Es decir que, si sus recursos le permiten pasar este umbral solamente en el 10% de su parcela, va a ser más eficiente concentrar la incorporación de MO y las prácticas agroecológicas en los 10% que diluirlas en el 100% de la parcela. Y en el futuro regenerar otro 10 % etc. También se puede concentrar la MO aportada en el sillón o huacho donde se va a sembrar y no poner nada en los caminos.

En futuros estudios y proyectos, sería importante estudiar formas de optimizar la eficiencia económica del proceso de regeneración del suelo⁵⁶ (sin perjudicar la eficiencia agronómica), bajando los costos de inversión que representan los aportes de MO.

A parte de los aportes de MO los expertos de la agricultura regenerativa y sostenible coinciden en la necesidad de manejar los 4 principios y prácticas siguientes (en orden de prioridad):

- Limitar o (mejor) eliminar la labranza
- Cubrir el suelo (siempre) con coberturas vegetales vivas y/o muerta
- Incrementar la biodiversidad de los agroecosistemas
- Limitar o (mejor) eliminar el uso de pesticidas y fertilizantes de síntesis

Las condiciones actuales de erosión de los suelos de la agricultura familiar campesina (AFC) y su importancia para la soberanía alimentaria del Ecuador requieren una reacción urgente de los actores del mundo agrícola. Hoy en día, el productor que quiere pasar de un suelo erosionado a un suelo que supere aquel “umbral de sostenibilidad” necesita cambiar sus prácticas agrícolas y su relación con el ecosistema suelo, adquirir los conocimientos técnicos para hacerlo. Hoy en día, el productor es el único

⁵⁴ Si se aporta cantidades de MO (materia seca) que superan 25 t/ha/año y que contienen una mezcla equilibrada de fuentes de MO en términos de relación carbono-nitrógeno.

⁵⁵ Cantidades superiores a 100-150 t MS/ha, dependiendo de la tasa inicial de MO y de arcilla.

⁵⁶ Por ejemplo, utilizando menos fuentes de MO (pollinaza) e inoculación de microorganismos se estima que ganar 1% de MO podría costar 4 500 a 5 000 USD/ha y el proceso tomar 3 meses.



actor de la sociedad que asume la totalidad de los riesgos económicos y sociotécnicos que representa este cambio. La falta de recursos económicos y en ciertos casos cognitivos de los actores de la AFC para invertir en la regeneración de sus suelos lleva a la conclusión que se necesita apoyo desde actores externos, en particular estatales, como el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y el Ministerio del Agua, Ambiente y de la Transición Ecológica (MAATE); así como los gobiernos autónomos descentralizados (GADs). Se necesita que instituciones fomenten la formación y la asistencia técnica en agroecología y asuman la mayor parte del riesgo económico que comporta el proceso de transición. La vida en el planeta depende de la vida y de la salud del suelo. Los servicios ecosistémicos⁵⁷ basados en el suelo son numerosos y vitales para toda la sociedad, en particular en el contexto actual de calentamiento global y de crecimiento de la población mundial (a un ritmo mayor que los siglos anteriores). Por ello, la problemática y el fuerte reto de regeneración y conservación de la salud de los suelos no es de la responsabilidad únicamente de los agricultores y ganaderos. Es un reto y una responsabilidad que deberían asumir todos los actores de la sociedad, desde el gobierno hasta los ciudadanos y consumidores ecuatorianos. Se tiene cada vez más conocimiento fundamental y aplicado sobre los procesos de regeneración de suelos. Ahora se necesita implementarlos a pequeña, mediana y gran escala, para que se pueda aprovechar el potencial de los servicios ecosistémicos basados en el suelo y a través de ello mejorar la soberanía alimentaria, la salud y sustentabilidad del país.

BIBLIOGRAFÍA

- Baldeón, 2021. Elaboración de la línea base del sistema de experimentación, investigación y capacitación en agroecología y salud (SEICAS), finca “La Esperanza de El Quinche-Ecuador y análisis reflexivo del desarrollo de las cuatro “S” de la vida en el periodo 2017 - 2020”; Universidad Andina Simón Bolívar-Ecuador; Programa Andina Ecosaludable; SEICAS.
- Bourguignon C. & L., 2008. Le sol, la terre et les champs, Editions Sang de la terre.
- Calvet, Chenu, Houot, 2021. Matières organiques des sols, 3^{ème} édition, Eds France Agricole.
- Carter, M.R., Gregorich, E.G., Anderson, D.W., Doran, J.W., Janzen, H.H., Pierce, F.J., 1997. Concepts of soil quality and their significance. In: Gregorich, E.G., Carter, M.R. (Eds.), *Developments in Soil Science*. Elsevier, pp. 1–19.
- E.K.Bünemann & al., Soil quality - A critical review, 2018, *Soil Biology and Biochemistry*, Volume 120, 105-125.
- Central Ecuatoriana de Servicios Agrícolas [CESA]. (2019). *Sistema experimental de investigación y capacitación en agroecología y salud (SEICAS). Proyecto “Centro de Producción y Capacitación en Agroecología”, Finca La Esperanza-El Quinche-Pichincha*.
- FAO, 2015. 70 ans de la FAO (1945-2015).
- FAO, 2019. Soporte a la toma de decisiones para la integración y ampliación del manejo sostenible de tierras (D-SLM).

⁵⁷ Producción de biomasa (alimentos, medicamentos, materiales de construcción, materia prima para la industria textil etc.), conservación de la biodiversidad, control de la erosión, control de plagas y enfermedades, provisión y calidad del agua, regulación del clima (E.K. Bünemann & al., 2018).



- FAO, 2011. El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma, y Mundi-Prensa, Madrid.
- IPCC, 2021. The Intergovernmental Panel on Climate Change, Sixth Assessment Report.
- Johannes & al., 2019. Soil structure quality indicators and their limit values, Ecological indicators, Vol. 104, p. 686-694.
- Karlen, D. L., Ditzler, C. A., Andrews, S. S., 2003. Soil Quality: why and how? Geoderma 114, 145-156.
- Larson, W. E., Pierce, F.J., 1991. Conservation and enhancement of soil quality evaluation for sustainable land management in the developing world. In: IBSRAM Proceedings, No. 12 Vol. 2, Technical Papers, Bangkok, Thailand, pp. 175-203.
- MAG-ORSTOM, 1984 ; MAG, 1999 ; López, 2008 ; Morales et. al., 2010.
- Mylonas & Kopertis, 2020. Climate change and food security with emphasis on wheat, ISBN 978-0-12-819527-7.
- Pankhurst, C.E., Doube, B.M., Gupta, V.V.S.R., 1997. Biological indicators of soil health: synthesis. In: Pankhurst, C.E., Doube, B.M., Gupta, V.V.S.R. (Eds.), Biological Indicators of Soil Health. CAB International, Wallingford, Oxon, pp. 419–435.
- Parr, J.F., Papendick, R.I., Hornick, S.B., Meyer, R.E., 1992. Soil quality: attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. American Journal of Alternative Agriculture 7, 5–11.
- Pimental & al., 1995 Environmental and Economic Cost of Soil Erosion and Conservation Benefits, Science
- Ruellan, 2010. Des sols et des hommes, un lien menacé, IRD éditions, 106p.
- Restrepo y Pinheiro, 2011, Cromatografía, impresora Feriva, Cali.
- Selosse, L'origine du monde, Actes Sud, 2021.
- Suquilanda, 2008, Manejo agroecológico de suelos; Ministerio de Agricultura, Ganadería y Acuacultura y Pesca del Ecuador (MAGAP).
- Van Beilen, 2016. Effects of conventional and organic agriculture techniques on soil ecology, Centre for Development and Strategy, vol. 2016 n°1.
- Verdezoto, 2021. Línea base para el proceso de transformación de la finca “la Esperanza” de agricultura convencional a agricultura agroecológica en la parroquia Quinche, Pichincha; UCE-FAG.