



MOSOEX

materia orgánica - gestión sostenible

GRUPO OPERATIVO MOSOEX.

ACTIVIDAD 4. ESTABLECIMIENTO DE INDICADORES.

ÍNDICE.

1. Introducción

2. Indicadores

2.1. Indicador principal

2.2. Indicadores secundarios

2.2.1. Indicadores relacionados con la erosión del suelo

2.2.2. Indicadores para la evaluación del efecto en los GEI

2.2.2.1. Índices directos:

2.2.2.2. Índices indirectos:

2.2.3. Indicadores relacionados con el comportamiento físico del suelo

2.2.4. Indicadores relacionados con el comportamiento químico del suelo

2.2.5. Indicadores relacionados con la actividad biológica del suelo

2.2.6. Indicadores ambientales de la explotación

2.2.7. Indicadores en explotaciones en ecológico

2.3. Indicadores de implementación.

3. Bibliografía.





1. Introducción

La única manera de mejorar cualquier proceso se basa en la monitorización continua y el establecimiento de unos indicadores que arrojen cierta luz sobre la efectividad de dicha mejora.

El proyecto MOSOEX pretende establecer las bases que permitan gestionar los suelos agrícolas de manera más sostenible, con el objetivo final de mejorar el contenido en materia orgánica de los mismos, y con ello, los importantes servicios ecosistémicos que el suelo proporciona.

La investigación científica ha puesto de manifiesto que este proceso debe llevarse a cabo en un plazo de tiempo medio o largo, ya que la recuperación de los niveles de materia orgánica de un suelo agrícola, y por tanto de su salud, en un entorno de clima mediterráneo es un proceso largo.

Esto supone que el establecimiento de objetivos estratégicos no es suficiente. Es necesario establecer un sistema de control que nos permita saber si estos objetivos se van cumpliendo mediante el establecimiento de indicadores que nos aporten información interesante.

Hay que destacar que aquello que no se puede medir, resulta muy complicado de mejorar. Y aunque nos encontramos con un objetivo a largo plazo, hay que proponer una serie de indicadores que ofrezcan cierta seguridad sobre si el camino que se está recorriendo va en la dirección adecuada.

Por ello uno de los propósitos del proyecto MOSOEX es hacer una propuesta de indicadores que permitan tanto a los usuarios finales, como a las administraciones competentes, contar con información útil sobre la que basar la toma de decisiones.

El suelo es un ente muy complejo, y por tanto en la literatura científica se pueden encontrar una gran cantidad de indicadores que nos aporten información sobre algún aspecto concreto de su estado.

Es necesario hacer una selección de posibles indicadores en base a su importancia y, además tener en cuenta su relación con las características concretas del suelo. Es imprescindible seleccionar indicadores que estén totalmente alineados con el objetivo estratégico del proyecto.

Para la realización de este trabajo se parte de la información contenida en la memoria del proyecto.

En este sentido, el grupo operativo ha analizado la información disponible y ha considerado oportuno iniciar el trabajo partiendo de una amplia lista de

indicadores, que posteriormente puede irse depurando en función de criterios de tipo práctico.

2. Indicadores.

2.1. Indicador principal.

- Contenido de materia orgánica.

Teniendo en cuenta, el objetivo principal del proyecto, se establece como indicador principal del mismo, el contenido de materia orgánica en los suelos. Dada la relación de la materia orgánica con la mejora de muchos parámetros de funcionamiento de los suelos agrícolas, la evolución de este indicador va a estar relacionada con la de otros indicadores secundarios.

La materia orgánica está presente en el suelo en un bajo contenido, pero a pesar de ello ejerce una gran influencia en el comportamiento del suelo, tanto a nivel químico, como físico y biológico. Se trata de una propiedad clave del suelo que contribuye en gran medida a la mayoría de los servicios ecosistémicos proporcionados por el mismo, y cuyo contenido total debe ser evaluado (Nelson y Sommers, 1996).

El contenido de materia orgánica total es un indicador dinámico cuya respuesta al cambio de manejo puede ser relativamente lenta en algunas ocasiones. La materia orgánica está constituida por distintas fracciones desde el punto de vista funcional, activa, lenta y pasiva, que influyen de forma diferente en distintos procesos del suelo, y que responden con distintas velocidades a los cambios de manejo.

Por lo tanto se puede utilizar alguna de estas fracciones como indicador

- Fracción particulada de la materia orgánica (MOP).

Es una fracción activa de la materia orgánica que reacciona rápidamente a cambios de manejo del suelo y permite evaluar los efectos de dichos manejos sobre el carbono orgánico del suelo en periodos de tiempo más cortos (Ladoni et al. 2015).

Esta fracción, que corresponde a la materia orgánica de reciente deposición y fácil de descomponer, representa el 10-20% del total y responde de forma rápida al cambio de manejo, guardando una estrecha relación con el suministro de nutrientes, estímulo de los organismos del suelo, la estabilidad estructural, la macroporosidad, la infiltración, la conductividad hidráulica, y la resistencia a la erosión, entre otros. Por tanto, es un indicador directo de materia orgánica que ofrece una rápida respuesta (1-2 años) y se relaciona con aspectos muy

importantes de funcionamiento del suelo. Operativamente, esta fracción puede determinarse como **materia orgánica particulada (MOP)** según el método desarrollado por Cambardella y Elliot (1992).

Otras fracciones activas alternativas a la particulada y de rápida respuesta a los cambios de manejo son el carbono orgánico fácilmente oxidable, el carbono orgánico disuelto o el carbono de la biomasa microbiana.

Además, se pueden medir otros indicadores de calidad del suelo que relacionan la materia orgánica y su estabilización:

- Contenido total de carbono del suelo (COT)

- Estratificación de materia orgánica en profundidad.

En la mayoría de ecosistemas naturales la materia orgánica se encuentra estratificada en profundidad. Lo mismo ocurre en suelos labrados degradados que son restaurados con prácticas de agricultura de conservación. El grado de estratificación de la materia orgánica se puede utilizar como un indicador de la calidad del suelo ya que la materia orgánica en superficie es muy importante de cara a controlar los procesos de erosión, infiltración de agua, intercambio gaseoso y conservación de nutrientes (Franzluebbers 2002).

- Contenido en materia orgánica asociada a la fracción mineral.

Como complemento a la determinación de la materia orgánica particulada, se obtiene la **materia orgánica asociada a la fracción mineral**. Esta materia orgánica viene a representar la fracción lenta y pasiva que incluye la parte más estable y evolucionada, principalmente humus y fragmentos finamente divididos. La fracción pasiva permanece en el suelo por siglos o miles de años y representa del 60 al 90% del total. Guarda una estrecha relación con la capacidad de intercambio iónico, es decir, el almacén de nutrientes del suelo y con la retención de agua en el suelo. La fracción lenta permanece décadas en el suelo, representa entre el 10 y el 20% y tiene un papel intermedio entre la activa y la pasiva, además de relevancia en el nitrógeno mineralizable y sostén de microorganismos autóctonos. A diferencia de la MOP, la materia orgánica asociada a la fracción mineral presenta una respuesta más lenta a los cambios de manejo y en este sentido es menos interesante como indicador que la MOP.

2.2 Indicadores secundarios.

2.2.1. Indicadores relacionados con la erosión del suelo.

- Frecuencia e intensidad de los eventos de lluvia

En cuanto a los factores climáticos, la **frecuencia e intensidad de lluvia** (erosión hídrica) y la **velocidad del viento** (erosión eólica) son los dos factores más relevantes y que más impactan en el riesgo de erosión.

La intensidad de lluvia medida como mm/hora expresa la cantidad de lluvia caída por unidad de superficie y de tiempo. Se ha establecido como 30 mm/hora el valor de intensidad en el que un evento de lluvia empieza a ser erosivo. Asimismo, en fenómenos de erosión eólica se ha establecido que eventos de viento mayores a 20 km/h pueden generar problemas de erosión.

- Textura del suelo

Las propiedades del suelo ejercen un papel importante en el riesgo de erosión de un suelo. Así, por ejemplo, la **textura del suelo** es un factor clave en el riesgo de erosión. Suelos con texturas limosas tienen tendencia a erosionarse con mayor facilidad, mientras que texturas arenosas tienen un menor riesgo. A su vez, la textura del suelo afecta a la **permeabilidad del suelo** y por tanto a la capacidad del suelo para infiltrar y de disminuir la pérdida de suelo por escorrentía. Suelos más arcillosos tendrán una permeabilidad más baja y, por tanto, un mayor riesgo de pérdida de suelo por escorrentía superficial.

Otro factor clave en el riesgo de erosión de un suelo es el **tamaño de los agregados** del suelo y su estabilidad. Cuanto mayor el tamaño de los agregados y su estabilidad menor el riesgo de erosión.

Es importante señalar que aspectos como la permeabilidad del suelo o la distribución de tamaño de agregados del suelo se encuentra muy influenciados por el contenido de materia orgánica del suelo.

- Pendiente de la parcela

La topografía afecta a la erosión del suelo. Parcelas con **pendiente** acusada tendrán un mayor riesgo de erosión. A su vez, la longitud de la pendiente también será un factor importante a la hora de determinar el riesgo de erosión.

- Tipo de manejo del suelo.

El manejo agrícola es un factor clave en el riesgo de erosión de una parcela. La presencia de **cubiertas vegetales** (vivas o muertas) reduce de manera significativa las tasas de erosión del suelo. A su vez, la supresión total del **laboreo** (siembra directa) o la reducción del mismo (mínimo laboreo) favorece la presencia de una capa de residuos en la superficie del suelo que reduce los procesos de escorrentía y, por tanto, las pérdidas de suelo. A su vez, la supresión de los barbechos labrados en cultivos extensivos o la presencia de cubiertas

vegetales en cultivos leñosos también tendrán un impacto positivo en la reducción del riesgo de erosión.

2.2.2. Indicadores para la evaluación del efecto en los GEI.

2.2.2.1. Índices directos.

Los suelos agrícolas son importantes emisores de N₂O. Estas emisiones, que se producen normalmente en forma de pulsos, están muy relacionadas con el aporte de N al suelo, tanto en sus formas minerales como en sus formas orgánicas. La importancia y duración de estos flujos es además muy dependiente de las condiciones climáticas, especialmente de la humedad del suelo. Otros factores, como las características del suelo, especialmente el pH y el contenido de MO, tienen también importancia en la cuantía de este tipo de pérdidas.

Los indicadores elegidos se basan en la estimación de la emisión del N₂O a través de las condiciones de cultivo (inputs de N, condiciones edafoclimáticas del suelo), o de manera indirecta a través de índices asociados con la eficiencia del uso de N en la parcela experimental.

- Emisión de N₂O escalado al rendimiento

Se utilizará el factor de emisión establecido recientemente por la IPCC (2019) para zonas secas (EF=0,5). Este índice se basa en aplicar un factor de 0,005% de emisión de N₂O al N aportado a través de la fertilización, aporte de residuos de cosechas y de otras fuentes de materia orgánica. El indicador dará información sobre la emisión de N₂O estimada por kg de grano producido. La fórmula propuesta para este indicador será:

$$\text{N}_2\text{O escalado} = (\text{N input} / \text{ha}) * 0,005 / (\text{kg grano} / \text{ha})$$

También se pueden incluir otros factores de emisión: Cayuela et al. 2017

- Emisión de N₂O simulado (basado en modelos)

Es un índice muy avanzado y que debe potenciarse para el futuro. Utiliza el modelo Daycent validado por Álvaro-Fuentes et al. (2017) para cereal de invierno en suelos de la Península Ibérica. Introduciendo los datos que requiere el modelo (características del suelo como pH, contenido MO, textura, etc., lluvia o riego aportado, cultivo, fertilización nitrogenada y enmiendas orgánicas) se obtiene un valor simulado de las emisiones de N₂O en el periodo considerado. Permite

obtener también la emisión de N_2O escalado a rendimiento. Además aporta también información sobre el posible C secuestrado.

2.2.2.2. Índices indirectos.

- Exceso de N durante cada periodo de cultivo

Diferencia entre N input y N output. N input incluye el N aportado como fertilizante (orgánico o mineral), N del agua de riego (en caso de que se utilice) y N aportado a través del rastrojo del cultivo anterior (si el balance es anual). N output es el N tomado por la parte aérea de la planta (se puede aplicar para su estimación un factor por tonelada de grano). El N surplus (exceso de N), es un indicador de potenciales pérdidas de N por lixiviación o por pulsos de N_2O tras precipitaciones cuantiosas en post-cosecha (estos picos pueden tener una gran importancia en la emisión de N_2O durante el ciclo de cultivo).

- NUE agronómico en cada periodo de cultivo

Propuesto por Moll et al. (1982), $(\text{kg grano kg}^{-1} \text{ N})$ es la relación entre rendimiento (grano) a la dosis de N aplicado dividido por la suma del N aportado + N mineral suelo al inicio del cultivo (eficiencia del uso del nitrógeno). Se trata de un índice que tiene en cuenta conjuntamente la planta y el suelo, por lo que aportes de N tendrán un peso importante en este índice. Un valor muy bajo sería una indicación de que el sistema está perdiendo N. Si fuese posible tener una parcela sin fertilizar podríamos utilizar la eficiencia agronómica $(Y - Y_0) / N \text{ input}$ y eficiencia de recuperación $(N_{up} - N_0) / N \text{ input}$, que reflejan muy bien la ganancia obtenida al fertilizar.

- NUE a escala de explotación.

La eficiencia en el uso del nitrógeno (NUE, en inglés) es la relación entre N output / N input. Este índice ha sido propuesto por el Panel de Expertos en N de la UE. En este caso el N output es solamente el N que sale de la finca (grano, forraje, etc.) y N input el que se introduce en la finca (fertilizantes, estiércoles de otras fincas, etc.). Es un índice sencillo de obtener que indica si se está introduciendo mucho N al sistema. Los criterios de evaluación serán los que se recogen en el artículo Quemada et al. (2020)

- N min al final del cultivo.

El contenido en N mineral (N min) nos dará idea de si hay riesgo de lixiviación en el otoño.

- CO_2 emitido desde el suelo

Cuando el suelo es alterado de manera mecánica por la acción del laboreo, se rompen los agregados, liberando así la materia orgánica que estaba protegida en su interior y facilitando su mineralización con la correspondiente emisión de CO₂. El CO₂ emitido puede deducirse de manera indirecta a través de la cantidad de carbono secuestrada por el sistema de manejo considerado.

El indicador relativo al CO₂ escalado al rendimiento dará información sobre la emisión de CO₂ estimada por kg de grano producido. La fórmula propuesta para este indicador es la utilizada por Triviño-Tarradas et al. (2020), adaptado a las emisiones directas del suelo:

Indicador = Balance del suelo/Rendimiento del cultivo (kg CO₂eq / kg)

Donde el Balance del suelo se calcula en base al incremento de la cantidad de carbono orgánico en el suelo para el periodo considerado. Dicho incremento multiplicado por 3,67, da la cuantía de CO₂ equivalente secuestrado.

- Emisiones de GEI de todo el Ciclo de Vida¹

Para acabar con este capítulo se introduce una información adicional que se considera necesaria para entender posibles emisiones y pérdidas de N reactivo

- Eventos de lluvia y riego a lo largo del ciclo de cultivo.
- Composición de las fuentes de N.
- Datos de actividad relacionados con la aplicación de fertilizante.
- Inputs necesarios para la modelización (DAYCENT)
 - Precipitación diaria (en cm)
 - Temperatura máxima diaria (°C)
 - Temperatura mínima diaria (°C)
 - Clima
 - Textura
 - Contenido de materia orgánica o carbono orgánico

¹ Ver sección “Indicadores ambientales de la explotación”, apartado “Cambio climático”

- pH
- Densidad aparente
- Capacidad de campo
- Punto de marchitez
- Conductividad hidráulica saturada
- Uso de suelo (no lo plantearemos en este trabajo)
- Fertilización nitrogenada mineral (fecha, cantidad aplicada, tipo de fertilizante)
- Fertilización orgánica (fecha, cantidad aplicada, tipo de fertilizante, características del fertilizante)
- Laboreo (fecha, tipo)
- Riego (fecha, cantidad aplicada)
- Cosecha (fecha, cantidad de residuo exportado)
- Siembra (fecha, tipo de siembra)

2.2.3. Indicadores relacionados con el comportamiento físico del suelo.

El comportamiento físico del suelo está muy relacionado con su estructura, es decir, la disposición de las partículas del suelo en unidades secundarias denominadas agregados, y el correspondiente espacio poroso generado. La distribución de agregados y poros tiene gran influencia en la porosidad total del suelo, el almacenamiento y movimiento de aire y agua, el desarrollo radicular, la transferencia de calor, etc. (Brady y Weil, 2008). Existen diferentes indicadores que proporcionan información a este respecto:

- Densidad aparente

La densidad aparente es un indicador de la compactación del suelo. La compactación en superficie puede reducir el intercambio de gases, la nascencia y la infiltración, con el consiguiente aumento de la erosión hídrica. A nivel subsuperficial puede perjudicar el desarrollo radicular, el movimiento de agua, nutrientes, aire y organismos, la retención de agua disponible, además de dificultar el laboreo, entre otros efectos. Normalmente, la densidad aparente se mide mediante el método del cilindro que permite extraer una muestra inalterada de suelo de volumen conocido (Blake y Hartge, 1986). Restando los elementos

gruesos (> 2 mm) tanto de la masa seca como del volumen se obtiene la **densidad aparente de la tierra fina**. La porosidad total se calcula a partir de la densidad aparente teniendo en cuenta la densidad de sólidos.

- Agregados estables al agua

La estabilidad de agregados se refiere a la capacidad de los agregados del suelo de resistir la desintegración frente a fuerzas disruptivas asociadas al laboreo, el agua o la erosión eólica. La estabilidad de los agregados al agua es importante para resistir el impacto de la gota de agua y la erosión hídrica. La formación y estabilidad de los agregados depende de factores como el contenido de materia orgánica en el suelo, especialmente, la MOP, pero también de la textura y de factores biológicos como las lombrices, el micelio de los hongos, las raíces y la producción microbiológica de sustancias orgánicas que actúan como pegamentos. Tiene la ventaja de ser un indicador temprano tanto de degradación como de recuperación de suelos degradados. La estabilidad de los agregados al agua se puede evaluar mediante el **% de agregados estables al agua (%AEA)** y hace referencia a la proporción de agregados estables al agua sobre el total de agregados estables e inestables (Kemper y Rosenau, 1986).

- Proporción de macroagregados

Además del de agregados estables al agua, puede ser de interés conocer la distribución de tamaño de agregados estables al agua ya que ofrece información sobre la **proporción de los macroagregados (> 0,250 mm)** e indirectamente sobre la macroporosidad, que resulta esencial para el movimiento de agua, nutrientes y aire en el suelo, y la penetración de las raíces (Kemper y Rosenau, 1986).

- Infiltración.

La infiltración hace referencia a la entrada de agua en el suelo a través de la superficie. Influye en el contenido de agua en el suelo, la generación de escorrentía, la erosión hídrica o el encharcamiento, por ello con importantes consecuencias a nivel productivo y ambiental. La **tasa de infiltración**, esto es, el volumen de agua que entra en el suelo por unidad de superficie y de tiempo, se puede medir con el método del doble anillo y, de forma simplificada, con el anillo simple (Reynolds et al., 2002).

2.2.4. Indicadores relacionados con el comportamiento químico del suelo.

Los indicadores químicos juegan un importante papel en funciones del suelo relacionadas con el crecimiento de las plantas, la productividad y diversidad, la capacidad tampón, descontaminación, regulación de agua y solutos, almacenamiento y reciclado de nutrientes y del carbono, estabilización estructural, entre otros. Los indicadores químicos pueden verse afectados por el uso y manejo del suelo y del riego y pueden responder de forma rápida o relativamente rápida a los mismos.

- pH del suelo

El pH expresa el grado de acidez o alcalinidad de un suelo. Es una variable clave que afecta a un amplio número de variables del suelo, tanto químicas, como físicas y biológicas. Influye en la solubilidad y disponibilidad de nutrientes. Afecta a la movilidad, solubilidad, degradación y adsorción de muchos contaminantes. También afecta a la capacidad tampón del suelo, capacidad de intercambio catiónico y saturación en cationes básicos, ambos relacionadas con la fertilidad potencial y actual del suelo. Influye en la dispersión de las arcillas y en la formación y estabilidad de los agregados del suelo, tanto directamente a través de los procesos químicos como de los biológicos. Asimismo, condiciona la abundancia, tipos y actividad de los organismos del suelo, entre los que cabe destacar las bacterias, que no se desarrollan bien en suelo ácidos con importantes consecuencias para el ciclo del N, por ejemplo. Por último, afecta al crecimiento y productividad de las plantas en general, determinando la selección de los cultivos. El pH se mide de forma rápida en campo o en laboratorio y existe abundante documentación para su interpretación. Cabe resaltar que como la escala del pH es logarítmica, cambios relativamente pequeños pueden afectar al ambiente químico y a los procesos biológicos más sensibles.

- Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica es un indicador usado para evaluar la salinidad del suelo y puede brindar información sobre el nivel de nutrientes. La medida hace referencia a la capacidad para transportar la corriente eléctrica y está asociado normalmente a los cationes y aniones que resultan de la disolución de las sales en el agua del suelo. Altos valores de CE se han asociado con niveles elevados de nitratos y otros nutrientes (P, K, Ca, Mg, Mn, Zn, and Cu). La acumulación de sales solubles en el suelo supone un grave problema para la productividad de los suelos, especialmente en las regiones secas. El exceso de sales genera problemas de crecimiento en las plantas por sequía fisiológica, desequilibrios nutricionales y toxicidad directa en algunos casos. También afecta a las poblaciones microbianas y algunos procesos como la respiración y la nitrificación se ralentizan a medida que la CE aumenta. La medida de la CE se puede realizar

en campo mediante equipos portátiles o en laboratorio, siendo una medida habitual en suelos.

2.2.5. Indicadores relacionados con la actividad biológica del suelo.

El componente vivo del suelo es clave en los servicios ecosistémicos del suelo, principalmente en la descomposición de la materia orgánica y reciclado de nutrientes, degradación de contaminantes y estabilización estructural del suelo. Los indicadores biológicos de calidad del suelo resultan de gran interés porque responden rápidamente a cambios de uso y de manejo del suelo. Sin embargo, pueden resultar difíciles de obtener cuando se pretenden medir directamente ya que exigen medios y especialización elevada. Una excepción es el caso de las lombrices, que pueden ser cuantificadas en campo con facilidad y sin apenas especialización y por ello constituyen uno de los principales indicadores biológicos. Otros indicadores biológicos son aquellos relacionados con procesos en los que participan activamente los organismos del suelo como la respiración del suelo y las actividades enzimáticas, pero que exigen un mayor grado de equipamiento y especialización. En última instancia, la cuantificación de microorganismos mediante técnicas moleculares o bioquímicas es cada vez más accesible, pero exigen gran especialización tecnológica.

- Abundancia de lombrices

Las lombrices se alimentan de restos orgánicos y no constituyen plagas de las plantas. Excavan el suelo ingiriendo restos orgánicos que mezclan con el material mineral del suelo, pasan la mezcla por el intestino y lo expulsan en forma de excremento. Juegan un importante papel en el suelo tanto a nivel físico, como químico y biológico. Al excavar el suelo e incorporar residuos de la superficie, las lombrices realizan un laboreo natural que genera una red de canales o bioporos horizontales y verticales, aumentando la porosidad, el movimiento de agua y de aire en el suelo, aliviando la compactación y favoreciendo la penetración de las raíces. Además, tanto por el proceso de excavación como por los propios excrementos, que son muy estables al agua, se favorece la estabilidad estructural. Por otra parte, las lombrices favorecen la fertilidad del suelo incrementando los nutrientes a disposición de las plantas y estimulando la actividad microbiológica y con ello el reciclado de nutrientes (Brady y Weil, 2008). Se miden por conteo obteniendo el **número de lombrices por unidad de superficie** (m²).

- Respiración del suelo

La respiración del suelo es una medida del CO₂ liberado por el suelo como resultado de la descomposición de la materia orgánica por los microorganismos del suelo, la respiración de las raíces y la fauna del suelo. Se trata de un indicador importante de la salud del suelo porque se relaciona con el nivel de actividad microbiana, el contenido de materia orgánica y el reciclado de nutrientes. Así, durante el proceso de mineralización de la materia orgánica (y consiguiente liberación de CO₂), los nutrientes en forma orgánica, que es una forma no disponible para la planta, se convierten en formas inorgánicas disponibles como el amonio, nitrato, fosfato o sulfato. Por tanto, unas tasas adecuadas de respiración indican que el reciclado de nutrientes se está llevando a cabo de forma adecuada. Una baja tasa de respiración indica que hay poca materia orgánica o bien que la actividad microbiana es baja porque las condiciones del suelo (temperatura, humedad, aireación, N disponible, toxicidad) la limiten y con ello la descomposición de la materia orgánica. Por otra parte, altas tasas de respiración pueden indicar un sistema estresado e inestable con una alta pérdida de materia orgánica debido a una labranza excesiva u otros factores que degraden la salud del suelo. La respiración puede medirse en campo o en laboratorio; puede ser basal o inducida por un sustrato orgánico como la glucosa, en cuyo caso puede servir como estimador del C de la biomasa microbiana.

- Otros indicadores biológicos más complejos podrían ser::

Las actividades enzimáticas relacionadas con el ciclo del C y N, abundancia de hongos y bacterias totales, etc.

2.2.6. Indicadores ambientales de la explotación.

A través del análisis de ciclo de vida anual de la producción, es posible conocer el rendimiento ambiental del cultivo no solo desde el punto de vista del impacto ambiental directo de la explotación, sino en toda la cadena de valor hasta que se cosecha el producto.

Este análisis de la explotación reflejará, por tanto, la influencia de las labores del campo, de los insumos utilizados y del rendimiento productivo de la explotación, en los valores de impacto ambiental totales por unidad de cultivo (tonelada, hectárea, etc.).

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una metodología de evaluación de los impactos ambientales de cualquier sistema de producto a lo largo de las distintas etapas consecutivas e interrelacionadas del sistema, desde la adquisición de las

materias primas o la extracción de los recursos necesarios, hasta la disposición final de los residuos o su recuperación o valorización. Esta metodología está regulada por la norma ISO 14040 y ampliada por la ISO 14044.

El resultado de este tipo de análisis es un inventario de entradas (recursos materiales y energéticos) y salidas (emisiones al medioambiente, energía, el producto en sí y sus coproductos), que es necesario interpretar como impactos ambientales. Para ello, a este inventario se le pueden aplicar distintos métodos de evaluación de impactos, que nos proporcionarán información ambiental específica.

Existen múltiples métodos de evaluación de impactos y metodologías que agrupan distintos métodos de evaluación, que nos ayudan a conocer y evaluar los impactos ambientales de los productos. La Comisión Europea ha desarrollado su propia metodología, denominada Huella Ambiental (*Environmental Footprint*), que recoge un conjunto de métodos de impacto para evaluar los distintos aspectos ambientales de los sistemas de producto.

En la última revisión de esta metodología, la EF 3.0, la Comisión Europea seleccionaba 28 impactos ambientales distintos, de los que dentro del proyecto MOSOEX se propone el uso de los 4 con más presencia en los trabajos agrícolas objeto del proyecto.

Se propone por tanto utilizar los siguientes indicadores ambientales de producto, evaluados en el ciclo de vida parcial, hasta la puerta de la explotación, es decir, hasta que el producto pasa a manos de la fase inmediatamente después a la agrícola (generalmente tras la cosecha):

- Acidificación:

La acidificación está causada principalmente por la emisión al aire y al suelo de NH_3 , NO_2 y SO_x , que aumentan la acidez (disminución del pH). Esto provoca la denominada “lluvia ácida” (precipitaciones con un pH inferior a 5,6) con consecuencias sobre el equilibrio de los ecosistemas, salud, cultivos, visibilidad, materiales, etc. Los principales causantes de la acidificación en los cultivos herbáceos son el uso de maquinaria agrícola y la fabricación de fertilizantes nitrogenados.

El modelo de impacto propuesto para esta categoría es el desarrollado por *Seppälä et al 2006*, *Posch et al 2008*, que evalúa el indicador “Exceso Acumulado” expresado en “mol H^+ eq.”.

- Ecotoxicidad del agua dulce:

Este impacto representa el aumento de las sustancias que tienen un efecto nocivo directo sobre el agua dulce y las especies que habitan en ella. Un gran número de sustancias (más de 6.700 en el modelo aquí propuesto), cuando son vertidas al suelo, al agua, o al aire, provocan este impacto, y en muchos productos se pueden identificar en sus fichas de seguridad si existen. Esto es especialmente relevante en la agricultura en la aplicación de fitosanitarios, que vierten estas sustancias directamente al medio, aunque la acumulación de este impacto se produce en todas las fases de la cadena de valor, incluyendo el uso de maquinaria y la fabricación de todos los insumos.

El modelo de impacto propuesto para esta categoría es “USEtox® 2.1 (Rosenbaum et al 2008)”, que evalúa el indicador “Unidad Tóxica Comparativa” expresado en “CTUe”.

- Cambio climático:

El Cambio Climático es probablemente uno de los impactos ambientales más conocidos por el público general, y evalúa el potencial de calentamiento global de los gases de efecto invernadero emitidos durante el ciclo del proceso. Aunque los principales gases de efecto invernadero son el CO₂, el CH₄ y el N₂O, el grupo de gases de efecto invernadero está compuesto por más de 200 gases. Los Gases de Efecto Invernadero, o GEI, aumenta la retención en la atmósfera del calor procedente del sol, con múltiples consecuencias sobre el clima. En el sector agrícola, los principales gases de efecto invernadero se producen en la fabricación de fertilizantes nitrogenados, que son procesos muy energéticos, y en su aplicación, a través de los procesos de nitrificación y desnitrificación.

El modelo de impacto propuesto para esta categoría es “IPPC, 2013 + adaptaciones EF 3.0”, que evalúa el indicador “GWP₁₀₀” (Potencial de Calentamiento Global a 100 años), expresado en “kg CO₂ eq”

Este indicador está directamente ligado con los Indicadores propuestos anteriormente en este documento para la evaluación del efecto en los GEI. El modelo de impacto IPCC 2013 propuesto aquí, que principalmente define factores de caracterización para los distintos GEI, se debe complementar con lo indicado anteriormente para evaluar las cantidades de N₂O emitidas en la aplicación de nitrógeno al suelo a través de los fertilizantes, para tener una visión completa de las emisiones globales de GEI de todo el ciclo de vida.

- Agotamiento de recursos hídricos:

Reflejar el uso de agua a lo largo de todo el ciclo de vida es especialmente relevante en las labores agrícolas. Existen muchos modelos diferentes para

evaluar este aspecto ambiental, que resulta especialmente complejo debido a que el consumo de agua dulce medido simplemente como el uso directo de agua, no aporta información real sobre la afección ambiental sobre el agua, puesto que esta afección depende de múltiples factores, como la cuenca de la que se extrae el agua, la gestión posterior, la ubicación y la superficie sobre la que se vierte el agua, la climatología, etc. En el sector agrícola, el agotamiento de recursos hídricos se produce de forma directa principalmente cuando existen riegos, o en el agua utilizada para disolver tratamientos, pero también se producen en los principales procesos aguas arriba, especialmente en la producción de insumos.

El modelo de impacto propuesto para esta categoría es “AWARE 2016” que evalúa el indicador “Uso de agua ajustado a escasez”, expresado en “m³ con equivalencia mundial”.

2.2.7. Indicadores en explotaciones en ecológico.

En sistemas cerealistas de secano ecológicos es importante evitar la erosión del suelo. Como el recubrimiento del suelo es uno de los factores que más influyen sobre la generación de escorrentía y la pérdida de suelo por erosión hídrica siendo a su vez una de las variables más directamente dependientes del modelo de manejo, se puede usar como criterio de evaluación de la eficacia del sistema de manejo en cuanto a la conservación de suelo de manera conjunta:

- *Porcentaje de recubrimiento del suelo.* Es el porcentaje de suelo recubierto por planta verde o por rastrojo de cultivos anteriores.
- *Variabilidad estacional de dicho recubrimiento.*

Importante maximizar la coincidencia de los momentos de máximo recubrimiento superficial con los periodos de máxima erosividad (De Alba et al., 2011).

En cualquier caso estos indicadores son aplicables también a parcelas bajo manejo convencional.

2.3. Indicadores de implementación.

Se considera oportuno incorporar al documento una serie de indicadores de implementación, que permitan tener conocimiento de determinadas prácticas muy relacionadas con los indicadores anteriormente analizados.

- Superficie de siembra directa. (Fuentes: ESYERCE, ROMA).
- Superficie de producción ecológica.
- Superficie con cubiertas vegetales.



- Superficie acogida a programas agroambientales de protección de los suelos.
- Superficie en los futuros “Ecoesquemas” sobre protección de suelos.

3. Bibliografía.

FAO. 2019. Soil erosion: the greatest challenge to sustainable soil management. Rome.

Gardiner, D.T., Miller, R.W. 2004. Soils in our environment. 10th Edition. Pearson Education.

Porta, J., López-Acevedo, M., Roquero, C. 1999. Edafología para la agricultura y medio ambiente. 2ª Edición. Mundi Prensa.

Ladoni M, Basir A., Kravchenko A. 2015. Which Soil Carbon Fraction is the Best for Assessing Management Differences? A Statistical Power Perspective. Soil Sci. Soc. Am. J. 79:848–857, doi:10.2136/sssaj2014.10.0426

Lal, R. Carbon emission from farm operations (2004). *Environment International* 30: 981-990.

De Alba, S., Alcázar, M., Cermeño, F.I., Barbero, F. (2011). Erosión y manejo del suelo. Importancia del laboreo ante los procesos erosivos naturales y antrópicos. En: Agricultura ecológica en secano: soluciones sostenibles en ambientes mediterráneos. Ministerio De Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. p. 13-38.

Franzluebbers A.J. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil and Tillage Research* 66: 95-106.

Brady, N. C., Weil, R. R., & Weil, R. R. (2008). The nature and properties of soils (Vol. 13, pp. 662-710). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

Cambardella, C. A., & Elliott, E. T. (1992). Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil science society of America journal*, 56(3), 777-783.

Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5, 961-1010.

Blake, G. R., y Hartge, K. H. (1986). Bulk density. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 363-375.



Kemper, W. D., & Rosenau, R. C. (1986). Aggregate stability and size distribution. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5, 425-442.

Reynolds, W. D., Elrick, D. E., & Youngs, E. G. (2002). Single-ring and double-or concentric-ring infiltrometers. p. 821–826. JH Dane and GC Topp (ed.) *Methods of soil analysis: Part 4. Physical methods*. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.

Triviño-Tarradas, P.; Carranza-Cañadas, P.; Mesas-Carrascosa, F.-J.; Gonzalez-Sanchez, E.J. (2020). Evaluation of Agricultural Sustainability on a Mixed Vineyard and Olive-Grove Farm in Southern Spain through the INSPIA Model. *Sustainability* 12, 1090.

Álvaro-Fuentes J, Arrúe J L, Bielsa A, Cantero-Martínez C, Plaza-Bonilla D, Paustian K 2017 Simulating climate change and land use effects on soil nitrous oxide emissions in Mediterranean conditions using the Daycent model, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 238: 78-88, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.07.017>.

IPCC, 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas inventories — IPCC, n.d. URL <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/> (accessed 4.28.20).

Quemada M., Lassaletta L., Jensen L.S., Godinot O., Brentrup F., Buckley C., Foray S., Hvid S.K., Oenema J., Richards K.G., Oenema O. 2020 Exploring nitrogen indicators of farm performance among farm types across several European case studies, *Agricultural Systems*, 177, 102689, <https://doi.org/10.1016/j.agry.2019.102689>.

Páginas web:

<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/health/assessment/?cid=stelprdb1237387>