



CIENCIAS AMBIENTALES
FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ

Facultad de Ciencias Experimentales

Grado de Ciencias Ambientales

Trabajo de Fin de Grado

Curso 2019/2020

Estudio de los errores que interfieren en la monitorización del carbono orgánico del suelo

Autor: Alejandro Serrano Muñoz

Tutor: César Guerrero Maestre

Índice

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Carbono Orgánico del Suelo	2
1.2. Ciclo del Carbono	2
1.3. Cambio Climático y Sostenibilidad	3
1.4. Iniciativa 4 por 1000	4
1.5. Monitorización y verificación del carbono orgánico del suelo	5
2. OBJETIVOS	7
3. MATERIAL Y MÉTODOS	7
3.1. Cambios de gestión	7
3.2. Descripción y muestreo de la zona.	7
3.3. Generación de las diferentes simulaciones	8
Suma de los errores	9
3.4. Cálculo de los errores	11
3.4.1. Error del método de laboratorio.....	11
3.4.2. Efecto de la Variabilidad.....	11
3.4.3. Variabilidad del efecto	12
3.5. Comparación estadística	12
3.5.1. Prueba t de Student	12
Prueba t de Student para métodos pareados	13
Prueba t de Student para métodos no pareados	13
3.5.2. Diferencia Mínima Detectable.	13
Diferencia Mínima Detectable para Métodos Pareados.	14
Diferencia Mínima Detectable para Métodos No Pareados.	14
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	15
5. CONCLUSIONES	22
6. PROYECCIÓN FUTURA	22
7. REFERENCIAS.....	23
ANEXOS	25

RESUMEN

El carbono orgánico del suelo (COS) es un gran indicador de la calidad del suelo y contribuye a la mitigación del cambio climático. Esto lleva a que sea muy importante su monitorización y el uso de cambios de gestión que aumenten el COS.

En este trabajo se han simulado diferentes monitorizaciones de COS teniendo en cuenta diferentes cambios de gestión y errores que pueden afectar a la detección de los cambios producidos en la concentración de COS. Estos errores se pueden compensar con el uso de métodos de laboratorio más precisos, los cuales permitan observar cambios pequeños en la concentración de COS u obteniendo tamaños muestrales muy grandes.

Palabras clave: carbono orgánico del suelo, monitorización, concentración de COS, errores, cambios de gestión, métodos de laboratorio, tamaños muestrales.

ABSTRACT

Soil organic carbon (SOC) is a great indicator of soil quality, this makes it very important to monitor it and implement processes to increase its concentration in the soil.

In this project different monitoring of SOC has been simulated taking into account different management changes and errors that can affect the detection of changes produced in the concentration of SOC. These errors can be offset against the use of refined laboratory methods, which allow observing small changes in COS concentration or by obtaining very large sample sizes.

Keywords: soil organic carbon, monitoring, SOC concentration, errors, management changes, laboratory methods, sample sizes.

ABREVIATURAS

COS: Carbono orgánico del suelo

DMD: Diferencia mínima detectable

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Carbono Orgánico del Suelo

El carbono orgánico del suelo (COS) es el carbono que se retiene en el suelo tras la descomposición de la materia orgánica. El COS es un componente importante del ciclo global del carbono, ocupando un 69.8% del carbono orgánico de la biosfera (FAO, 2001). Se estima que la reserva de COS almacena 1500 PgC en el primer metro de suelo, lo cual supone más carbono que el contenido en la atmósfera (aproximadamente 800 PgC) y la vegetación terrestre (500 PgC) combinados (FAO y GTIS, 2015).

Los suelos representan el mayor almacén de carbono orgánico de la Tierra. Se ha observado la existencia de grandes cantidades de carbono orgánico en las regiones de permafrost del norte de la Tierra.

El carbono orgánico del suelo (COS) es el principal componente de la materia orgánica del suelo (MOS), la MOS es la encargada de mantener la estructura del suelo, almacenar agua en el suelo y retener y liberar los nutrientes. La pérdida del carbono orgánico en el suelo puede llegar a producir la degradación de este, y el aumento de perjuicios a la atmósfera debido a la liberación del COS.

La cantidad de COS almacenada en un suelo determinado depende del equilibrio entre la cantidad de C que entra al suelo y la que sale del suelo como gases de respiración basados en C, procedentes de la mineralización microbiana y, en menor medida, de la lixiviación del suelo como carbono orgánico disuelto (COD). Por lo tanto, los niveles de almacenamiento de COS se controlan principalmente gestionando la cantidad y el tipo de residuos que entran en el suelo y minimizando las pérdidas de C del suelo (FAO y GTIS, 2015).

1.2. Ciclo del Carbono

El ciclo del carbono es un ciclo biogeoquímico en el cual se intercambia materia compuesta por carbono entre la biosfera, la hidrosfera, la atmósfera y la geosfera.

La entrada de carbono al suelo se produce de diversas formas, por ejemplo: tras la muerte de los organismos vivos el material orgánico se incorpora al suelo tras su descomposición por parte de los organismos heterótrofos. Esta materia orgánica se asociará con minerales del suelo formando agregados, permitiendo la persistencia del COS en el suelo durante décadas, siglos o incluso milenios (Schmidt et al., 2011). Tras la descomposición de la MOS se libera a la atmósfera CO₂, esto provoca que el carbono que estaba almacenado en el suelo se pierda, el carbono también es parcialmente exportado de los suelos a ríos y océanos como COD o como parte de material de erosión (FAO, 2017).

La cantidad de COS almacenado en un suelo depende del equilibrio entre la cantidad de C que entra en el suelo y que sale del suelo en forma de gases. Por lo tanto, los niveles de almacenamiento de COS se controlan principalmente gestionando la cantidad y el tipo de residuos orgánicos que entran en el suelo y minimizando las pérdidas de C del suelo (FAO y GTIS, 2015).

La cuantificación de los flujos globales de carbono es necesaria para conocer si los ecosistemas terrestres globales fijan más CO₂ atmosférico a través de la fotosíntesis que el que

emiten a la atmósfera a través de la respiración (FAO, 2017). La evaluación más reciente de carbono indicó que, entre 2006 y 2015, las emisiones a la atmósfera eran más altas que la suma de los sumideros oceánicos y terrestres, siendo el 90% de estas emisiones procedentes de combustibles fósiles y la industria (Le Quéré et al., 2016). A largo plazo, el CO₂ atmosférico ha aumentado aproximadamente de 180 a 280 ppm desde el último período glacial, añadiendo alrededor de 220 PgC a la atmósfera durante un período de 10000 años. Esto se traduce en una tasa de aumento de 4.4 PgC/año (Baldocchi et al., 2016).

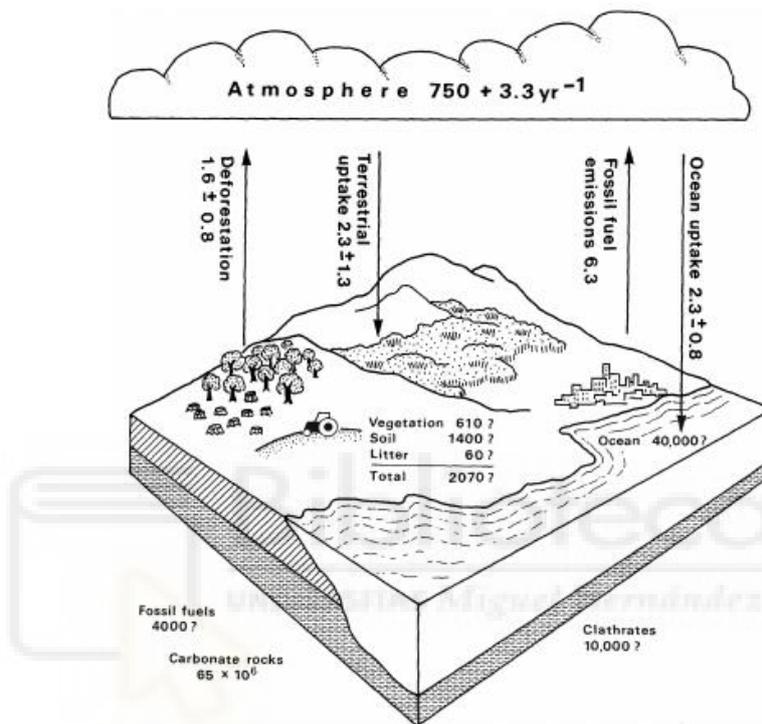


Figura 1. Ciclo biogeoquímico del carbono el cual muestra los principales reservorios y vías de flujo de carbono en la biosfera. Fuente: Grace, J. (2004).

1.3. Cambio Climático y Sostenibilidad

El cambio climático se entiende como un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos comparables (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, 1992).

La agricultura contribuye al cambio climático, se ve afectada por él, y además tiene la capacidad de mitigarlo (Iniciativa 4 por mil, 2018). Las prácticas como la deforestación, la sobreexplotación de los recursos o los manejos inadecuados conllevan un aumento de las emisiones de efecto invernadero.

Por otro lado, con el uso de buenos manejos y buenas prácticas agrícolas se puede lograr el aumento de la concentración de carbono orgánico en el suelo. Cada enmienda orgánica o cambio

de manejo aplicado para mejorar el COS va a provocar efectos distintos en el suelo (Iniciativa 4 por 100, 2018).

Gracias a diversos estudios realizados se ha demostrado que las mayores concentraciones de COS se dan en los suelos de los bosques, mientras que las concentraciones mas bajas de COS se han localizado en suelos agrícolas, esto se debe al gran desgaste que sufren estos suelos y a la poca materia orgánica que incorporan.

En cuanto a España, los últimos estudios realizados a nivel nacional estiman la cantidad total de COS de España en 2.8 Pg, lo que supone una cuantía media de 56.6 Mg/ha (2.9% de contenido de materia orgánica). Se conoce que 44 provincias tienen un porcentaje inferior o igual a 2% de Carbono Orgánico del Suelo, esto significa que estas provincias tienen un gran riesgo de pérdidas importantes en la calidad de los suelos, siendo estos cada vez menos productivos. Los suelos agrícolas son los que mas cantidad de COS han perdido, por tanto, estos tienen una gran capacidad de secuestrar el Carbono atmosférico y así disminuirlo en la atmosfera.

1.4. Iniciativa 4 por 1000

En la Conferencia de Paris sobre el Clima (COP21), se introdujo por primera vez la iniciativa 4 por 1000: Suelos para la seguridad alimentaria y el clima.

La iniciativa 4 por 1000 tiene como objetivo principal incrementar la cantidad de materia orgánica en los suelos y el secuestro de carbono atmosférico por parte de estos. Con el crecimiento anual de un 4 por 1000 (0.4%) del COS, se busca demostrar que incluso un pequeño incremento en el almacenamiento del carbono en los suelos es importante para mejorar la fertilidad de estos y la producción agrícola, y contribuir así a conseguir el objetivo a largo plazo marcado en el Acuerdo de Paris, de limitar el incremento de la temperatura media global a un máximo de 1.5 o 2°C (Iniciativa 4 por mil, 2018).

Para llevar a cabo la iniciativa 4 por 1000 se necesita el apoyo de los diferentes gobiernos, ya que es necesario implementar medidas políticas tales como:

- Reducir la deforestación en las zonas naturales
- Fomentar practicas que aumenten el COS, algunas de estas prácticas son:
 - Aplicar enmiendas orgánicas en el suelo
 - Nunca dejar el suelo desnudo, debido a la gran pérdida de suelo que se produce.
 - Limitar el uso de los suelos
 - Usar plantas que ayuden a la fijación de nitrógeno

Esta iniciativa busca fortalecer las sinergias y coherencias entre las tres grandes Convenciones de Rio, el Comité de Seguridad Alimentaria Mundial (CSA) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible aprobados por las Naciones Unidas en septiembre de 2015 (Iniciativa 4 por mil, 2018). A esta iniciativa ya se han adherido 150 entidades de más de 30 países, entre las que se encuentran:

- Gobiernos, entre ellos el español.
- Organizaciones Internacionales
- Fundaciones
- Empresas privadas
- ONGs

1.5. Monitorización y verificación del carbono orgánico del suelo

Para verificar que los cambios de gestión tienen la efectividad o producen el incremento esperado es necesario realizar monitorizaciones.

Estas monitorizaciones consisten en realizar una comparación entre dos muestreos, un muestreo inicial, al que se ha llamado tiempo 0, y un muestreo realizado años más tarde, al que se ha llamado tiempo 1.

La monitorización del COS se ve afectada por tres problemas principales, estos son:

En primer lugar, la variabilidad del terreno. Esta variabilidad no se da solo en superficie, sino que también se da en profundidad. En zonas donde haya mucha variabilidad va a ser muy difícil detectar los cambios producidos en la concentración de COS tras el paso del tiempo.

En segundo lugar, los incrementos producidos por los cambios de gestión son aumentos muy pequeños. Si estos cambios de gestión provocan un efecto acumulativo, se deberá de esperar muchos años para poder observar el cambio que han producido (FAO, 2015)

Por último, uno de los problemas que más se ha de tener en cuenta es el presupuesto disponible. El presupuesto condiciona los métodos de análisis de laboratorio que se van a usar y el tamaño muestral que se va a recoger. El uso de métodos de análisis de laboratorio más precisos conlleva un aumento del presupuesto necesario para la realización del proyecto. Con el tamaño muestral ocurre lo mismo, ya que si se toman muchas muestras el presupuesto necesario va a aumentar y el tiempo requerido para analizar todas las muestras.

	Efecto negativo	Efecto positivo
Tiempo	Tiempo excesivo	Aumenta Δ COS
Aumentar tamaño muestral	Coste económico	Aumenta la potencia estadística
Métodos de laboratorio poco precisos	Aumenta el error del método	Aumenta el tamaño muestral
Estudio de una zona con mucha variabilidad del suelo	Aumenta el error	No existe efecto positivo

Tabla 1. Efectos negativos y positivos del tiempo, el tamaño muestral, los métodos de laboratorio poco precisos y estudio de zonas con mucha variabilidad.

El caso representado en la figura 2, es un caso muy problemático. Ya que es una situación en la que se ha estudiado un suelo con mucha variabilidad, el cambio de gestión ha provocado un incremento muy pequeño y esto provoca que el poder estadístico sea pequeño. En la figura 2 se puede observar H_0 la cual se corresponde con la de media de COS a tiempo 0, H_a se corresponde con la media de COS a tiempo 1, en rojo se representa el error tipo I ($\alpha = 5\%$), en azul oscuro se representa el error tipo II ($\beta = 0.35$) por último, en azul claro se representa el poder estadístico ($1 - \beta = 65\%$).

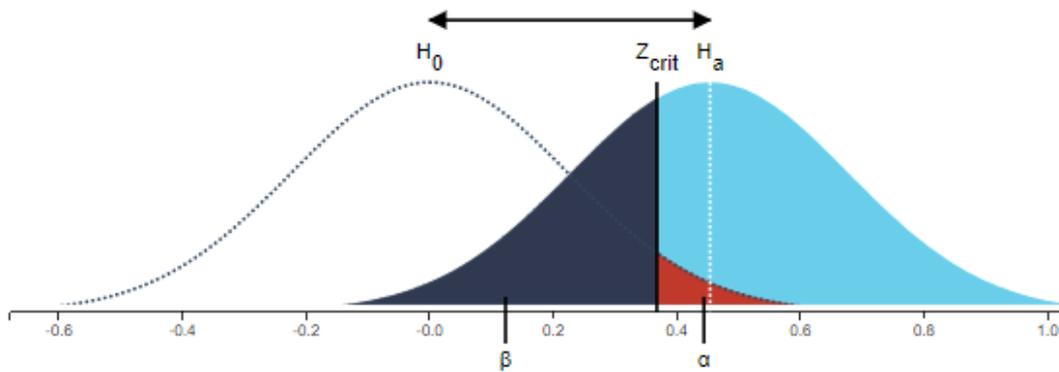


Figura 2. Representación gráfica de una situación de un muestreo con un poder estadístico de 0.65.

Para poder solucionar los problemas asociados a la monitorización es necesario:

- Aumentar el tiempo de espera entre muestreos. Esto permite que el aumento que se haya producido en la concentración de carbono orgánico del suelo sea mayor. Si el efecto acumulado es grande se podrá observar mejor las diferencias.
- Aumentar el tamaño muestral. Esto no siempre es posible debido a que analizar tamaños muestrales muy grandes requiere grandes cantidades de tiempo y dinero. Si se usa un método de laboratorio menos preciso, pero más barato, es posible tomar muchas más muestras para compensar el error del método de laboratorio.

Al contrario que la figura 2. La figura 3 es una situación óptima para la realización del trabajo. En esta figura el poder estadístico, garantizando mayor fiabilidad a los resultados. Esta situación es muy poco frecuente, ya que para que se de es necesario que la variabilidad del suelo sea muy pequeña y que los cambios de gestión provoquen incrementos muy grandes. En la figura 3 se puede observar H_0 la cual se corresponde con la de media de COS a tiempo 0, H_a se corresponde con la media de COS a tiempo 1, en rojo se representa el error tipo 1 ($\alpha = 5\%$), en azul oscuro se representa el error tipo II ($\beta = 0.05$), por último, en azul claro se representa el poder estadístico ($1-\beta = 95\%$).

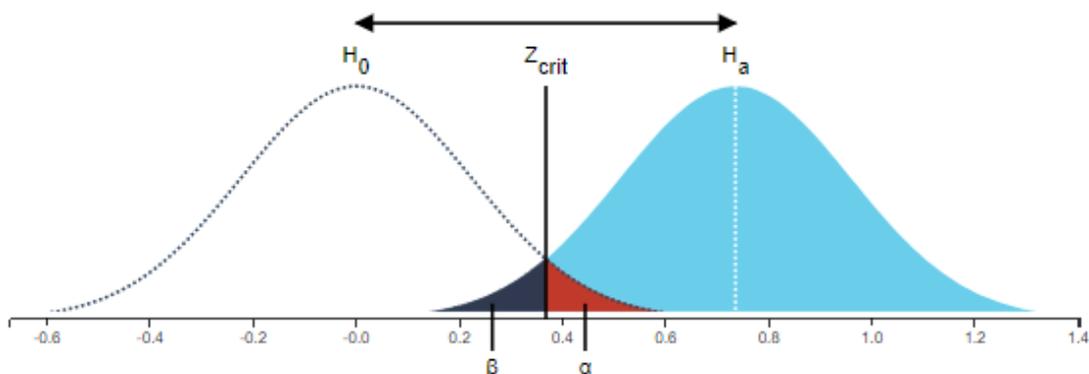


Figura 3. Representación gráfica de un muestreo con un poder estadístico de 0.95

2. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es analizar por medio de comparaciones estadísticas como interfieren los errores (error del método de laboratorio, error producido por la variabilidad del suelo y el error producido por la variabilidad de los cambios de gestión) en la capacidad de detectar los cambios de COS en monitorizaciones simuladas.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Cambios de gestión

Se ha analizado el incremento que provocaría en la concentración de Carbono Orgánico la aplicación de diferentes cambios de gestión tras el paso de 7 años para poder aplicarlo en las simulaciones.

Los cambios de gestión estudiados han sido los siguientes:

- Efecto de 0: No se ha aplicado ningún tipo de método que aumente el COS.
- Efecto de 0.056: Cultivos herbáceos en sistemas ecológicos (Agricultura ecológica)
- Efecto de 0.084: Rotación de cultivos de cebada-veza con un manejo de laboreo convencional
- Efecto de 0.11: Rotación de cultivos cebada-girasol con no laboreo
- Efecto de 0.15: Rotación de cultivos cebada-girasol con un manejo de laboreo convencional.
- Efecto de 0.19: Rotación de cultivos de cebada-veza con no laboreo
- Efecto de 0.24: Aplicación de residuos vegetales compuestos por rastrojo, paja y caña.
- Efecto de 0.3: Uso de cubiertas vegetales

3.2. Descripción y muestreo de la zona.

Las muestras correspondientes al inicio, o tiempo cero (t_0), son 100 muestras de suelo que fueron tomadas en una parcela con uso agrícola ubicada en Tarazona de la Mancha. Se trata de una parcela de 60 hectáreas, y las 100 muestras fueron tomadas aleatoriamente a lo largo de la parcela con ayuda de una sonda manual hasta una profundidad de 10 cm. Esas muestras fueron secadas en condiciones de laboratorio (aproximadamente a 25°C durante 2 semanas) y posteriormente tamizadas a 2 mm.

El COS fue medido en cada muestra mediante el método de Walkley-Black usando varias repeticiones. El contenido de COS en estas muestras varía desde 0.75% a 1.55%, con una media de 1.13 y una desviación de 0.12%

3.3. Generación de las diferentes simulaciones

Se han simulado distintas monitorizaciones en las que se ha calculado como varía la concentración de COS a tiempo uno tras un cambio de gestión (Δ).

Estas simulaciones se han realizado ya que permiten la implementación de incrementos y errores conocidos.

En principio, se esperaría que la concentración a tiempo uno fuese la concentración de COS a tiempo más el incremento provocado por el Δ .

Esto no es así, ya que existen 3 factores que afectan a la monitorización de COS, estos son:

- En primer lugar, el error del método de laboratorio. Cuando se realiza un análisis usando un método de laboratorio siempre se comete un error provocado por el propio método, el cual no es 100% preciso. Este error lleva a obtener distintos resultados a la hora de analizar una misma muestra varias veces.

- En segundo lugar, la variabilidad del suelo. Todos los suelos tienen una variabilidad. Esta variabilidad conlleva que existan diferencias entre los diferentes puntos muestreados. Si un suelo tiene mucha variabilidad, existirán grandes diferencias en los resultados obtenidos para dos muestras cercanas. En cambio, si un suelo tiene poca variabilidad ocurriría lo contrario.

- Por último, la variabilidad de la aplicación del Δ . Existen cambios de gestión que son muy homogéneos y otros que son muy heterogéneos. Los Δ que son muy homogéneos provocarán un incremento similar en toda la zona de estudio. Mientras que si el Δ es muy heterogéneo va a provocar que los incrementos sean distintos en la zona de estudio. Que un Δ sea heterogéneo provoca que sea mucho más difícil poder detectar los cambios en el COS.

Estos 3 factores se han tenido en cuenta a la hora de simular la concentración de carbono orgánico del suelo a tiempo uno, ya que pueden interferir en la monitorización de los cambios producidos en el COS.

Para poder calcular cual va a ser la concentración de COS a tiempo 1 se ha usado esta fórmula:

$$t_1 = t_0 + (\sigma_{lab} + \sigma_{muestral} + \sigma_{efecto}) + \Delta$$

Donde:

- t_0 : Muestras a tiempo 0
- σ_{lab} : Error del método de laboratorio
- $\sigma_{muestral}$: Error producido por la variabilidad del suelo
- σ_{efecto} : Error producido por la variabilidad del cambio de gestión
- Δ : Efecto producido por el cambio de gestión
- t_1 : Muestras a tiempo 1

Suma de los errores

Para poder conocer cuáles son los errores que afectan a la monitorización. Se ha calculado cada error (método de laboratorio, variabilidad del suelo y variabilidad del efecto) en el apartado 3.4. Tras esto se ha procedido a la suma de los errores para poder obtener un rango para poder estudiar diferentes situaciones. La suma se ha realizado aplicando la siguiente fórmula:

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{laboratorio}^2 + \sigma_{muestral}^2 + \sigma_{efecto}^2}$$

Para calcular la desviación mínima y la máxima se han tenido en cuenta las siguientes fórmulas:

$$\sigma_{total\ min} = \sqrt{\sigma_{lab\ min}^2 + \sigma_{muestral\ min}^2 + \sigma_{efecto\ min}^2}$$

$$\sigma_{total\ máx} = \sqrt{\sigma_{lab\ máx}^2 + \sigma_{muestral\ máx}^2 + \sigma_{efecto\ máx}^2}$$

Tras la suma se obtienen estas desviaciones máxima y mínima:

$\sigma_{total\ min}$	$\sigma_{total\ máx}$
0.0024	0.605

Tabla 2: Resultados mínimo y máximo de la suma de los errores

Con estas 2 σ máxima y mínima se ha calculado un rango de 9 desviaciones distintas. Esto permitirá poder analizar diferentes situaciones que pueden ocurrir durante la monitorización de COS.

Las simulaciones se han generado teniendo en cuenta:

En primer lugar, las 100 muestras a tiempo cero (t_0). Tras esto se han generado 1000 valores aleatorios con una media de 0 y su desviación (corresponde a los valores de σ calculados anteriormente) para cada una de las 100 muestras a t_0 . Por último, se ha aplicado un incremento provocado por el cambio de gestión (Δ).

$$t_1 = t_0 + (\sigma_{total}) + \Delta$$

A continuación, se muestran dos figuras en las que se ha representado como afectan los errores y los efectos que provocan los Δ a muestras a tiempo cero.

En la figura 4 se puede observar, como afectan los errores a la muestra a tiempo cero. En primer lugar, la línea negra representa una situación en la que no hubiese ningún tipo de variabilidad del suelo, esta situación sería una situación perfecta para poder observar si ha habido cambios a tiempo uno. Esta situación es imposible que suceda en la realidad. La línea azul

representa un suelo estudiado, el cual tiene una variabilidad. La línea naranja representa una situación de monitorización en la que se han contabilizado errores pequeños como pueden ser por el uso de métodos de laboratorio efectivos. Por último, la línea verde representa una situación en la que la muestra a tiempo cero ha sido analizada por métodos de laboratorio poco efectivos, esto provoca que el error sea mayor y que la probabilidad de detectar los cambios en la concentración de carbono orgánico del suelo sea mucho menor.

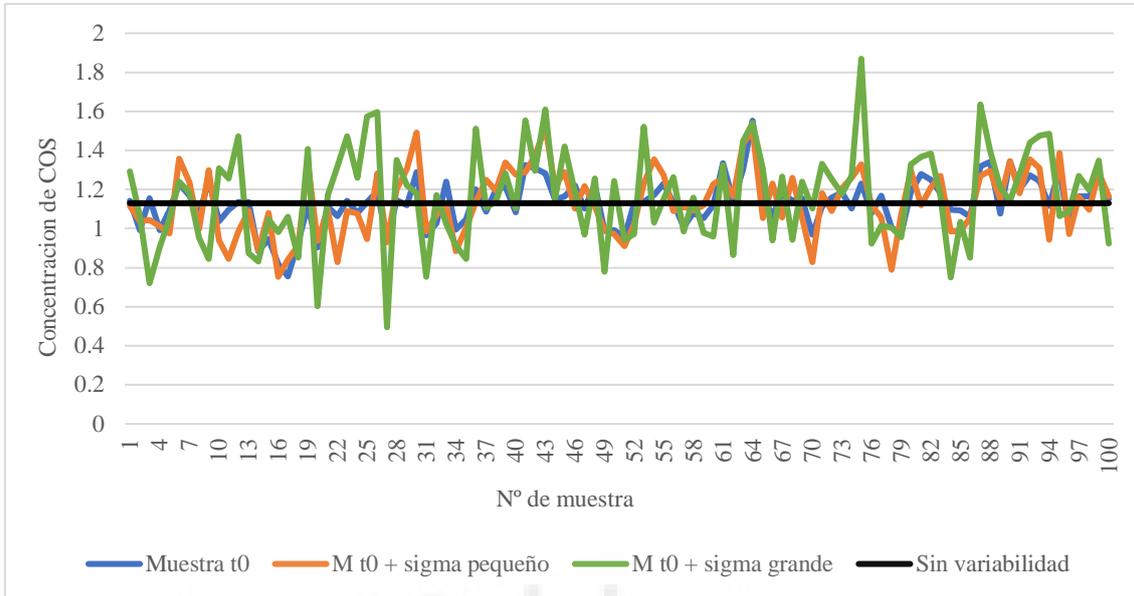


Figura 4. Comparación de dos errores sobre una muestra a tiempo 0 y una muestra en la que no existe ningún tipo de variabilidad.

En la figura 5 se puede observar el efecto que producen los Δ de COS en una muestra a tiempo cero. En primer lugar, en la línea naranja, podemos observar que un efecto pequeño apenas provoca incrementos sobre la muestra t_0 , esto afectará a la probabilidad de encontrar cambios entre las muestras a tiempo cero y tiempo uno. En segundo lugar, la línea verde representa un método de mejora muy efectivo, el cual provoca un gran aumento de la concentración de COS, esta situación será beneficiosa para la monitorización ya que permitirá encontrar cambios entre las muestras comparadas más fácilmente.

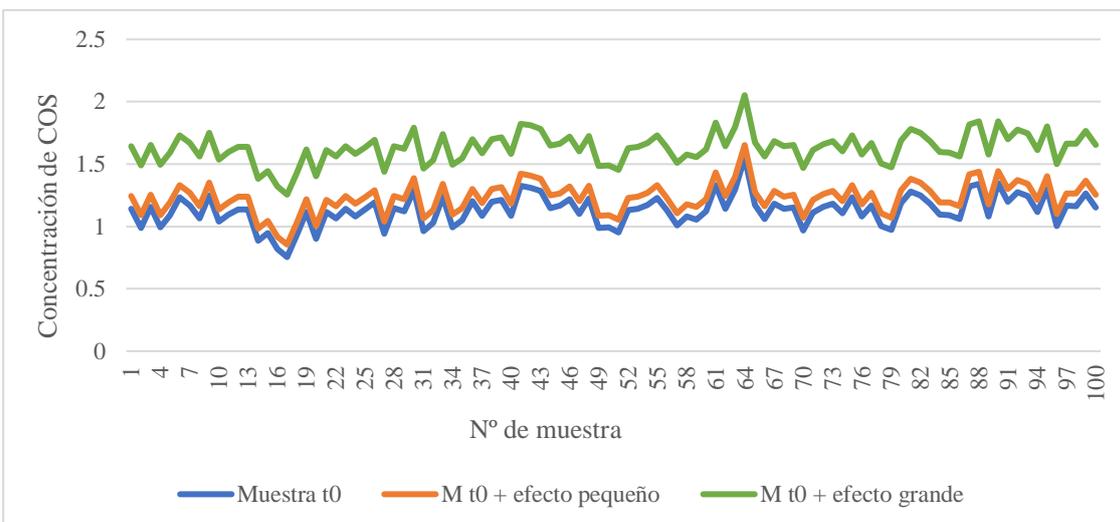


Figura 5. Comparación de dos efectos homogéneos constantes y sin variabilidad sobre una muestra a tiempo 0.

3.4. Cálculo de los errores

3.4.1. Error del método de laboratorio.

El error del método de laboratorio se debe principalmente a la precisión del propio método. Existen métodos muy precisos como es en el caso del método Walkley-Black, o métodos menos precisos como el método del Infrarrojo Cercano (NIR)

La elección del método de laboratorio se debe básicamente al presupuesto del trabajo que se va a realizar, ya que los métodos más precisos son mucho más caros.

Para calcular el error del método de laboratorio, se ha realizado un análisis del carbono orgánico obtenido en muestras recogidas anteriormente en la zona de estudio, estas muestras han sido analizadas por el método de laboratorio Walkley-Black.

Tras usar el método Walkley-Black, se ha calculado la concentración de COS empleando la siguiente fórmula:

$$\% C \text{ Organico} = \frac{(V - V') \cdot N \cdot F \cdot 0.39}{\text{Peso muestra (g)}}$$

Donde:

- V: Volumen medio de los blancos (ml)
- V': Volumen sal de Mohr usada (ml)
- N: Normalidad de la Sal de MOHR
- F: Factorización de la Sal de MOHR
- Peso muestra: Peso de la muestra en gramos

Cada muestra se ha analizado 3 veces para poder obtener mayor precisión en la concentración de COS. Se ha calculado la desviación existente entre los resultados de las 3 repeticiones de cada muestra. Por último, se ha realizado el promedio de todas las desviaciones calculadas en el paso anterior, obteniendo así el error del método de laboratorio.

Tras esto se ha realizado se ha calculado el 25 % por encima y por debajo del resultado obtenido. Esto es útil, ya que permite obtener un rango del que se sacarán todas las sigmas a estudiar.

3.4.2. Efecto de la Variabilidad

El error del muestreo o efecto de la variabilidad se debe principalmente a las propiedades del suelo, ya que se caracterizan por tener una gran variabilidad. Esto complica la estimación de los parámetros de la población. Para poder solucionar el error provocado por la variabilidad se deberá de tomar un numero de muestras adecuado el cual pueda representar de forma fiable a la población.

Para poder calcular el efecto que tiene la variabilidad sobre las muestras recogidas y estudiadas, se ha llevado a cabo un estudio de la desviación que existe entre la concentración de carbono orgánico de las muestras que se han recogido a una distancia de 2 metros.

Tras conocer cuál es la concentración de carbono orgánico en cada punto muestreado, se ha calculado la desviación entre las muestras de los puntos situados a 2 metros de distancia, ya que esta es la distancia más pequeña entre los diferentes puntos muestreados. Una vez calculadas todas las desviaciones se calcula el promedio de todas.

Por último, se ha calculado al igual que en el apartado anterior el 25% por encima y por debajo del resultado obtenido para así poder obtener un rango máximo y mínimo.

3.4.3. Variabilidad del efecto

La variabilidad del efecto se basa en que el incremento que provoca el cambio de gestión no va a ser uniforme en toda la zona de estudio.

Es muy difícil conocer cuál va a ser el verdadero efecto que se va a producir en el suelo, debido a la variabilidad.

Para poder obtenerlo, se ha realizado un promedio entre el error del método de laboratorio que hemos calculado previamente y el efecto de la variabilidad o error muestral que se ha calculado.

Con el resultado obtenido se ha calculado el 25 % por encima y por debajo para obtener un rango máximo y mínimo.

3.5. Comparación estadística

Se han comparado estadísticamente las muestras a tiempo 0 y a tiempo 1, gracias al uso de dos métodos.

- La prueba t de Student
- La diferencia mínima detectable

3.5.1. Prueba t de Student

Para poder calcular la prueba t de Student es necesario formular dos hipótesis, la hipótesis nula y la hipótesis alternativa.

Las hipótesis propuestas han sido:

H_0 : Prueba t > 0.05. No existe diferencia entre las medias t_0 y t_1

H_a : Prueba t \leq 0.05. Existe diferencia entre las medias t_0 y t_1 .

Se ha calculado la significancia de la prueba t de Student para conocer si la hipótesis nula se rechaza o no se rechaza. Se han tenido en cuenta dos métodos distintos para calcular la significancia, estos métodos son:

- Prueba t de Student para muestras no pareadas
- Prueba t de Student para muestras pareadas

Se han calculado los resultados para diferentes tamaños muestrales:

- 100 muestras
- 25 muestras

Cuando el resultado de la prueba t es menor que 0.05 (nivel de confianza) se rechaza H_0 y se considera que la diferencia de medias a tiempo 0 y a tiempo 1 es estadísticamente significativa.

Tras esto, se ha calculado la prueba t para cada uno de los 1000 casos estudiados. Por último, se ha calculado el porcentaje de simulaciones en las que el resultado es estadísticamente significativo.

Prueba t de Student para métodos pareados

Para poder calcular la significancia de las pruebas t de Student para las muestras por el método pareado, se ha usado esta fórmula:

$$t = \frac{\overline{x_D}}{\frac{S_D}{\sqrt{n}}}$$

- t : t de student para muestras pareadas
- X_D : Media de las diferencias
- S_D : Desviación estándar de las diferencias
- n : Numero de pares de observaciones

Prueba t de Student para métodos no pareados

Para poder calcular la prueba t de Student para muestras no pareadas, se ha usado esta fórmula:

$$t = \frac{\overline{x_1} - \overline{x_2}}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1) \cdot S_1^2 + (n_2 - 1) \cdot S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}}$$

Donde:

- t : t de student para muestras no pareadas
- $\overline{x_1}$ y $\overline{x_2}$: Medias de cada muestra
- n_1 y n_2 : Tamaño de las muestras t_0 y t_1
- S_1^2 y S_2^2 : Varianzas de las muestras t_0 y t_1

3.5.2. Diferencia Mínima Detectable.

La Diferencia Mínima Detectable (DMD) es una medida de la diferencia entre las medias de dos muestras, una a tiempo 0 y otra a tiempo 1 (Duquesne *et al.*, 2020). Este método se usa para conocer si es posible detectar si se ha producido un cambio estadísticamente significativo entre las dos medias.

La DMD se ha calculado para dos tamaños muestrales (100 muestras y 25 muestras) y para métodos pareados y no pareados.

Se han comparado las concentraciones obtenidas para las muestras a tiempo cero y a tiempo uno.

Tras esto, se ha calculado la DMD para cada uno de los 1000 casos estudiados. Por último, se ha calculado el porcentaje de simulaciones en las que la diferencia entre la concentración a tiempo cero y a tiempo uno es mayor que la DMD obtenida, debido a que en estas situaciones se van a poder observar los cambios producidos en la concentración de COS.

Diferencia Mínima Detectable para Métodos Pareados.

Para poder calcular la Diferencia Mínima Detectable para Métodos Pareados se ha empleado esta fórmula (G*Power, 2017):

$$\Delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \sigma_z^2 \cdot (z_{\alpha/2} + z_{\beta})^2}{N}}$$

- Δ es la Diferencia Mínima Detectable.
- σ_z es la desviación estándar
- z son los valores de la distribución t asociada a los grados de libertad.
- α y β son los niveles de seguridad.
- N es el número de muestras total.

La siguiente formula se ha usado para poder calcular la desviación estándar de la diferencia:

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2\rho_{xy} \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y}$$

Donde:

- σ_z : desviación estándar de la diferencia
- σ_x ; σ_y : desviaciones estándar de cada grupo muestral
- ρ_{xy} : coeficiente de correlación

Diferencia Mínima Detectable para Métodos No Pareados.

Para calcular la DMD para Métodos No Pareados, la fórmula usada ha sido la siguiente (G*Power Manual, 2017):

$$\Delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \sigma^2 \cdot (z_{\alpha/2} + z_{\beta})^2}{N}}$$

Donde:

- Δ es la Diferencia Mínima Detectable.
- σ es el promedio de las desviaciones estándar a tiempo 0 y tiempo 1.
- z son los valores de la distribución t asociada a los grados de libertad.
- α y β son los niveles de seguridad.
- N es el numero de muestras de un solo grupo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las figuras 7 y 8 se observa el porcentaje de simulaciones con diferencia estadísticamente significativas para los diferentes incrementos estudiados, para cada error y para un tamaño muestral grande (100 muestras). De manera general, como es esperable, a efectos grandes el porcentaje de simulaciones significativas aumenta. En cuanto a los errores, con el aumento de estos el porcentaje de muestras significativas se reduce. Por último, se observa que los errores no actúan de igual manera, ya que para un mismo efecto se obtienen porcentajes distintos para cada error.

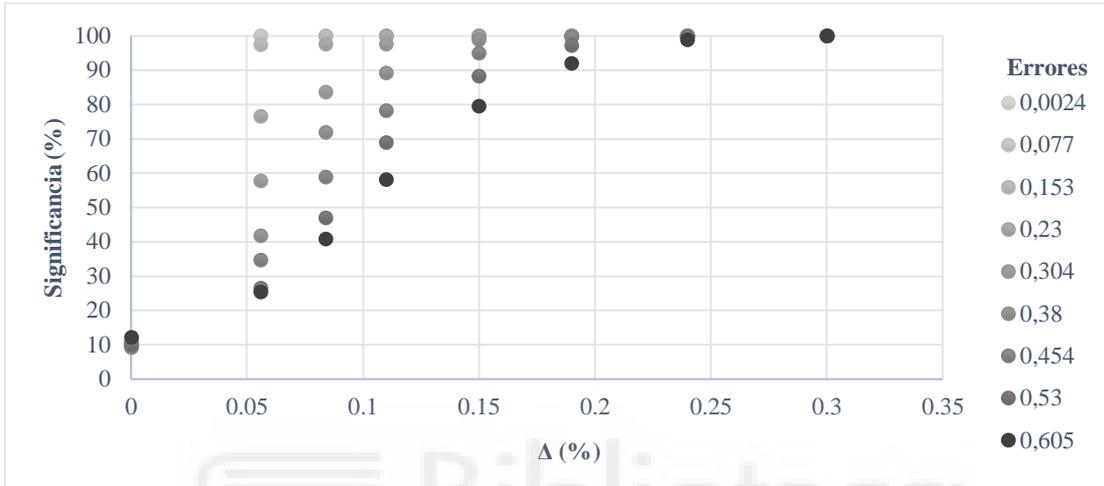


Figura 7. Comparación de la significancia de los diferentes incrementos para 100 muestras pareadas y los distintos errores estudiados.

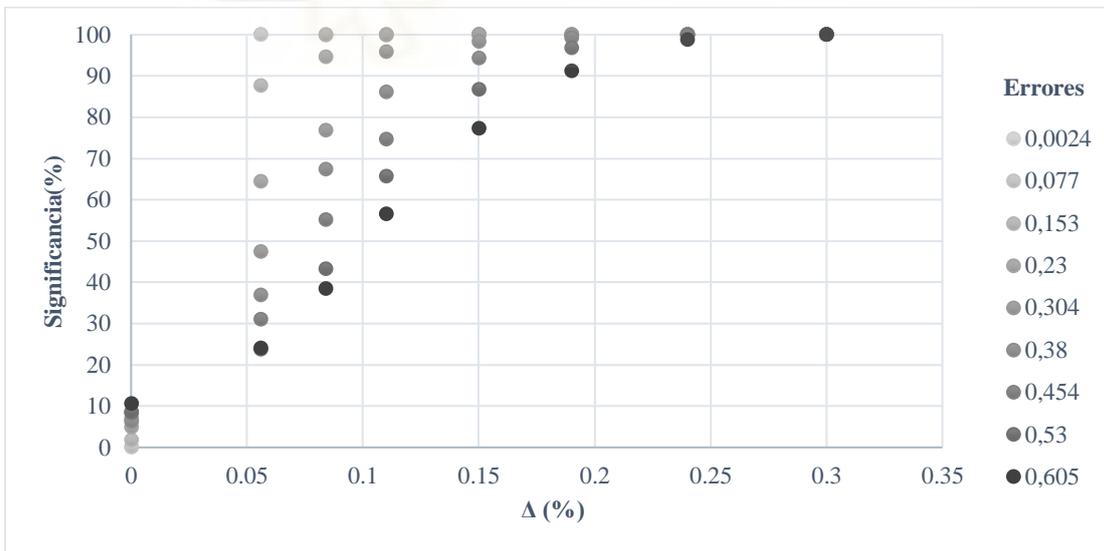


Figura 8. Comparación de la significancia de los diferentes incrementos para 100 muestras no pareadas y los distintos errores estudiados.

En las figuras 9 y 10 se observa el porcentaje de simulaciones significativas para los Δ estudiados, los diferentes errores y un tamaño muestral pequeño (25 muestras). De manera general, se observan patrones similares a las figuras 7 y 8.

En comparación con las figuras 7 y 8 se puede observar que el porcentaje de muestras significativas para los mismos sigmas y efectos provocados por los Δ es mucho menor en este caso, que, en las dos figuras anteriores. Esto se debe a la diferencia entre el tamaño muestral de las figuras.

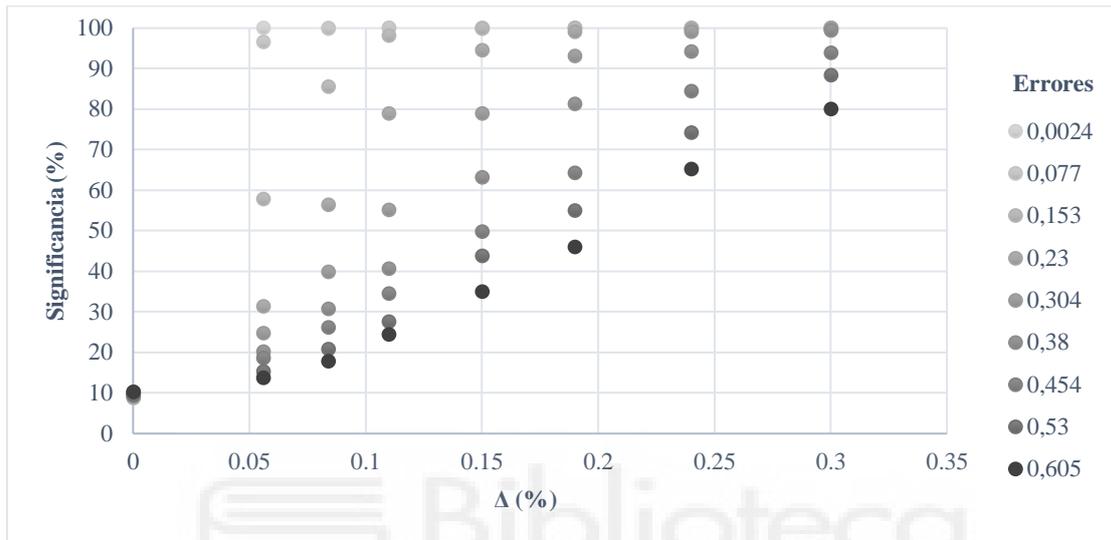


Figura 9. Comparación de la significancia de los diferentes efectos para 25 muestras pareadas y los distintos errores estudiados.

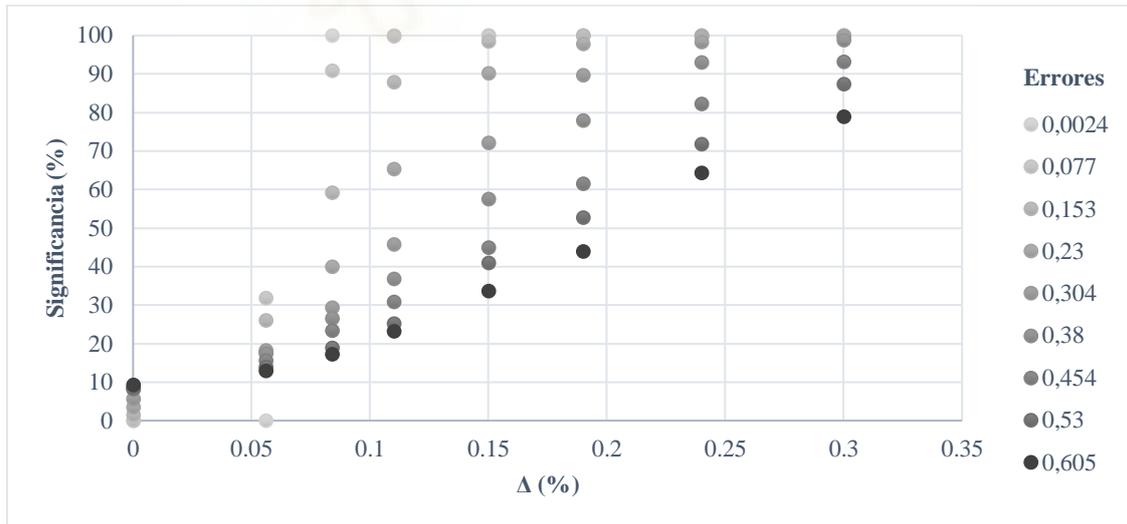


Figura 10. Comparación de la significancia de los diferentes efectos para 25 muestras no pareadas y los distintos errores estudiados.

Respecto a los errores, durante una monitorización de COS, se pueden dar dos casos distintos:

En primer lugar, una situación beneficiosa en la que los errores sean pequeños. Este sería el caso de usar un método de laboratorio muy preciso (Walkley-Black), de que la zona estudiada tenga poca variabilidad o de que el cambio de gestión aplicado provoque un incremento homogéneo en toda la zona de estudio.

En segundo lugar, una situación perjudicial en la que los errores sean grandes. Estos errores grandes están provocados por el uso de métodos de laboratorio poco precisos como el método del infrarrojo cercano (NIR), porque la zona de estudio es una zona con mucha variabilidad o por que el cambio de gestión genere un efecto muy heterogéneo.

En cuanto a los incrementos provocados por los Δ , se pueden dar dos casos distintos:

- Que los Δ sean muy efectivos y provoquen un gran cambio en la concentración de COS. Como es en el caso del uso de cubiertas vegetales, la aplicación de residuos de algunas cosechas como la paja y los rastrojos o la rotación de diferentes cultivos. Estas medidas favorecerán la monitorización del COS, ya que el aumento que producen en la concentración de este es muy grande.
- Que los Δ sean poco efectivos y provoquen un cambio muy pequeño en la concentración de COS. Como sucede en el caso de los cultivos herbáceos en sistemas ecológicos o en rotaciones de cultivos de cebada-veza. Al producir un cambio muy pequeño en la concentración de COS las muestras a tiempo 1 serán parecidas a las de tiempo 0, por lo tanto, será muy difícil observar los cambios producidos.

A continuación, se han mostrado una serie de gráficos en los que se ilustra parte de los resultados anteriores para poder facilitar su visualización.

En las figuras 11, 12 y 13 se ha representado el porcentaje de simulaciones significativas para los distintos errores estudiados, un mismo Δ y dos tamaños muestrales distintos (100 y 25 muestras).

En la figura 11 el Δ aplicado ha sido muy pequeño (0.084). Esto lleva a que con errores grandes el porcentaje de simulaciones significativas se reduzca en gran cantidad, como sucede en el caso del error más grande (0.6), en el cual se obtiene un 41% para 100 muestras y un 18% para 25 muestras.

En la figura 12 se ha aplicado un Δ medio (0.15). En este caso se observa un mayor número de simulaciones significativas que en la figura anterior, ya que el incremento que provoca Δ es mayor. Se observa como a partir de un error de 0.3 las diferencias entre los dos tamaños muestrales se van haciendo mayores, alcanzando un porcentaje de simulaciones significativas muy bajo (35%) cuando el error es muy grande para el menor tamaño muestral.

Por último, en la figura 13 el Δ aplicado es el incremento más grande estudiado (0.3). Debido a que el cambio de gestión aplicado ha sido uno que provoca un gran efecto, se observan porcentajes muy altos independientemente de los errores que afecten a la monitorización.

En cuanto al tamaño muestral, se observan grandes diferencias entre los resultados obtenidos para un tamaño muestral grande y un tamaño muestral pequeño. Se han obtenido mayor porcentaje de simulaciones significativas para el mayor tamaño muestral. Esto se debe a que con mayor cantidad de muestras se obtiene una mayor precisión.

En el caso de que el Δ aplicado cause un gran efecto sobre el COS las diferencias entre el porcentaje de simulaciones significativas entre 100 y 25 muestras se van a reducir excepto en los casos donde el error sea demasiado grande.

En las figuras se observa que las diferencias entre el tamaño muestral se ven menos afectadas por los errores si el cambio de gestión aplicado provoca un incremento mayor. Por ejemplo, en la figura 11 se aprecian diferencias entre los resultados de los dos tamaños muestrales para un error de 0.157. Mientras que en la figura 13, no se observan diferencias en los resultados obtenidos hasta que el error es de 0.38.

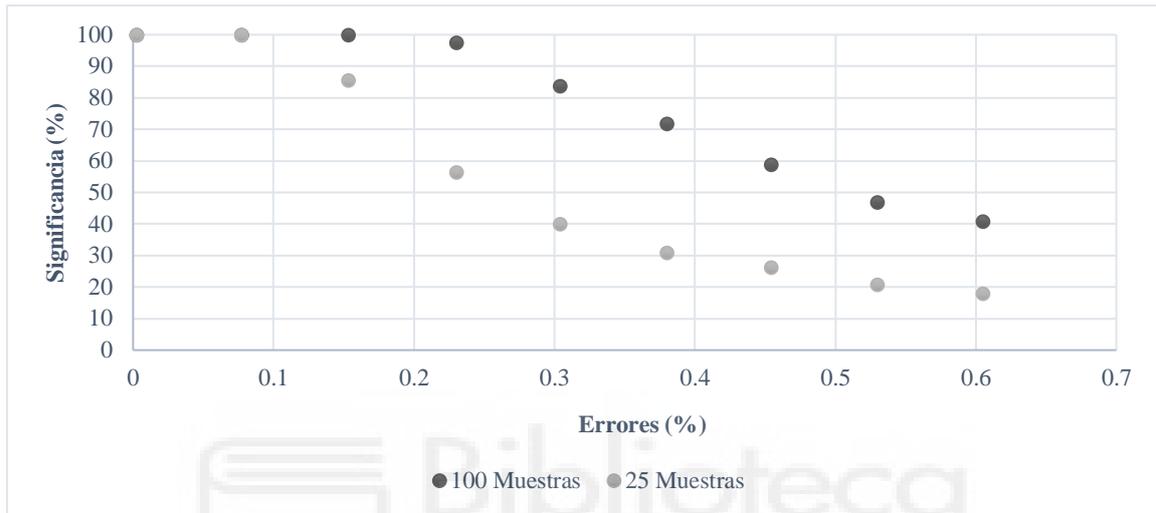


Figura 11. Comparación de la significancia de un efecto pequeño (0,084) sobre los diferentes errores estudiados en dos tamaños muestrales distintos (100 y 25 muestras) analizadas por un método pareado.

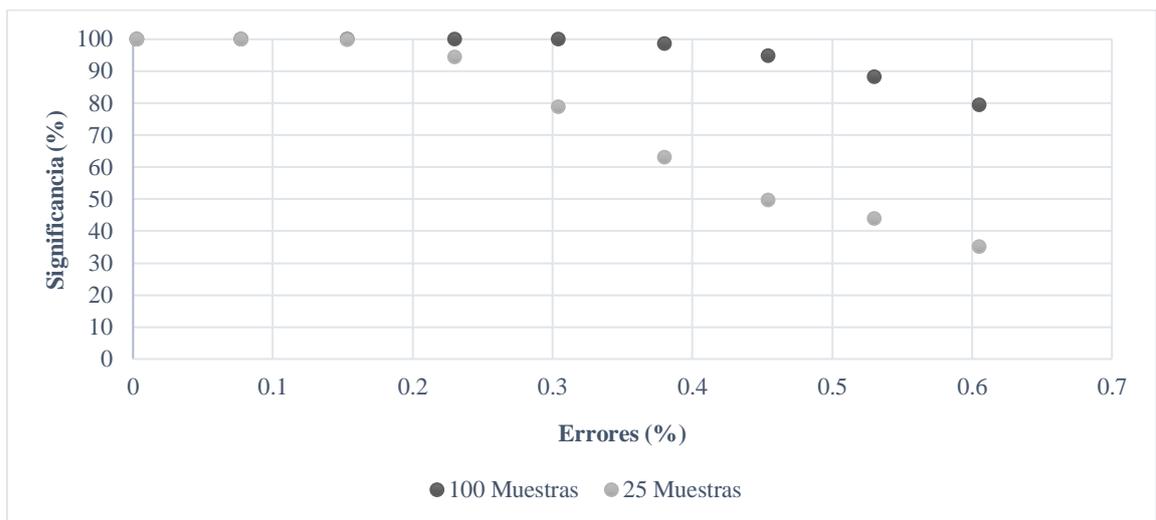


Figura 12. Comparación de la significancia de un efecto medio (0,15) sobre los diferentes errores estudiados en dos tamaños muestrales distintos (100 y 25 muestras) analizadas por un método pareado.

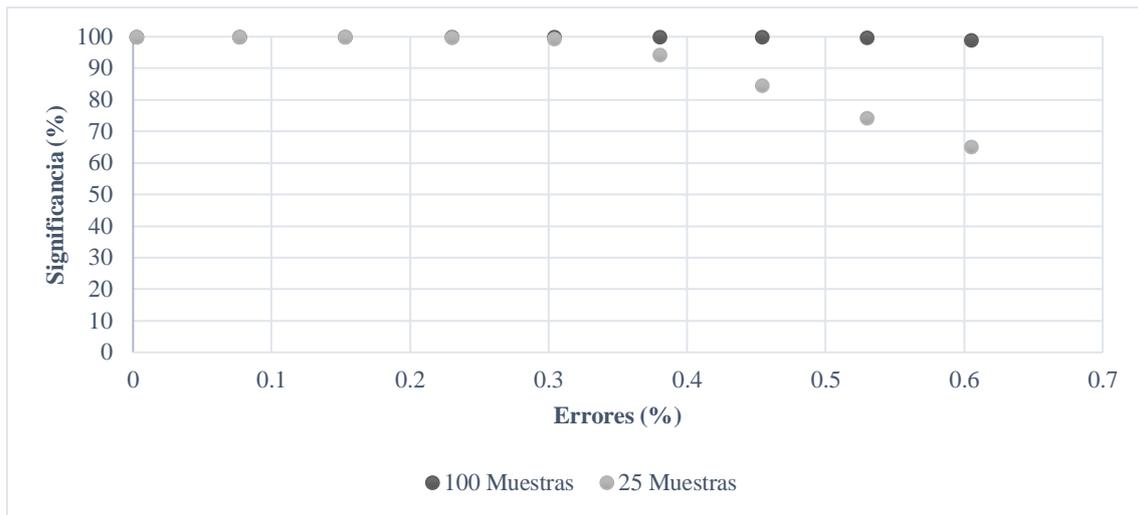


Figura 13. Comparación de la significancia de un efecto grande (0,24) sobre los diferentes errores estudiados en dos tamaños muestrales distintos (100 y 25 muestras) analizadas por un método pareado.

Se ha comparado el efecto que provoca el uso de dos métodos de análisis distintos, el método pareado y el método no pareado. Analizando que método es mas efectivo a la hora de obtener un mayor porcentaje de simulaciones significantes.

En las figuras 14 y 15 se ha representado el porcentaje de simulaciones significantes en función de los distintos Δ estudiados, para dos errores y dos métodos distintos (método pareado y no pareado). De forma general, se observa un patrón ascendente con el aumento de los Δ .

En la figura 14 se ha aplicado un error pequeño (0.23). Esto permite que se alcancen altos porcentajes de simulaciones significantes con Δ pequeños.

Al contrario que en la figura 15, en la que se ha aplicado un error grande (0.53) el cual afecta a la capacidad de alcanzar porcentajes altos, a no ser que se hayan aplicado Δ grandes.

En cuanto a la diferencia observada entre el uso de métodos pareados y no pareados, se observa que en la figura 14 la distancia entre los resultados de los dos métodos es grande, observando porcentajes mayores para el método pareado. Esto se debe a que en este caso se ha estudiado una zona con poca variabilidad, es decir, con un error pequeño. Que la variabilidad sea pequeña favorece el uso de métodos pareados.

Mientras que en la figura 15, se ha estudiado una zona con mucha variabilidad. El aumento de los errores lleva a que la diferencia entre el uso de métodos pareados y no pareados se reduzca considerablemente, llegando a obtenerse mayores porcentajes para los métodos no pareados en situaciones en la que existe mucha variabilidad.

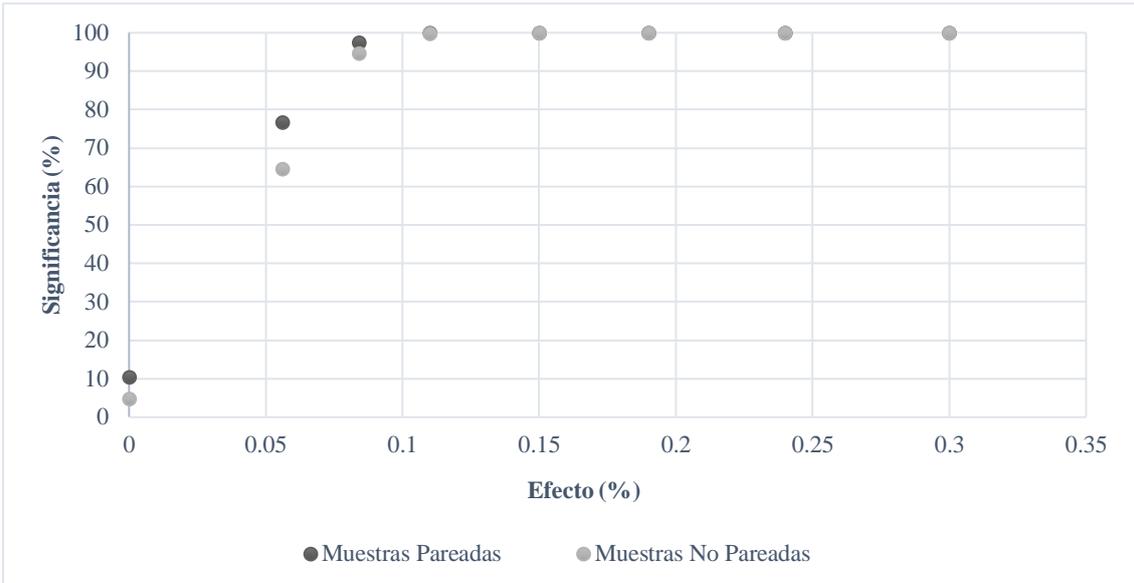


Figura 14. Análisis del porcentaje de muestras significativas de los diferentes efectos estudiados sobre un mismo error (0.23) y comparación del análisis de las muestras por métodos pareados o no pareados.

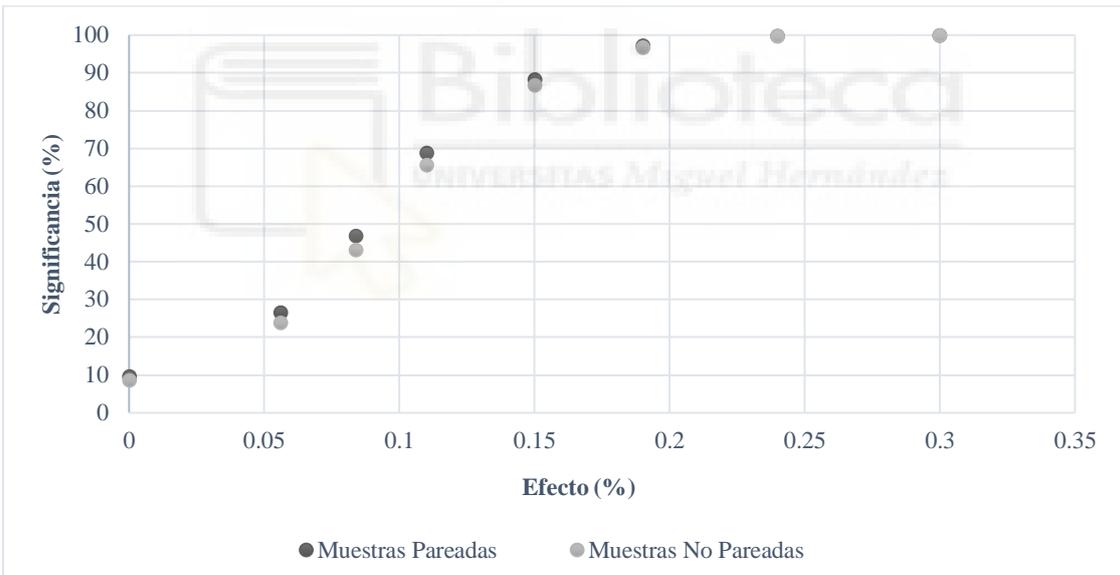


Figura 15. Análisis del porcentaje de muestras significativas de los diferentes efectos estudiados sobre un mismo error (0.53) y comparación del análisis de muestras por métodos pareados o no pareados.

Por último, se ha estudiado la importancia de la diferencia mínima detectable (DMD) en la monitorización del COS.

En la figura 16 se observa el tamaño muestral necesario en función del poder estadístico, para diferentes incrementos estudiados. A grandes rasgos, se observa una tendencia ascendente para el tamaño muestral en función del poder estadístico deseado. Se observa que si se necesita alcanzar poderes estadísticos altos va a ser necesario obtener un mayor tamaño muestral que en el caso de los poderes estadísticos bajos.

Con incrementos pequeños se reduce la posibilidad de encontrar cambios en la concentración de COS. Esto se debe a que sería necesario obtener tamaños muestrales excesivamente grandes para poder detectar los cambios, lo que conllevaría un incremento del coste de realizar el trabajo.

En este trabajo se han estudiado dos tamaños muestrales: 100 y 25 muestras.

En el caso de las 100 muestras, si el poder estadístico deseado para el trabajo fuese del 95%. Solo se podrían detectar los incrementos gris, amarillo y verde. Esto se debe a que son los únicos incrementos que para un poder del 95% se encuentran por debajo de las 100 muestras.

En el caso de 25 muestras, sería imposible detectar estos incrementos con un poder estadístico tan alto. En cambio, se podrían detectar el incremento amarillo y verde si se redujese el poder estadístico hasta un 80%.

Las situaciones en las que la diferencia mínima detectable sea pequeña serán casos en los que se reúnan una serie de condiciones, estas condiciones son:

- Tener un tamaño muestral grande
- Usar métodos de análisis efectivos (error de laboratorio bajo)
- Tener una variabilidad del suelo muy homogénea (error de muestreo bajo)
- El efecto tiene que ser muy homogéneo en toda la zona estudiada (error de efecto bajo)

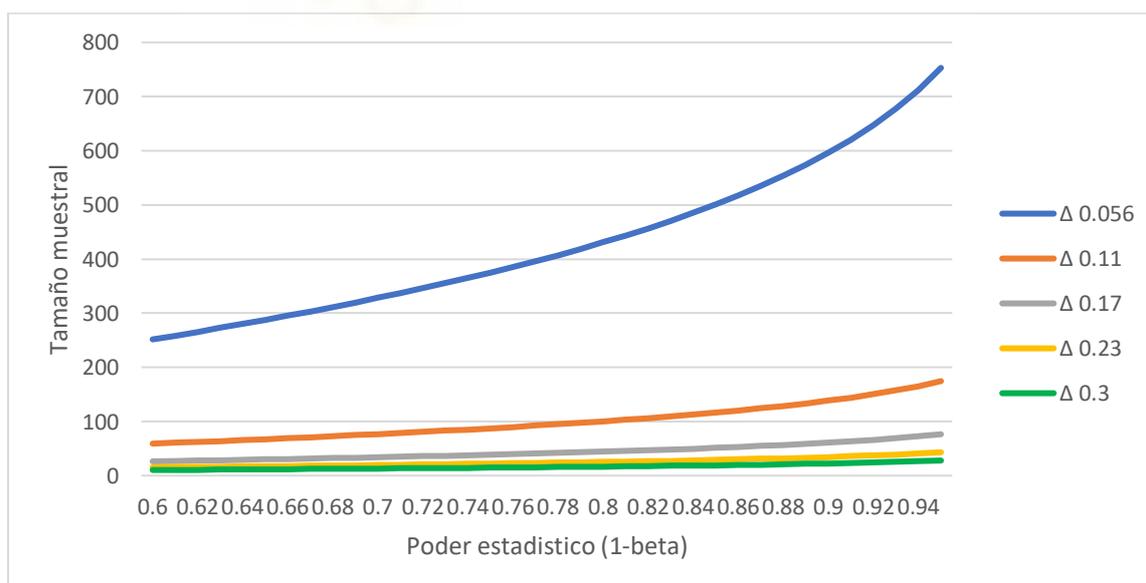


Figura 16. Análisis del tamaño muestral y el poder estadístico para la obtención de la diferencia mínima detectable (Δ) en muestras pareadas con un error de 0.23.

5. CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Los errores se pueden compensar aumentando el tamaño muestral. Esto conllevará el encarecimiento del coste de la investigación y también el tiempo.
- Dependiendo de la variabilidad existente en la zona de estudio, se deberá elegir entre el uso de métodos pareados y no pareados para el estudio.
- El uso de métodos de análisis poco precisos se puede ver compensado con la aplicación de un cambio de gestión muy efectivo. Esto permitirá que la diferencia entre la concentración a tiempo 0 y a tiempo 1 sea muy grande y más fácil de detectar.
- En zonas con mucha variabilidad, se deberán aplicar cambios de gestión muy efectivos o usar métodos de análisis de laboratorio muy precisos para poder observar los cambios producidos en la concentración de COS.



6. PROYECCIÓN FUTURA

Se ha planteado la siguiente perspectiva futuras:

- Realizar simulaciones usando muestras a tiempo cero de suelos con características distintas a las estudiadas en este trabajo.

7. REFERENCIAS

- **Baldocchi, D; Ryu, Y; Keenan, T.** (2016). Terrestrial Carbon Cycle Variability [versión 1; referees: 2 approved]. F1000Research, Issue 5.

- **Berner, R. A.** (2003). The long-term carbon cycle. fossil fuels and atmospheric composition. Nature 426:323-326.

- **Duquesne, S; Alalouni, U; Gräff, T. et al.** (2020). Better define beta–optimizing MDD (minimum detectable difference) when interpreting treatment-related effects of pesticides in semi-field and field studies. Environ Sci Pollut Res 27, 8814–8821

- **E. Reichle, D.** (2020). The Global Carbon Cycle and Climate Change.

- **FAO.** (2017). Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. Roma, Italia.

- **FAO y GTIS.** (2015). Estado Mundial del Recurso Suelo (EMRS). Resumen técnico. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura y Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo, Roma, Italia.

- **Grace, J.** (2004), Understanding and managing the global carbon cycle. Journal of Ecology, 92: 189-202.

- **G*Power Manual.** (2017).

- **Le Quéré, C; Andrew, R. M; Canadell, J. G; Sitch, S; Korsbakken, J. I; Peters, G. P; Manning, A. C; Boden, T. A; Tans, P. P; Houghton, R. A; Keeling, R. F; Alin, S; Andrews, O. D; Anthoni, P., Barbero, L; Bopp, L; Chevallier, F; Chini, L. P; Ciais, P; Currie, K; Delire, C; Doney, S. C; Friedlingstein, P; Gkritzalis, T; Harris, I; Hauck, J; Haverd, V; Hoppema, M; Goldewijk, K. K; Jain, A. K; Kato, E; Körtzinger, A; Landschützer, P; Lefèvre, N; Lenton, A; Lienert, S; Lombardozzi, D; Melton, J. R; Metzl, N; Millero, F; Monteiro, P. M. S; Munro, D. R; Nabel, J. E. M. S; Nakaoka, S-I, O'Brien, K; Olsen, A; Omar, A. M; Ono, T; Pierrot, D; Poulter, B; Rödenbeck, C; Salisbury, J; Schuster, U; Schwinger, J; Séférian, R; Skjelvan, I; Stocker, B. D; Sutton, A. J; Takahashi, T; Tian, H; Tilbrook, B; van der Laan-Luijkx, I. T; van der Werf, G. R; Viovy, N; Walker, A. P; Wiltshire, A. J; Zaehle, S.** (2016). Global Carbon Budget 2016. Earth System Science Data, 8: 605-649.

- **Lorenz, K; Lal, R.** (2016). Environmental Impact of Organic Agriculture. Advances in Agronomy, 99–152.

- **Ministerio de agricultura y pesca, alimentación y medio ambiente.** (2018). “Iniciativa 4 por mil: el carbono orgánico del suelo como herramienta de mitigación y adaptación al cambio climático en España”

- **Naciones Unidas** (1992). Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático

- **Rodriguez Martin, J.A; Alvaro Fuentes, J; Gonzalo, J; Gil, C; Ramos Miras, J.J; Grau Corbí, J.M; Boluda, R.** (2016). Assessment of the soil organic carbon stock in Spain. *Geoderma* 264 (2016) 117-125.

- **Schmidt, M. W. I; Torn, M. S; Abiven, S; Dittmar, T; Guggenberger, G; Janssens, I. A; Kleber, M; Kögel-Knaber, I; Lehmann, J; Manning, D.A.C; Nannipieri, P; Rasse, D. P; Weiner, S; E. Trumbore, S. E.** (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478: 49-56.



ANEXOS

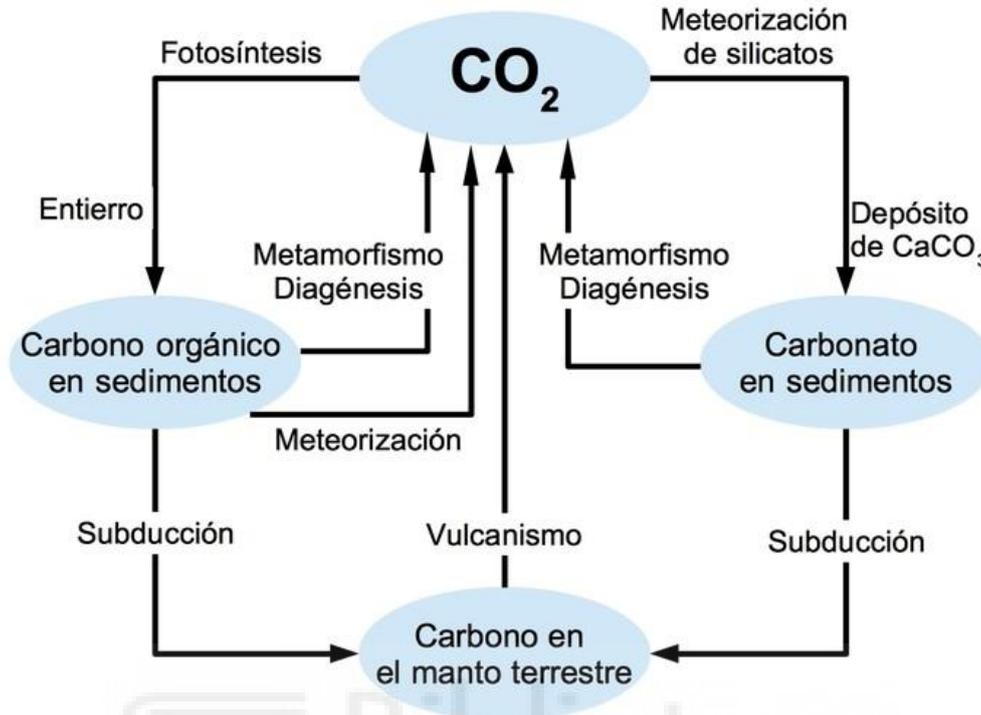


Figura 1. Ciclo geológico del carbono. Fuente: Berner, R. A. (2003)

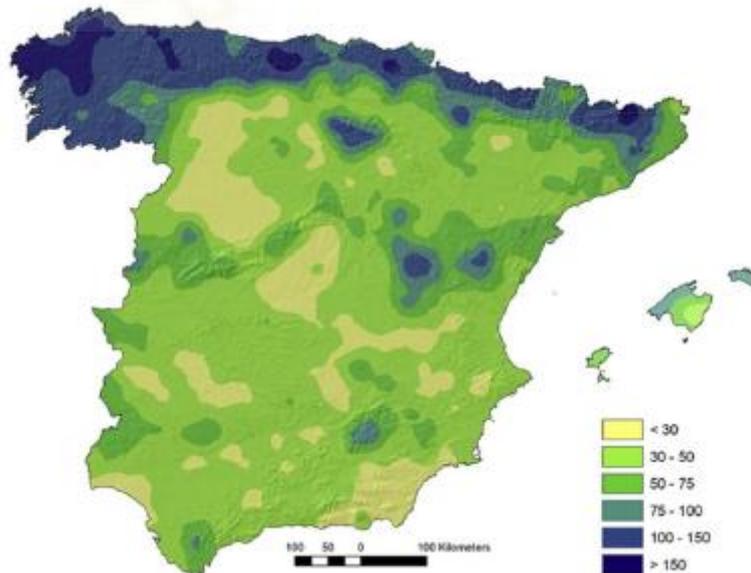


Figura 2. Concentración de Carbono Orgánico del suelo en España (mg/ha). Fuente: Rodríguez Martín et al. (2016).