



Muestreo en el campo de los sumideros de carbono en el suelo de ecosistemas costeros

CONSIDERACIONES GENERALES

Una vez que se hayan determinado los detalles del proyecto y los requisitos del muestreo, se puede comenzar el muestreo en el campo de los sumideros de carbono del ecosistema. Las técnicas de campo para medir la biomasa viviente aérea y subterránea en distintos ecosistemas varían según se trate de manglares, marismas o praderas de pastos marinos, y se describen en las secciones específicas sobre ecosistemas en el Capítulo 4. No obstante, las técnicas para muestrear el carbono contenido en suelos, que se analizan en este capítulo, pueden aplicarse por lo general a los tres ecosistemas. Es importante tener en cuenta que el carbono subterráneo a veces se denomina carbono del sedimento o carbono en el suelo. Para este documento, utilizamos estos términos indistintamente.

Los sumideros de carbono en el suelo, a menudo denominado carbono del suelo, con predominio principalmente de raíces vivas y en descomposición, rizomas y hojarasca, son por lo general los principales sumideros en ecosistemas costeros con vegetación. Medirlos es fundamental para determinar los cambios a largo plazo en las existencias de carbono asociados a perturbaciones, cambio climático y cambios en el manejo de la tierra. Los sumideros de carbono en el suelo constituyen desde el 50 % a más del 90 % de la existencia de carbono total en ecosistemas de manglares (Donato *et al.* 2011; Kauffman *et al.* 2011) (**Fig. 3.1**). El aporte proporcional del carbono en el suelo es a menudo mayor (>98 %) en las marismas (Johnson *et al.*, en prep.) y en los pastos marinos (Fourqurean *et al.* 2012a). A pesar de la importancia que tienen los sumideros de carbono en el suelo, son los que han sido menos estudiados. Esto se debe probablemente al carácter novedoso y al reconocimiento reciente de la trascendencia del carbono en el suelo en estos sistemas como una importante fuente de carbono a nivel global (Smith 1981; Chmura *et al.* 2003; Laffoley & Grimsditch 2009; Donato *et al.* 2011; Fourqurean *et al.* 2012a). Es importante tener en cuenta que la acumulación del carbono en el suelo lleva mucho tiempo y que es probable que los sumideros de carbono en el suelo en ecosistemas de carbono azul recientemente establecidos o restaurados no sean significativos durante muchos años.

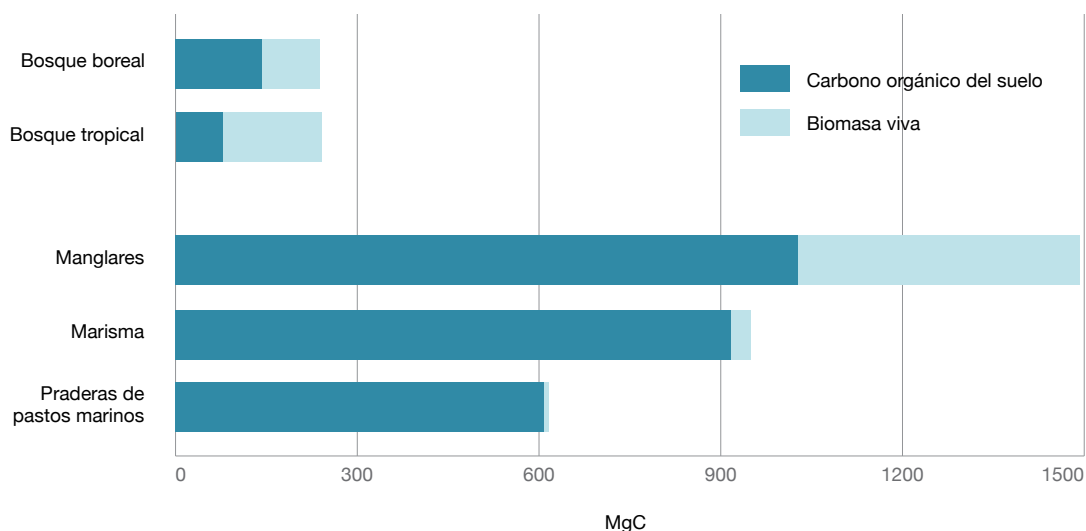


Figura 3.1 Almacenamiento promedio de carbono en la biomasa aérea y subterránea en ecosistemas costeros con vegetación versus bosque terrestre (Pan *et al.* 2011; Fourqurean *et al.* 2012a; Pendleton *et al.* 2012)

Todos los suelos contienen elementos tanto orgánicos como minerales. El porcentaje de cada uno es lo que determina que un tipo de suelo se clasifique como orgánico o mineral. Para este trabajo, los suelos orgánicos son aquellos formados por más de 20 % de materia orgánica, mientras que los suelos minerales son aquellos formados por menos de 20 % de materia orgánica (USDA 1999). Sin embargo, los criterios que aplican los edafólogos para definir los suelos como orgánicos y minerales son mucho más específicos que los que se presentan aquí y no se definen globalmente de manera uniforme. Los suelos ricos en materia orgánica se desarrollan donde hay altas tasas de enterramiento y

preservación de materia orgánica y bajas tasas de deposición de minerales/suelos. Los suelos ricos en minerales se desarrollan donde hay un importante flujo de sedimentos derivados de fuentes terrestres (por ejemplo, aportes de ríos), estuarios (por ejemplo, movimiento de sedimento a causa de las mareas) o de carbonato de calcio producido por organismos calcificantes (por ejemplo, conchas de moluscos). En general, los suelos orgánicos son de color oscuro y tienen una alta concentración de fragmentos vegetales en descomposición. Los suelos minerales son más arenosos y contienen más fragmentos de conchas (**Fig. 3.2**).



Figura 3.2 Ejemplos de suelo orgánico y mineral. (A) Suelo orgánico; Humedal Nacional Térraba Sierpe, Costa Rica (© Sarah Hoyt, CI). (B) Suelos (minerales) arenosos y arcillosos; Laguna Patos, sur de Brasil (Bruno Lainetti Gianasi, © Margareth Copertino, FURG)

La acumulación de carbono en suelos de bosques en tierras altas por lo general no supera los 30 cm y corresponde con la profundidad de las actividades antrópicas habituales que pueden afectar el sumidero del suelo (por ejemplo, arado). En consecuencia, muchas evaluaciones del carbono en bosques en tierras altas han limitado sus muestreos de suelos en el campo a una profundidad de 30 cm. Los manglares, las marismas y las praderas de pastos marinos a menudo presentan suelos ricos en materia orgánica con una profundidad de 10 cm a más de 3 m. Es probable que la perturbación de los suelos ricos en materia orgánica a causa del uso de la tierra y del cambio climático en ecosistemas costeros afecte las capas más profundas a través del drenaje, la oxidación, el colapso, el aumento del nivel del mar, etc. (Hoojoer *et al.* 2006; Pendleton *et al.* 2012). Por lo tanto, en los ecosistemas costeros es importante muestrear a mayores profundidades que en sus contrapartes terrestres (lo normal es una profundidad mínima de 1 m, pero son habituales profundidades entre 3 m y 5 m).

Para cuantificar con exactitud el sumidero de carbono en el suelo deben recolectarse núcleos de suelo, tomar submuestras de estos y analizarlos para una profundidad específica (por lo general 1 m). Deben cuantificarse tres parámetros para cada parcela, subparcela o sitio de recolección de núcleos para estimar el tamaño del sumidero de carbono en el suelo :

- 1) Profundidad del suelo.
- 2) Densidad aparente.
- 3) Contenido de carbono orgánico en el suelo (% C_{org}).

La profundidad del suelo se determina con una sonda destinada al efecto o durante el proceso de obtención de muestras y núcleos. La densidad aparente y el % C_{org} del suelo se utilizan para calcular la densidad de carbono. Debido a que la densidad aparente del suelo y el % C_{org} varían según la profundidad y la ubicación, no siempre existe un patrón coherente entre la densidad de carbono y la profundidad. En consecuencia, es fundamental recolectar y estudiar una cantidad adecuada de núcleos (1 por parcela, al menos 3 parcelas por estrato) para hacer una evaluación tridimensional de la existencia de carbono en cada estrato.

Tabla 3.1 Herramientas habitualmente necesarias para recolectar carbono en el suelo en el campo (**Fig. 3.3**, imágenes de las herramientas).

HERRAMIENTA	PROPÓSITO
Sonda de profundidad para suelos (optativa)	Medir la profundidad del suelo
Cinta métrica	Medir el grosor de la muestra de suelo y la profundidad a lo largo del núcleo
Cuchillo afilado o jeringa de 25 ml	Obtener submuestras del núcleo
Nucleador de suelos	Obtener núcleos del suelo (también puede utilizarse para determinar la profundidad del suelo)
GPS	Registrar la ubicación del sitio de extracción del núcleo
Bolsas de plástico para las muestras	Almacenar muestras
Utensilios para escribir a prueba de agua y cinta impermeables	Etiquetar muestras
Cámara	Documentar el aspecto de las muestras y su número

PROFUNDIDAD DEL SUELO

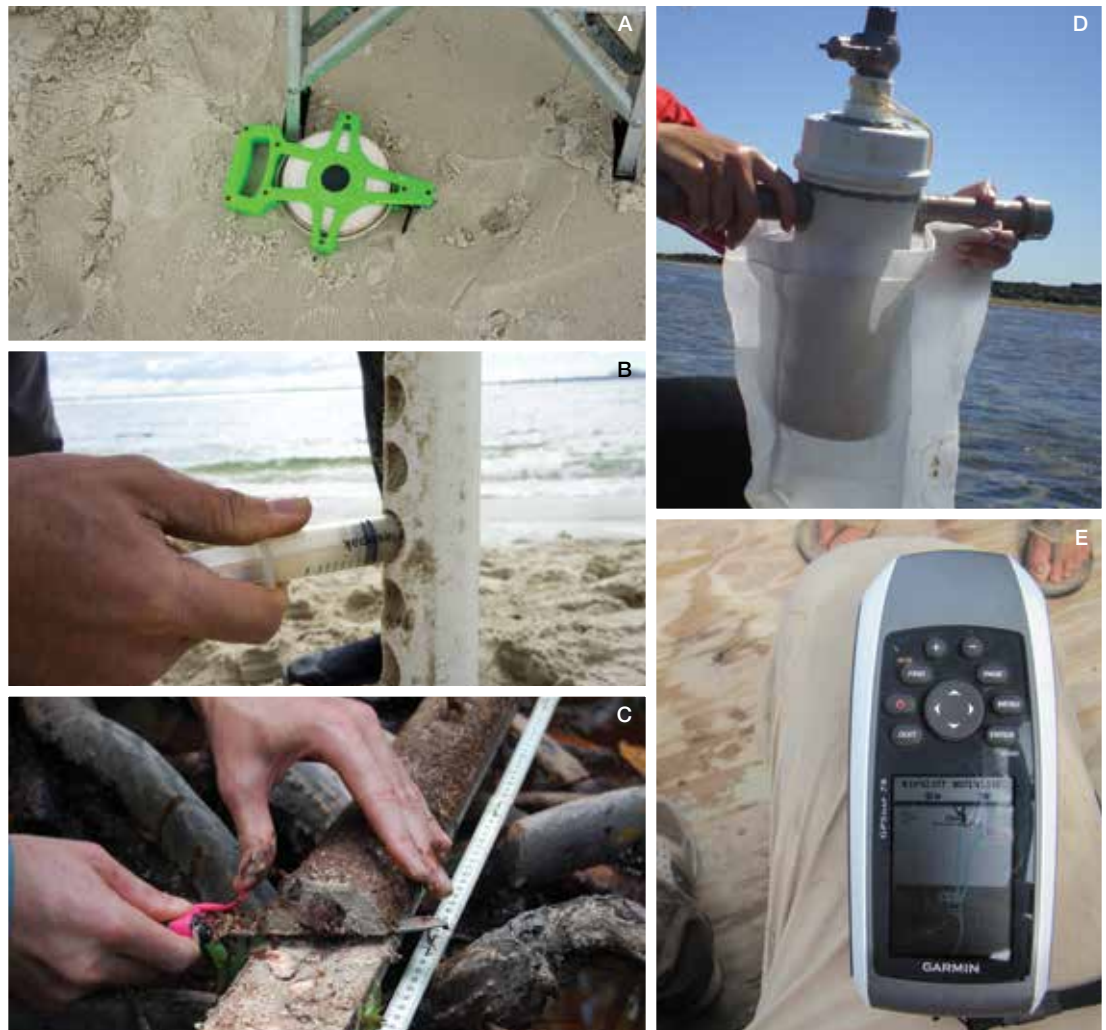


Figura 3.3 Herramientas habitualmente necesarias para recolectar muestras de carbono en el suelo en el campo. (A) Cinta métrica para medir la profundidad a lo largo del núcleo (© Sarah Hoyt, CI). (B) Jeringa para tomar submuestras del núcleo (© Sarah Hoyt, CI). (C) Cuchillo utilizado para tomar submuestras (© Boone Kauffman, OSU). (D) Bolsa para guardar el núcleo y las muestras (© Krishna Barros, UFC). (E) GPS para marcar la posición donde se recolectó el núcleo (© Boone Kauffman, OSU)

La capacidad de medir la profundidad del suelo depende de dos factores: 1) la naturaleza del suelo (mineral u orgánico) y 2) la profundidad del suelo relativa al equipo que se utiliza. Medir la profundidad del suelo es más difícil en suelos profundos (>5 m) ricos en minerales y más sencillo en suelos poco profundos (<5 m) ricos en materia orgánica (**Fig. 3.4**). En suelos orgánicos, la profundidad del suelo se define a menudo como la profundidad hasta la roca madre, tal como la roca de fondo u otro sustrato duro (arenas coralinas o minerogénicas). En ocasiones, es posible medir con exactitud la profundidad de un suelo orgánico con una sonda tal como una vara de bambú o una sonda de avalancha. Cuando sea posible, debería haber extensiones disponibles para asegurar que las varas penetren el suelo completamente. En muchos casos, la profundidad tope (es decir, la profundidad a la cual la vara no puede insertarse más) se considera una estimación razonable del grosor del suelo orgánico. La profundidad tope presupone que el suelo orgánico es generalmente más fácil de penetrar con una varilla que la arena o la roca de fondo subyacente. Debido a que la profundidad tope depende del diámetro de la vara y de la fuerza de quienes la utilizan, así como también de los cambios en los suelos subyacentes, es importante validar que la profundidad tope represente el grosor del suelo orgánico, al menos al principio, también mediante la obtención de núcleos de suelo. Si la profundidad tope corresponde al límite inferior del suelo como se ve en el núcleo, entonces el método de la vara es correcto. Es importante tener en cuenta que la presencia de raíces y fibras puede detener la penetración de la sonda de profundidad para suelos. Por lo tanto, es necesario medir la profundidad del suelo en distintos puntos al azar.

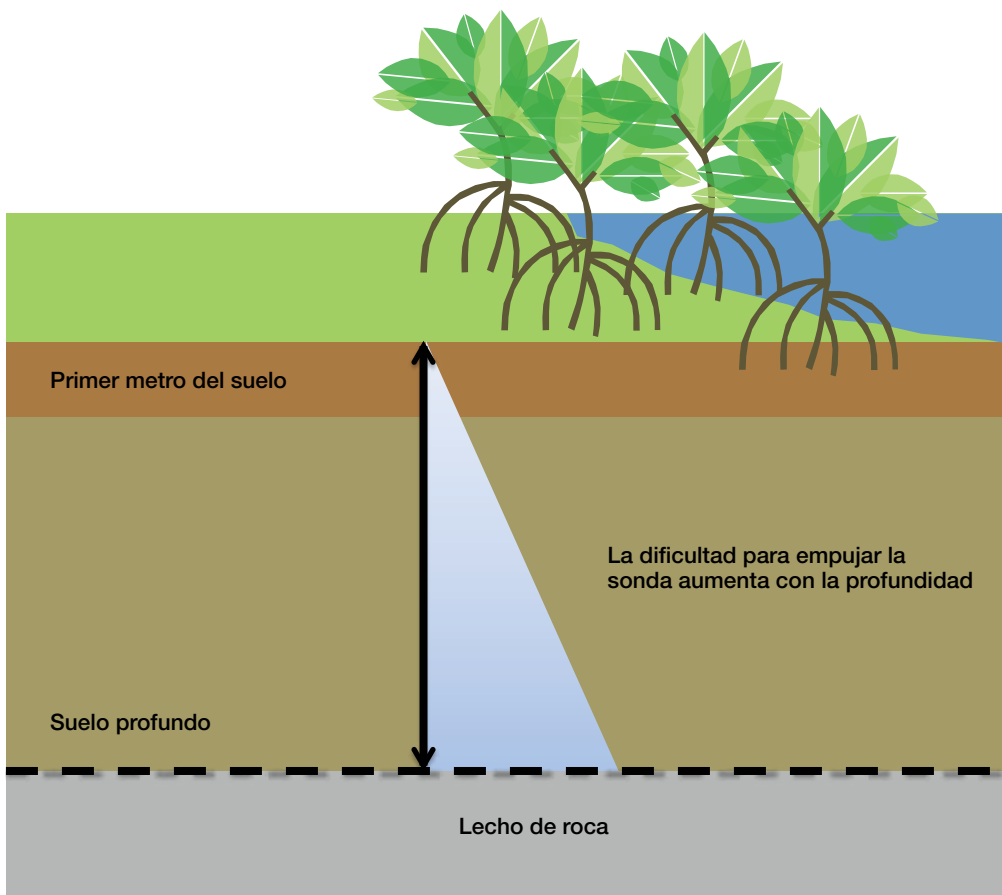


Figura 3.4 Medición de la profundidad del suelo con una sonda de profundidad de suelos

En algunos casos (como sucede en los suelos de pastos marinos ricos en materia orgánica), la profundidad del suelo puede determinarse con exactitud solo mediante el uso de equipos sofisticados de muestreo o técnicas geofísicas debido a la presencia de material fibroso y a la gran profundidad a

la cual se ha acumulado el suelo orgánico. El muestreo puede realizarse con un nucleador de suelos, pero incluso esto puede resultar muy difícil en suelos muy profundos dado que se requieren barrenas pesadas. Además, la profundidad del suelo puede ser más difícil de establecer a menos que haya un cambio claro en el tipo de suelo o un límite impenetrable. Todos estos problemas se agravan en suelos ricos en minerales, ya que a menudo son profundos y difíciles de penetrar. En los casos en los que la sonda no pueda empujarse o incluso martillearse hasta las profundidades que de hecho alcanza la capa de suelo, la única forma de establecer con exactitud la profundidad de la capa orgánica es tomar núcleos a profundidad e inspeccionar las muestras de los núcleos para identificar las capas orgánicas.

OBTENCIÓN DE NÚCLEOS DEL SUELO

Para obtener muestras del suelo para mediciones de densidad aparente y análisis de contenido de carbono, se debe contar con un equipo para el muestreo de suelos que permita extraer una muestra de suelo relativamente inalterada con una compactación mínima (**Tabla 3.2**, síntesis de nucleadores de suelos comunes). Se recomienda el uso de barrenas especializadas de media caña para suelos orgánicos y turba tales como la barrena rusa o la de Eijkelkamp. Ambas son cámaras largas (hasta ~ 2 m) semicilíndricas que se presionan hacia dentro del suelo, se giran y luego se extraen. Las muestras recuperadas deben haber sufrido un nivel mínimo de compactación. Deben poder colocarse extensiones para poder recuperar núcleos largos (3 m a 5 m). La barrena rusa tiene una rebaba que se cierra antes de la extracción, evitando así que los suelos se desprendan por la parte inferior de la barrena. La barrena Eijkelkamp tiene la parte inferior abierta, y los suelos pueden perderse por esta si están húmedos o les falta consistencia, como en el caso de arenas no consolidadas.

En algunos sitios de manglares, marismas y pastos marinos, a menudo resulta efectivo el uso de nucleadores simples con pistón. Estos dispositivos utilizan la succión generada por un pistón fijo en la parte superior de la superficie del suelo para extraer el núcleo dentro del tubo del nucleador a medida que este se presiona o martillea dentro del suelo.

En áreas de alto contenido arenoso, donde los nucleadores con pistón y las barrenas de media caña no pueden penetrar fácilmente el suelo, las únicas opciones restantes son o bien martillar manualmente un tubo dentro del suelo o utilizar un nucleador vibratorio. Utilizar un nucleador vibratorio implica fijar una pesada cabeza vibratoria mecánica a un tubo de aluminio o plástico y hacer que vibre para penetrar hacia las capas subyacentes del suelo.

Debido a que las mediciones de densidad aparente pueden alterarse por cualquier técnica de muestreo (en especial el martilleo) si el suelo es compactable, se recomienda experimentar con distintos equipos de muestreo en puntos representativos para garantizar la obtención de núcleos relativamente inalterados. El tipo de equipo nucleador necesario variará en función de la vegetación y el tipo de suelo. Por ejemplo, es posible que las barrenas de media caña sean suficientes para suelos de marismas ricos en materia orgánica, pero los nucleadores vibratorios podrían ser la mejor alternativa en manglares y pastos marinos con raíces en suelos arenosos o lodosos.

La presencia de fibras vegetales gruesas incrustadas en el suelo podría impedir la penetración del nucleador (tope de penetración) o causar un “efecto clavo” (penetración del nucleador sin que ingrese suelo al tubo). Para sacar núcleos en suelos ricos en fibras, es preferible colocar un borde filoso en la parte inferior del nucleador. En la práctica, esto puede lograrse afilando y serrando el extremo del nucleador o adjuntado una cabeza removible. Este método de muestreo combina la percusión manual y mecánica con la rotación para cortar las fibras (Serrano *et al.* 2012).

Tabla 3.2 Nucleadores.

NUCLEADORES	Barrena rusa	Barrena Eijkelpamp de media caña
	Cámara semicilíndrica con una rebaba giratoria diseñada para llenar la cámara desde el costado. Extensiones disponibles hasta varios metros.	Cámara semicilíndrica con extremo abierto. Extensiones disponibles hasta varios metros.
	Ventajas	Ventajas
	Las extensiones permiten obtener núcleos hasta 5 m de profundidad. Suelos inalterados, no compactados. Mínimo desprendimiento por la parte inferior.	Las extensiones permiten obtener núcleos de hasta varios metros. Suelos inalterados, no compactados, recuperados. Construcción simple, portátil.
	Desventajas	Desventajas
La profundidad recuperada depende de la fuerza de las personas que lo utilizan. La rebaba puede atorarse durante el proceso de muestreo.	La profundidad recuperada depende de la fuerza de las personas que lo utilizan. Los suelos pueden desprenderse por el fondo si están húmedos o blandos.	
Nucleador con pistón	Nucleador de suelos tipo balde	Nucleador vibratorio
Cámara semicilíndrica con extremo abierto. Extensiones disponibles hasta varios metros.	Cilindro o barril para contener el suelo, el cual se fuerza hacia dentro del barril por medio de aletas cortantes.	Un tubo grande que penetra el suelo mediante vibración gracias a un motor que empuja el nucleador hasta el fondo.
Ventajas	Ventajas	Ventajas
Puede utilizarse en suelos saturados. Sin dificultades con tuberías de revestimiento ni tubos nucleadores.	Enfoque universal para examinar los suelos en entornos diversos.	Recuperación de núcleos largos en un solo paso sencillo.
Desventajas	Desventajas	Desventajas
Se debe enjuagar antes y después de usar para evitar el desgaste del pistón, diámetro reducido.	Ofrece una muestra de suelo parcialmente íntegra.	Posible compactación. Se requiere un trípode o equipo de elevación para extraer los núcleos. No se destaca por ser portátil.

Pasos para obtener un núcleo del suelo (manglares y marismas)

- 1) Antes de insertar el nucleador, deberán removerse de la superficie los detritos orgánicos y las hojas vivas que pudiera haber en el sitio de muestreo.
- 2) Inserte el nucleador en forma constante verticalmente en el suelo hasta que la parte superior de este esté al mismo nivel que la superficie del suelo. La velocidad de descenso del dispositivo debe mantenerse baja (por ejemplo, un leve martilleo) para minimizar la compactación del núcleo. Si el nucleador no penetra hasta el fondo, no lo fuerce; es posible que se haya topado con una raíz de gran tamaño o un fragmento de coral. Intente el procedimiento en otro punto o recurra a un sistema con capacidad para cortar fibras (**Fig. 3.7**).
- 3) Una vez alcanzada la profundidad deseada, gire el nucleador para cortar cualquier resto de raíces finas y cierre la parte superior (el vacío evitará que se pierda la muestra). Extraiga suavemente el

nucleador del suelo mientras continúa girándolo a medida que lo extrae. Esta acción giratoria ayuda a recuperar una muestra completa de suelo (**Fig. 3.7**).

Pasos para obtener un núcleo del suelo (praderas de pastos marinos)

Los pasos para obtener muestras de suelo en sistemas de pastos marinos son un tanto particulares debido a que los suelos están saturados de agua, no mantienen bien su forma y son más susceptibles a la compactación. Además, es posible que estén sumergidos, lo que obliga al operador a sostener la



Figura 3.5 Obtención de un núcleo de suelos con un nucleador (© Boone Kauffman, OSU)

respiración o utilizar un equipo de buceo. Para suelos de grano fino, se puede utilizar un tubo de PVC de pared delgada como nucleador, y se puede construir un pistón con un tapón de agua, una armella, arandelas y tuercas (**Fig. 3.6**). Para suelos de grano grueso, más difíciles de muestrear, se recomienda utilizar un tubo de PVC de pared gruesa con un pistón.

El tubo de PVC, tubo o barril nucleador puede empujarse con un mazo o un hincapostes (**Fig. 3.7**). Una vez que el barril nucleador llegue a la profundidad deseada, coloque un tapón o cinta de embalar en la parte superior y extraiga el núcleo. Es posible que sea muy difícil extraer el barril nucleador, por lo que se recomienda utilizar una cadena (o una soga no elástica) junto con un cabrestante. Se puede construir un trípode portátil a partir de tubos de hierro (o una escalera) y una polea para mantener el nucleador derecho a medida que se lo extrae (**Fig. 3.8**). Otra opción es excavar el barril nucleador removiendo el suelo circundante.

Una vez extraído el nucleador, cubra el fondo con cinta de embalar y manténgalo erguido durante su traslado al laboratorio para la obtención de submuestras. Tenga en cuenta que es muy importante mantener la muestra en posición erguida durante el transporte para que las capas del núcleo no se mezclen dentro del tubo. En caso de que fuese logísticamente imposible transportar todo el núcleo en forma vertical al laboratorio, deberán tomarse submuestras en el lugar (ver a continuación).



Figura 3.6 Nucleador para praderas de pastos marinos. Tubos de PVC, tapón de goma y jeringa (© CI/Sarah Hoyt)



Figura 3.7 Demostración del método utilizado para que el nucleador penetre el suelo en praderas de pastos marinos. (A) Un mazo en aguas poco profundas (© Sarah Hoyt, CI). (B) Un hincapostes en aguas poco profundas (© Sarah Hoyt, CI). (C y D) Un mazo en aguas profundas (© James Fourqurean, FIU)



Figura 3.8 Preparación de equipos para obtener núcleos en ecosistemas de pastos marinos. Instrumentos para la obtención de núcleos en suelos de pastos marinos: (A) escalera con manija para extraer el nucleador de suelo blando en aguas poco profundas (© Sarah Hoyt, CI); (B) trípode robusto con sistema de polea para extraer el nucleador de suelo blando en aguas profundas o poco profundas (© Óscar Serrano, ECU)

Compresión del núcleo

La compresión de capas de sedimento (también denominada compactación del núcleo o acortamiento del núcleo) obedece a tres motivos: 1) el peso de las capas de sedimento a medida que se acumulan en el tiempo; 2) la descomposición de materia orgánica con el transcurso del tiempo, y 3) el movimiento de sedimentos durante el proceso de obtención del núcleo. Las capas de sedimento se acumulan una encima de la otra y las capas superiores generan presión sobre las capas inferiores. Como resultado, las capas de sedimento se comprimen firmemente y, con el transcurso del tiempo, la capa superior rica en materia orgánica y las capas inferiores de baja densidad pueden aumentar su densidad. Estas formas de compactación ocurren naturalmente y son difíciles de determinar, por lo que no se tienen en cuenta. No obstante, la acción de empujar el nucleador dentro de los sedimentos a menudo comprime el sedimento, generando cambios en la densidad aparente de la muestra que variarán en función de la profundidad (esto es particularmente cierto en los suelos de pastos marinos), y es posible que esto sesgue la estimación de las existencias de carbono (**Fig. 3.9**). También es posible obtener núcleos que sean mucho más cortos que la profundidad a la cual se insertó el nucleador en el suelo como resultado del “efecto clavo” descrito anteriormente (página 44), en el cual el tubo del nucleador se bloquea y en consecuencia penetra el suelo como una vara sólida o un tornillo. Lo ideal es no utilizar muestras comprimidas para el análisis de carbono en el suelo, pero a veces es inevitable. Debe hacerse un esfuerzo para limitar la compresión tanto como sea posible y registrar cada muestra en el lugar de su obtención para poder hacer correcciones.

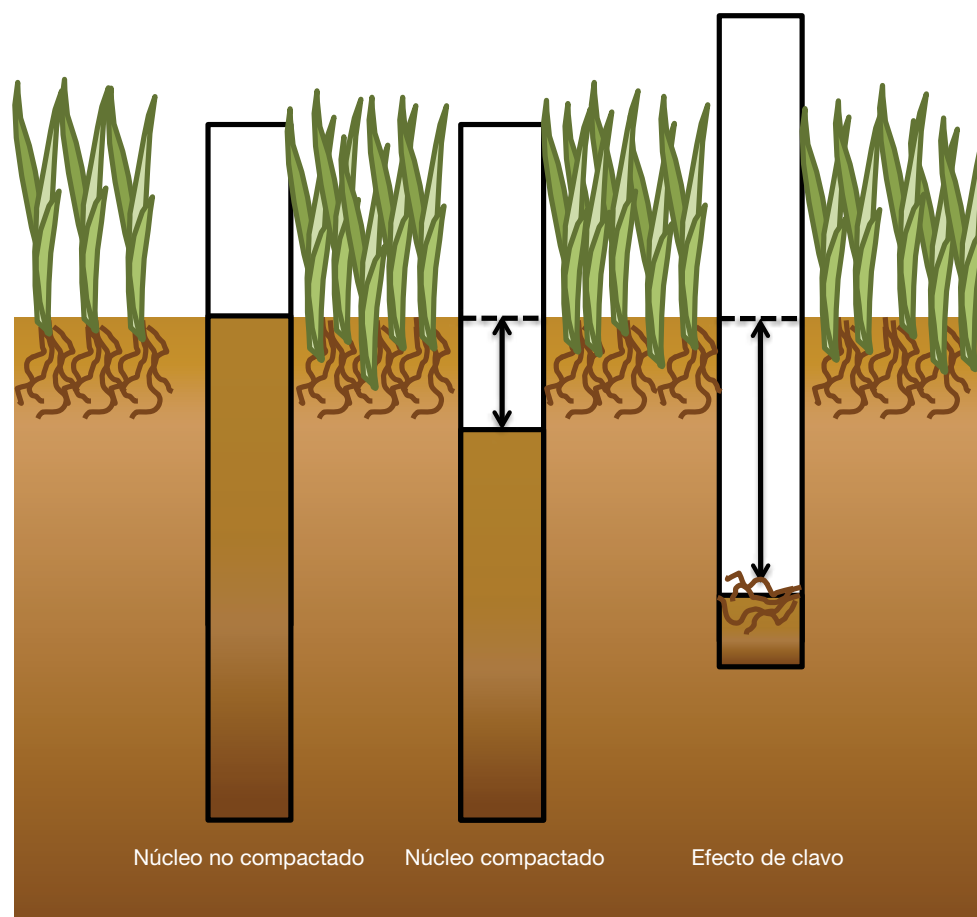


Figura 3.9 Diagrama de la compactación del núcleo que puede ocurrir durante el muestreo. La parte superior de un núcleo no compactado estará al mismo nivel que el suelo circundante (izquierda). Los núcleos pueden compactarse debido a la fuerza aplicada sobre el nucleador a medida que penetra el suelo (centro). El efecto clavo sucede cuando un elemento (raíces, rocas, conchas, etc.) queda atrapado en el nucleador y compacta el suelo por debajo (derecha)

En caso de que haya ocurrido una compactación significativa, obtenga otro núcleo en un punto cercano. Repita hasta que la compactación sea mínima. No obstante, incluso con las prácticas más eficientes para minimizar la compresión del núcleo (por ejemplo, barrenas diseñadas especialmente, obtención de núcleos con descenso a baja velocidad, aplicación de movimiento giratorio y uso de cabeza cortante) es posible que el núcleo se acorte hasta un 30 % (Morton & White 1997). En estos casos, debe aplicarse un factor de corrección de la compresión para compensar la compactación “artificial” en el núcleo obtenido.

El factor de corrección de compactación se calcula dividiendo la longitud de la muestra obtenida por la longitud de la penetración del nucleador. Durante el proceso de muestreo, la longitud corregida de la muestra se determina multiplicando el intervalo de profundidad deseado por el factor de corrección de compactación.

POR EJEMPLO

- Se toma una muestra de 150 cm de largo
- Pero la profundidad que alcanzó el nucleador fue de 175 cm
- Esto arrojará una compactación de suelo de 25 cm. Puede obtener el factor de corrección de compactación dividiendo la longitud de la muestra por la profundidad del nucleador ($150 \text{ cm} / 175 \text{ cm} = 0.86$).
- Si luego quisiéramos obtener una muestra que represente los 10 cm superiores del suelo, deberemos multiplicar el intervalo de profundidad (10 cm) por el factor de corrección de compactación (10×0.86), lo que arroja una nueva medición de la muestra obtenida de 8.57 cm.

Para simplificar, se puede aplicar un factor de corrección de compactación uniforme para la longitud total del núcleo. No obstante, esta técnica presupone que todas las partes del núcleo se compactaron por igual, lo que podría no ser el caso dado que la densidad aparente y la compactabilidad del material pueden variar según la profundidad del núcleo. Por lo tanto, se requiere un método más complejo pero más preciso para determinar el grado de compresión varias veces a distintos intervalos durante el proceso de obtención del núcleo.

Suelos densos

En caso de que utilice una barrena de cara abierta (por ejemplo, una barrena rusa), la muestra de suelo estará a disposición inmediatamente y lista para almacenarse y obtener submuestras. En caso de que utilice un sistema de barrena con cara cerrada (por ejemplo, barrena con pistón), primero deberá retirar el tubo de revestimiento. Para hacerlo, quite el tubo de revestimiento y la muestra de suelo del nucleador y corte el tubo de revestimiento de plástico o metal longitudinalmente a lo largo de caras opuestas con una sierra para metales, una herramienta eléctrica giratoria, un cuchillo o una sierra vibratoria. Es importante controlar



Figura 3.10 El tubo de revestimiento se ha cortado longitudinalmente para dejar expuesto el suelo para el archivo y la toma de submuestras. Este núcleo está en proceso de dividirse. Una cara limpia queda expuesta en la parte inferior de la imagen. (© Boone Kauffman, OSU)

la profundidad del corte para atravesar la pared del revestimiento sin cortar demasiado en el suelo y para evitar que queden partículas de plástico o del revestimiento en la muestra. Una vez que haya cortado a lo largo de caras opuestas de la pared del revestimiento, tome un cuchillo y corte el núcleo longitudinalmente de modo que el cilindro quede partido en dos mitades (también denominadas divisiones) haciendo cortes verticales en pasos discretos. Entre cada corte vertical, limpie el filo adecuadamente y separe lentamente las mitades del núcleo. Tenga cuidado de remover con un cepillo y una pinza cualquier pieza de plástico o metal que quede después de cortar el revestimiento. Limpie la cara de una de las mitades con un cuchillo. Para ello, remueva cuidadosamente una capa muy fina de la superficie (1 mm) arrastrando el cuchillo a lo largo del nucleador (**Fig. 3.10**). Esto hará que el suelo se revele en forma limpia para hacer un archivo fotográfico y una descripción.

Suelos flojos

En el caso de suelos más flojos, existe el riesgo de mezclar las capas del suelo si el núcleo se coloca de lado (para ser transportado o para tomar submuestras, **Fig. 3.11**). Se puede utilizar una jeringa a modo de nucleador miniatura para obtener con exactitud submuestras de suelos flojos o saturados (**Fig. 3.12**). En estos casos, los núcleos se recolectan con un nucleador a través de puertos preperforados. Por ejemplo, Fourqurean *et al.* (2012b) utilizan un nucleador a pistón de 5.2 cm de diámetro, manejado por un buzo, que penetra en el suelo hasta la profundidad tope con un mazo para obtener núcleos en praderas de pastos marinos (Fourqurean *et al.* 2012b). El tubo del nucleador se taladra previamente para que tenga puertos de muestreo de 2.5 cm de diámetro con intervalos de 3 cm. Antes de insertar el nucleador pretaladrado en el suelo, deben cubrirse los puertos de muestreo con cinta de embalar. Una vez que el nucleador se extrae del suelo, debe mantenerse erguido para asegurar que el núcleo no se mezcle y se traslada a la orilla para tomar las submuestras. La cinta debe despegarse luego lentamente hacia abajo, comenzando a partir del puerto superior y finalizando en el puerto inferior. Luego se debe insertar en cada puerto un nucleador a pistón hecho a partir de una jeringa de polietileno de 25 ml sin punta (2 cm de diámetro), comenzando desde arriba, para extraer una muestra de suelo de volumen conocido. Es importante recolectar siempre el mismo volumen de suelo en la jeringa o tomar nota del volumen muestreado cada vez.

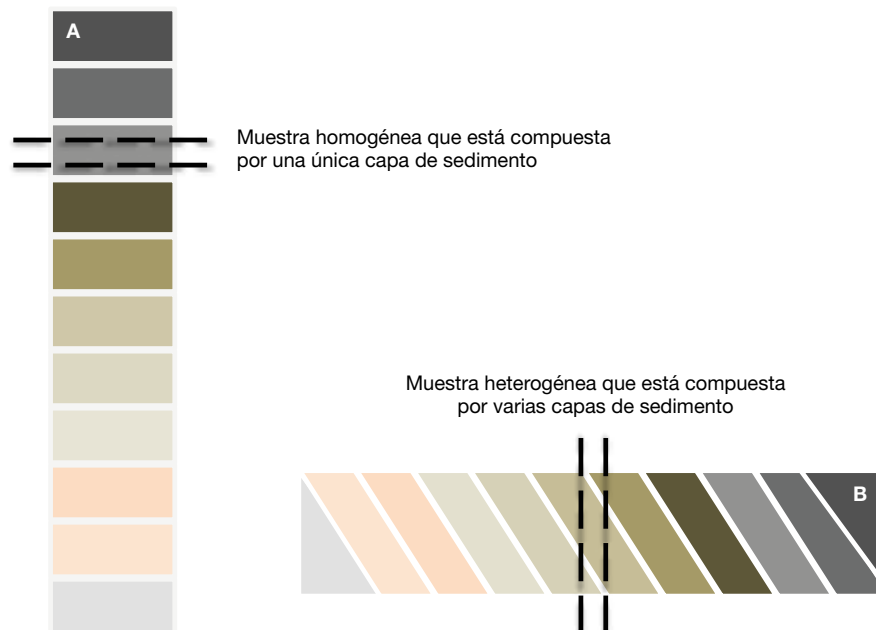


Figura 3.11 Ejemplos de núcleos de tipos de suelo flojos y saturados de agua. (A) Los núcleos deben mantenerse erguidos para evitar que las capas de suelo se mezclen y para que las submuestras sean consistentes. (B) Cuando los suelos blandos y no consolidados se colocan de costado, las capas se mezclan, lo que hace que la submuestra sea inexacta.



Figura 3.12 Los núcleos se recolectan con un nucleador con puertos de muestreo preperforados. Las muestras de los núcleos se obtienen con jeringas de polietileno sin punta (© Sarah Hoyt, CI)

Creación de un archivo del núcleo antes del muestreo

Es útil contar con un archivo fotográfico del aspecto del núcleo para planificar la técnica de obtención de submuestras y el análisis de laboratorio. Por ejemplo, si los suelos son de color oscuro y contienen muchos fragmentos vegetales, serán ricos en carbono y será necesario menos material para el análisis del carbono orgánico. Si en los suelos predomina una arena de color claro, será necesario analizar más material para determinar el contenido de carbono orgánico.

Para crear un archivo del núcleo, tome nota del lugar de muestreo con el GPS y asígnele al sitio una etiqueta exclusiva. Luego fotografíe todo el núcleo desde la parte superior hasta la inferior y registre los cambios que ocurran con la profundidad. En el caso de muestras obtenidas en manglares y marismas, se pueden tomar fotografías en el campo una vez que se haya recuperado el núcleo y se haya limpiado una de las mitades. Extienda una cinta métrica a lo largo del núcleo comenzando desde arriba y registre una de las mitades desde la parte superior a la inferior (superficie a profundidad) con fotografías detalladas de las secciones del núcleo superpuestas de modo que las imágenes puedan colocarse en línea y ver la imagen completa del núcleo. Asegúrese de incluir la cinta métrica en estas imágenes del núcleo. Coloque una etiqueta para identificar el núcleo de modo que aparezca en todas las fotografías e indique cuál es la parte superior y la parte inferior del núcleo. Aplique un filtro polarizador para limitar la cantidad de luz reflejada desde la superficie húmeda del núcleo.

Los suelos de pastos marinos son más difíciles de manejar porque deben mantenerse en posición vertical. En este caso, registre una descripción general de las submuestras del núcleo a medida que cambian con la profundidad en la cual se observen zonas de distinto color, textura, presencia de restos de plantas y de conchas de moluscos, tipo de sedimento (barro, arena, grava), etc. Tome fotografías para complementar las descripciones escritas y asegúrese nuevamente de incluir una identificación visible en todas las fotografías.

MUESTREO DE UN NÚCLEO DEL SUELO

Lo ideal es que, una vez extraído, el núcleo se transporte en su totalidad al laboratorio para el análisis. No obstante, a menudo esto no es posible, y deben tomarse muestras del núcleo en el campo. Las profundidades a las que se toman las muestras de un núcleo son una decisión de importancia. Preferentemente, lo mejor es muestrear en toda la profundidad del núcleo, aunque puede que esto no sea siempre posible o práctico. Cuando los suelos tienen varios metros de profundidad, lo habitual es muestrear el metro superior exhaustivamente y tomar menos muestras del material más profundo (**Fig. 3.13**).

- **Manglares:** Kauffman *et al.* (2011) y Donato *et al.* (2011) aplican una técnica de muestreo con profundidades muy agregadas con muestras que se obtienen de suelos de manglares a rangos

de profundidad de 0–15 cm, 15–30 cm, 30–50 cm, 50–100 cm y >100 cm. A profundidades de más de 100 cm, se recomienda que las muestras de suelo se tomen con intervalos de 2 m como máximo. Estos intervalos de muestreo se consideran adecuados para manglares porque el contenido de carbono por lo general cambia lentamente con la profundidad (Donato *et al.* 2011; Kauffman *et al.* 2011).

- **Marismas y praderas de pastos marinos:** Las variaciones en el contenido de carbono son más significativos entre los 20 cm y 50 cm superiores del suelo (Choi *et al.* 2001; Connor *et al.* 2001; Choi & Wang 2004; Johnson *et al.* 2007; Fourqurean *et al.* 2012b). Por lo tanto, recomendamos obtener perfiles de profundidad más detallados. Por ejemplo, se pueden recolectar muestras de 5 cm de grosor en forma continua a través del suelo (o los 50 cm superiores). Dado que el contenido orgánico de estos núcleos cambia más lentamente con profundidades por debajo de los 50 cm, es posible que convenga tomar menos submuestras separadas por intervalos mayores.

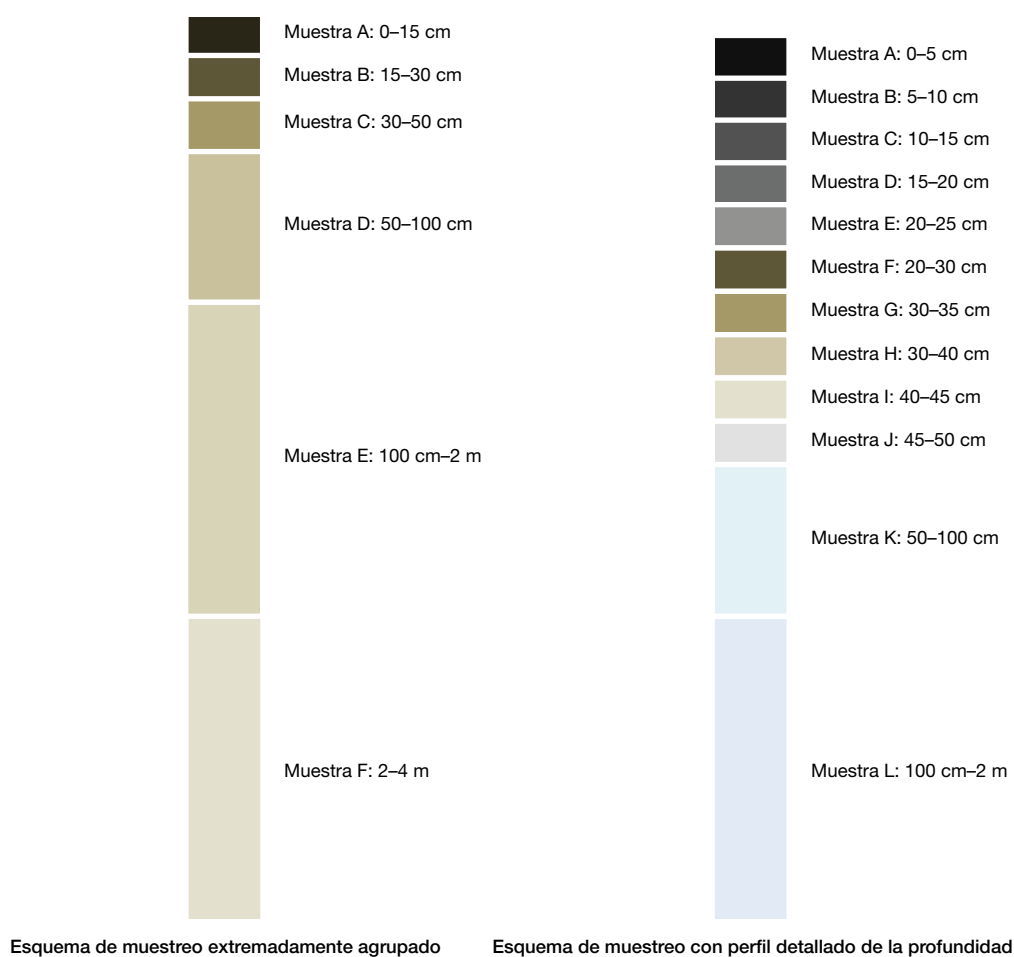


Figura 3.13 Estrategias alternativas para la obtención de núcleos

Es de suma importancia que las muestras se tomen de forma tal que pueda determinarse su volumen original. Por ejemplo, si se obtienen secciones enteras de núcleos, el volumen se puede calcular aplicando el intervalo de profundidad de la sección y el diámetro del nucleador. Si se usa una jeringa, el volumen se puede calcular directamente, ya que 1 cc equivale a 1 cm³.

SUBMUESTREO DE UN NÚCLEO DEL SUELO

La técnica más precisa y a menudo más práctica para obtener submuestras es determinar la densidad aparente para cada intervalo de profundidad y luego homogeneizar la submuestra y determinar el contenido de carbono orgánico. Como alternativa, las submuestras pueden obtenerse directamente de cada intervalo de profundidad. Para hacer esto, utilice una regla o una cinta métrica para determinar las profundidades de las que tomarán las submuestras. Por lo general, las submuestras tienen un tamaño de 5 cm de profundidad y contienen entre 5 g y 50 g de muestra, dependiendo del tamaño del nucleador y la composición del sedimento. En caso de que no se tomen muestras de todo el núcleo, las muestras deberían recolectarse aproximadamente en

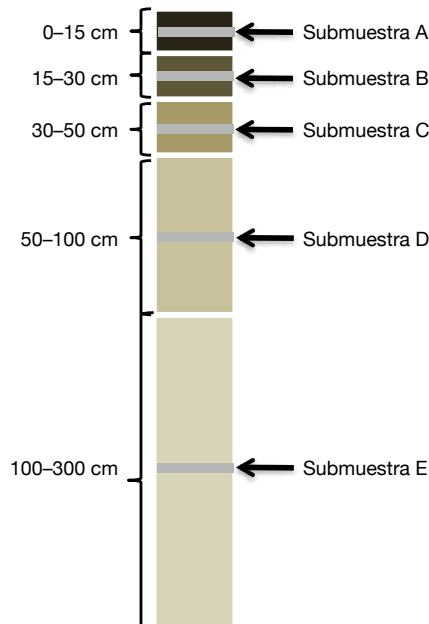


Figura 3.14 Estrategia para la obtención de submuestras de los núcleos

el punto medio de cada rango de profundidad deseado. Por ejemplo, si se muestrea el intervalo de profundidad de 0–15 cm, lo ideal es que la muestra se tome entre los 5–10 cm de profundidad; para la



Figura 3.15 Recolección de muestras de suelo con una barrena de cara abierta. (A) Remoción de suelo de la cara de la barrena. (B) Medición y marcación de los intervalos de profundidad. (C) Corte de una muestra. (D) Extracción de la muestra de la barrera y colocación en un recipiente numerado. (© Boone Kauffman, OSU)

profundidad de 50–75 cm, la muestra debería tomarse a 60–65 cm de profundidad, y así sucesivamente (**Fig. 3.14**). En suelos densos, se puede utilizar un cuchillo para tomar las submuestras (**Fig. 3.15**). Se debe limpiar el filo del cuchillo entre las tomas de cada submuestra. Después de la recolección, cada muestra se coloca en recipientes o bolsas numeradas e individuales, indicando el sitio, el número de parcela, la identificación del núcleo, la profundidad del suelo, la fecha, el tipo de nucleador utilizado, el diámetro del nucleador para calcular el volumen y cualquier otra información relevante (**Fig. 3.16**).



Figura 3.16 Cada muestra se coloca en un recipiente individual y numerado. El número corresponde a la información de identificación de la muestra registrada en las notas de campo. (© Boone Kauffman, OSU)

ARCHIVO DE LAS MUESTRAS

Etiquetar adecuadamente los núcleos y las muestras en el campo es fundamental para evitar confusiones y errores comunes en la identificación de las muestras. Cada muestra/submuestra debe tener una etiqueta con la identificación del núcleo, la profundidad de la muestra y el intervalo de profundidad. Una recomendación general es imprimir varias copias de plantillas de etiquetas en papel a prueba de agua y traerlas al campo. Use un marcador indeleble para escribir en la etiqueta y adhiera las etiquetas con cinta de embalar u otro tipo de cinta resistente al agua.

Para minimizar la descomposición de materia orgánica y el crecimiento microbiano, las muestras deben conservarse frías (4 °C) y, de ser posible, congeladas o secas (ver la sección sobre preparación de muestras) antes de que transcurran 24 horas desde la recolección. Antes del análisis, las muestras se deben descongelar y secar. Una vez secas, las muestras pueden almacenarse durante años con un mínimo de descomposición. El tratamiento de cuarentena (por ejemplo, irradiación) no afecta la concentración de carbono orgánico en muestras secas.

ANÁLISIS DE LABORATORIO

Para determinar con exactitud la densidad de carbono en el suelo, deben cuantificarse dos parámetros: densidad aparente del suelo y contenido de carbono orgánico (C_{org}). Una vez establecida la densidad aparente (masa del suelo seco/volumen original) puede utilizarse junto con C_{org} para determinar la densidad de carbono en el suelo en intervalos específicos de profundidad. A continuación, se detallan los procedimientos para este análisis.

Determinación de la densidad aparente del suelo seco

La densidad aparente (D_{Ap}) se determina a partir de la masa de material completamente seco y su volumen original.

- Densidad del material seco (g/cm^3) = Masa de suelo seco (g)/Volumen original de la muestra (cm^3)

DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN ORIGINAL DE LA MUESTRA

Para determinar el volumen original, deberá conocer el tipo de nucleador utilizado y su diámetro interno (por ejemplo, nucleador de tubo cerrado o jeringa) y el grosor de la muestra (si se obtuvo de un núcleo de mayor tamaño) o la longitud de la muestra (si se tomó con una jeringa). El volumen del suelo se puede calcular con la fórmula matemática para determinar el volumen de un cilindro de la siguiente manera:

- Si la muestra proviene de un núcleo intacto, utilice la siguiente ecuación:
 - Volumen original de la muestra de suelo antes del secado = $[\pi * (\text{radio del nucleador})^2] * (\text{profundidad de la muestra, h})$
- Si la muestra proviene de una mitad de un núcleo, se puede usar la misma ecuación para determinar el volumen de un núcleo intacto, pero el volumen calculado debe dividirse por 2.
- Si la muestra se obtuvo con una jeringa, el volumen se puede medir directamente con la jeringa, ya que $1 \text{ cc} = 1 \text{ cm}^3$.

DETERMINACIÓN DE LA MASA SECA

Coloque la muestra de suelo en un recipiente pesado previamente, por ejemplo, una placa de Petri o un vaso de precipitados, e introduzca la muestra en un horno a 60°C para secarla. La muestra puede esparcirse o separarse cuidadosamente en partes más pequeñas para reducir el tiempo de secado (**Fig. 3.17**).



Figura 3.17 Extracción de muestra de la jeringa y preparación para secado en horno. (A) Muestra en la jeringa. (B) Colocación de la muestra en una placa de Petri pesada previamente. (C) Muestra recién extraída de la jeringa. (D) Esparciendo la muestra con una espátula. (© Hilary Kennedy, UWB)



Figura 3.18 Muestra de suelo enfriándose a temperatura ambiente en un desecador (© Hilary Kennedy, UWB)

La muestra de suelo debe secarse hasta que su peso sea constante. Para determinar el momento en que la muestra llega al peso constante, séquela a 60 °C durante al menos 24 horas y luego déjela enfriar a temperatura ambiente en un desecador durante al menos 1 hora antes de pesarla (**Fig. 3.18**).

Pese la muestra en la placa de Petri antes de colocarla nuevamente en el horno, séquela durante otras 24 horas y luego vuelva a pesarla. Este ciclo se repite hasta que las diferencias sucesivas de peso sean inferiores al 4 % (utilice siempre la misma balanza). Por lo general, este proceso lleva al menos entre 48 y 72 horas.

Si bien nosotros recomendamos secar las muestras a 60 °C para determinar la densidad del material seco, otros protocolos recomiendan secarlas a 105 °C. No se recomienda aplicar temperaturas tan altas porque es posible que parte de la materia orgánica del suelo comience a perderse (por oxidación) a temperaturas por encima de 60 °C. Por lo tanto, la pérdida de peso

registrada a 105 °C podría representar potencialmente tanto pérdida de agua como de materia orgánica, lo que daría lugar a una subestimación del carbono orgánico.

Una vez que la muestra alcanza un peso estable, se utiliza la masa de la muestra junto con el volumen calculado anteriormente para determinar la DAp. Tenga en cuenta que el carbono inorgánico (por ejemplo, conchas de moluscos de carbonato) NO deben removerse antes del análisis de densidad del material. Algunas distribuciones representativas de la densidad aparente a diversas profundidades en suelos de carbono azul se muestran en la **Fig. 3.19**.

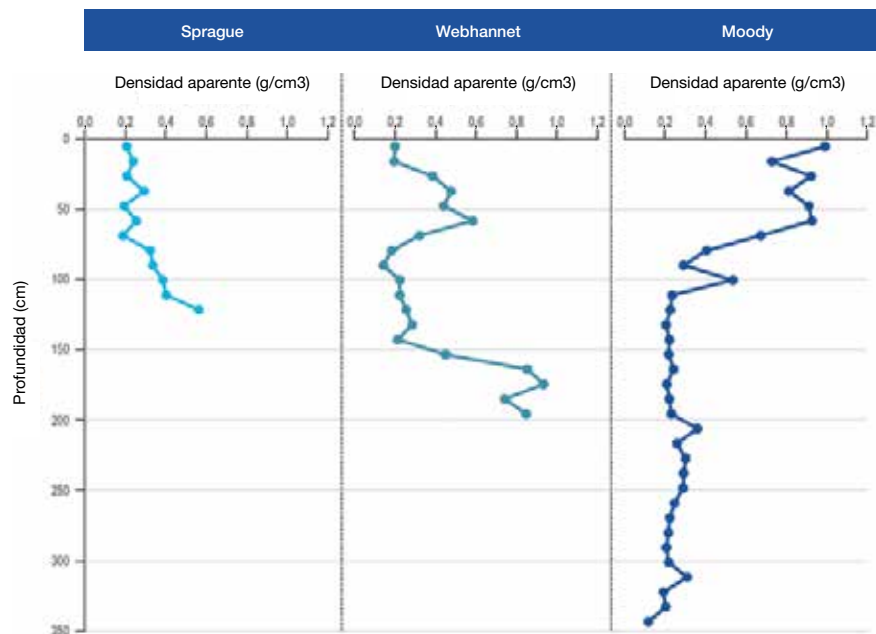


Figura 3.19 Densidad de material de núcleos de marisma de Sprague, Phippsburg, Maine (N.: 44° 44' 21.64"/O.: 69° 49' 48.90"), marisma de Webhannet, Wells, Maine (N.: 43° 18' 14.82"/O.: 70° 34' 16.61") y marisma de Moody, Wells, Maine (N.: 43° 16' 26.19"/O.: 70° 35' 12.21"). La profundidad máxima del núcleo representa la profundidad tope de cada sitio (Johnson *et al.* en prep.)

Determinación del contenido de carbono orgánico (% C_{org})

El contenido de carbono orgánico de una muestra de suelo puede medirse mediante varios métodos. El método elegido dependerá en gran medida de que el equipo necesario esté al alcance. Para medir el contenido de carbono orgánico, se puede: 1) utilizar un analizador automático de elementos, también conocido como analizador CHN dado que muchos analizadores de elementos están configurados para medir simultáneamente el contenido de carbono (C), hidrógeno (H) y nitrógeno (N); 2) utilizar la combustión y las relaciones empíricas entre el carbono orgánico y la materia orgánica (conocida como pérdida por ignición [Loss on Ignition, LOI]), o 3) utilizar técnicas de digestión húmeda como el método de Walkley-Black, que es simple y requiere de equipamiento mínimo. Las ventajas y desventajas de cada método se presentan en la **Tabla 3.3**. Los resultados obtenidos con el método húmedo no pueden considerarse cuantitativos y el proceso produce residuos tóxicos, por lo que es apropiado únicamente para laboratorios equipados para utilizar y disponer de oxidantes químicos en forma segura y para estudios de baja resolución (Nelson et al. 1996; Sollins et al. 1999). Debido a las limitaciones de la técnica de combustión húmeda, aquí solo describimos los métodos del analizador de elementos y de la LOI. El uso de cualquiera de estas técnicas depende de la disponibilidad y también de las limitaciones presupuestarias y de capacidades (**Fig. 3.20**).

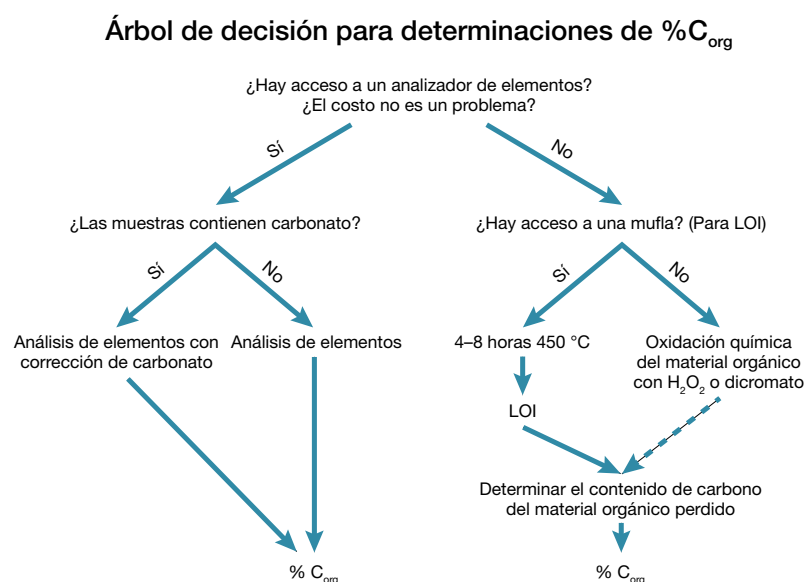


Figura 3.20 Árbol de decisión para determinar el mejor método para calcular la cantidad de carbono orgánico del suelo

Table 3.3 Comparación de técnicas de laboratorio para determinar el porcentaje de carbono orgánico.

MÉTODO DE COMBUSTIÓN SECA		MÉTODO DE COMBUSTIÓN HÚMEDA
Analizador de elementos	LOI	Digestión con H ₂ O ₂ y dicromato (método de Walkley-Black)
Ventajas	Ventajas	Ventajas
Medida cuantitativa del contenido de carbono.	Medida semicuantitativa del contenido de carbono orgánico; bajo costo y tecnología sencilla.	Medida semicuantitativa del contenido de carbono orgánico; bajo costo y química sencilla.
Desventajas	Desventajas	Desventajas
Requiere de instrumentos especiales; puede ser costoso.	El porcentaje de carbono orgánico se determina a partir de relaciones derivadas empíricamente entre el carbono y la materia orgánica.	El H ₂ O ₂ no siempre digiere el carbono por igual; produce residuos peligrosos.

HOMOGENEIZACIÓN

Antes de poder determinar el contenido de carbono, se debe homogeneizar cada muestra/submuestra por separado. Se evalúan las muestras secas, se remueven objetos grandes tales como piedras y ramas, y las terrones grandes se desmenuzan con una espátula. La homogeneización puede hacerse en forma manual triturando el suelo seco hasta lograr un polvo con partículas de tamaño uniforme con un mortero, o automáticamente con un pulverizador o un molino (Fig. 3.21). Cualquiera sea el método utilizado, es importante limpiar el dispositivo de triturado (por ejemplo, con etanol) entre muestras para garantizar que la contaminación cruzada sea mínima. Las muestras homogeneizadas (a las que nos referiremos en adelante como muestras de suelo sin tratar) pueden luego ser utilizadas para determinar el contenido de carbono orgánico e inorgánico.



Figura 3.21 Trituración y homogeneización de una muestra de suelo. (A) Mortero. (B) Recipiente ágata en molino comercial. (C) Recipiente de ágata con bolas para contribuir a la pulverización y homogeneización de la muestra de suelo. (© Hilary Kennedy, UWB)

ESTIMACIÓN DEL PORCENTAJE DE CARBONO ORGÁNICO CON UN ANALIZADOR DE ELEMENTOS

En este método se utiliza la combustión seca para determinar el carbono total (orgánico e inorgánico) de cada muestra. Es el método más apropiado para el análisis de rutina de carbono total, y recomendamos el uso de un analizador de elementos de ser posible (Sollins *et al.* 1999). Un analizador de elementos es un instrumento de laboratorio que sirve para determinar la composición elemental de una muestra. El analizador utiliza un horno de inducción a alta temperatura y o bien espectroscopía infrarroja o separación de gases por cromatografía de gases y detección de conductividad térmica para medir el contenido de carbono, hidrógeno y nitrógeno (así como también de otros elementos) de la muestra.

Cuando se utiliza un analizador de elementos, las muestras caen automáticamente dentro de un tubo de cuarzo que se mantiene a aproximadamente 1000 °C, lleno de agentes oxidantes y catalizadores, y hay un flujo constante de helio a través de la columna. Cuando la muestra cae dentro de la columna, el flujo de helio se enriquece temporalmente con oxígeno puro. Tiene lugar una combustión instantánea y se liberan dióxido de carbono, agua y nitrógeno. El agua se elimina con un desecante y el CO₂ se separa del N₂ por cromatografía de gases. Al final de este proceso se obtiene un gráfico en el que la cantidad

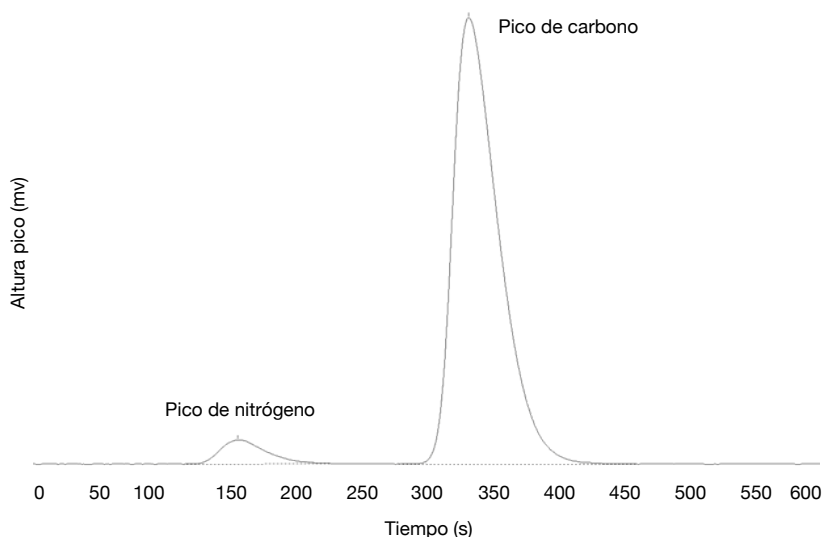


Figura 3.22 Resultados de cromatograma de un analizador de elementos en los que se observan los picos de nitrógeno y carbono de una muestra sometida a combustión (© Hilary Kennedy, UWB)

de carbono es proporcional al área debajo del pico de CO_2 (**Fig. 3.22**), y se reporta en unidades de porcentaje de carbono (% C). El instrumento se calibra mediante un compuesto orgánico estándar, como la acetanilida. La exactitud del análisis debe determinarse mediante estándares internacionales y monitorearse a través de un estándar interno con una composición cercana a la de la muestra.

En caso de que no haya un analizador de elementos disponible, las muestras se pueden enviar a un laboratorio comercial donde los costos para análisis de elementos oscilan, por lo general, entre los 10 USD y los 20 USD por muestra. Siempre que las herramientas adecuadas estén disponibles (microbalanza y bandejas de estaño), es posible ahorrar dinero pesando las muestras y enviándolas a un laboratorio calificado. En este caso, coloque, con una espátula, las muestras en una cápsula de estaño previamente pesada y luego cierre y comprima con la pinza. Pese la cápsula de estaño con la muestra adentro y sustraiga el peso de la cápsula de estaño vacía para determinar el peso de la muestra. Registre dónde se encuentran las muestras en la bandeja, incluidos los pesos, y envíelas al laboratorio. El laboratorio necesitará saber el peso de cada muestra para calcular el % C del suelo. Mientras se espera por el análisis, las muestras se pueden almacenar en una bandeja dentro de un desecador (**Fig. 3.23**). Pida al laboratorio donde hará el análisis de carbono orgánico que lo asesore antes de comenzar a encapsular las muestras (cantidad de carbono orgánico necesario para análisis sólidos en sus instalaciones, tamaño necesario de las cápsulas de estaño, etc.). Una buena opción es hacer el análisis de carbono orgánico en algunas muestras representativas primero y hacer los ajustes necesarios antes de analizar todas las muestras.

Los analizadores de elementos determinan el contenido de carbono total de la muestra, incluido el carbono orgánico e inorgánico. Para corregir esto, debe determinarse el contenido de carbono inorgánico.

Corrección para tomar en cuenta el contenido de carbono inorgánico

El carbono inorgánico en la forma de carbonatos (es decir, carbonato de calcio, CaCO_3) se halla en los suelos costeros como conchas de moluscos o fragmentos de coral, y se asocia a menudo a los lechos de pastos marinos. El carbonato de calcio también puede estar presente en algunos suelos ricos en minerales debajo de capas de turba. (es posible que en el sedimento también haya arenas, limos y arcillas neutras en términos de carbono en distintas proporciones, pero su presencia no afecta el análisis de carbono orgánico). El carbonato de calcio (al que nos referiremos en adelante como carbonato) contiene carbono, pero no se incluye al determinar las existencias de carbono azul, pero se convierte a CO_2 en un analizador de elementos, lo que sesga los resultados.

Hay dos métodos básicos para corregir el contenido de carbonato de los suelos.

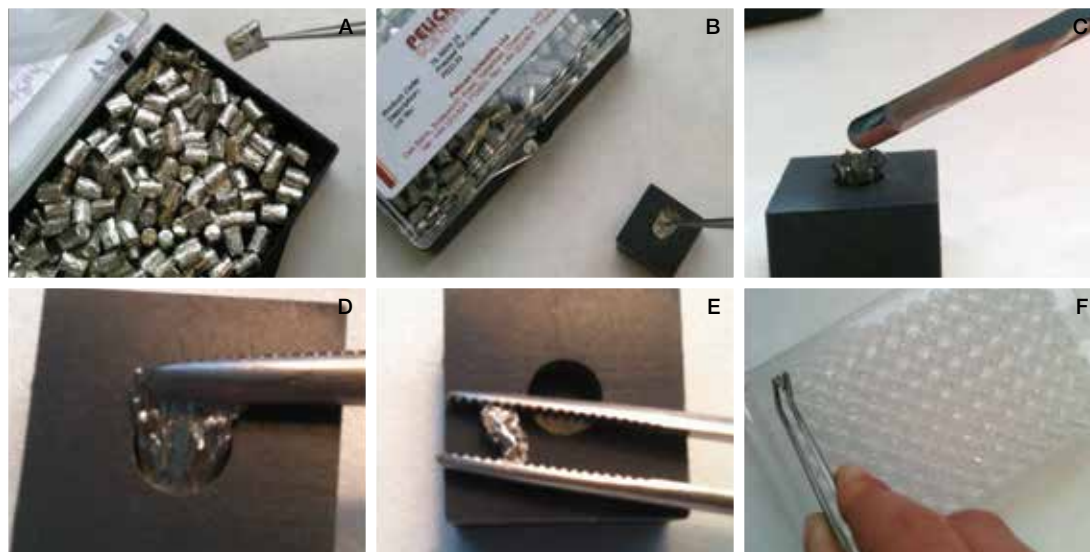


Figura 3.23 Preparación de una muestra seca para análisis de CHN. (A) Extracción de una cápsula de estaño para ser pesada. (B) Una vez pesada, la cápsula de estaño se puede colocar en un receptáculo limpio. (C) Muestra agregada con una espátula. (D) La pinza se usa para cerrar y (E) comprimir la cápsula de estaño y (F) colocar la muestra en una placa de 96 pozos para almacenar antes del análisis. (© Hilary Kennedy, UWB)

- 1) **Acidificación:** Este enfoque es sencillo, económico y no requiere de equipos de laboratorio muy sofisticados. El carbono inorgánico se volatiliza como CO_2 al tratar la submuestra de suelo con un ácido fuerte. El contenido de carbono inorgánico se estima por la diferencia de peso de la submuestra antes y después del tratamiento. Existe el riesgo de que parte del carbono orgánico también se elimine con este método, lo que daría lugar a una posible subestimación del carbono orgánico. Las reacciones con ácidos más diluidos durante períodos mayores minimizan la pérdida de carbono orgánico a causa de la descomposición.
- 2) **Analizador de elementos:** Una submuestra de suelo se calienta a $500\text{ }^\circ\text{C}$. A esta temperatura, el carbono orgánico se elimina y en la ceniza queda el carbono inorgánico. El carbono inorgánico que queda en la submuestra de cenizas se determina con un analizador de elementos.

En ambas técnicas, el contenido de carbono inorgánico se extrae del carbono total (ver sección anterior), y lo que resta es la estimación del contenido de carbono orgánico.

ACIDIFICACIÓN

Algunos protocolos para la remoción de carbonato (por ejemplo, la descalcificación) utilizan un ácido relativamente concentrado durante cortos períodos (Mortlock & Froelich 1989), y otros aplican un método más delicado (Weliky *et al.* 1983; Pilskaln & Paduan 1992). Recomendamos el enfoque más lento y delicado que describimos aquí en lugar de la descalcificación. Primero, pruebe para ver si la muestra contiene cantidades significativas de carbonato tomando una submuestra (correspondiente a las muestras utilizadas para el análisis de carbono total). Colóquela sobre una superficie de vidrio y agregue algunas gotas de 1 N ácido clorhídrico (HCl). Si hay carbonato, aparecerán burbujas de CO_2 y la muestra se verá efervescente (**Fig. 3.24**).

Si hay carbonato, pese $\sim 1\text{ g}$ de la muestra original de suelo homogeneizado y colóquela en un vaso de precipitados de 125 ml o en un tubo de vidrio de 50 ml para centrifuga cónica (este último es preferible si las muestras deben centrifugarse para separar la solución del suelo; ver a continuación). Diluya el HCl a 1N y agregue una cantidad suficiente en el vaso de precipitados como para cubrir la muestra. Agite a mano durante 15 minutos o emplee una sonda o baño ultrasónico. Ambas técnicas sirven para

desintegrar masas de suelo de modo que el ácido pueda eliminar todo el carbono inorgánico presente. El ácido es lo suficientemente suave como para dejar intacta la materia orgánica. Deje que finalice la acción efervescente y permita que las muestras reposen (entre 18 y 24 horas). Agregue más HCl, agite o someta a ultrasonido durante 15 minutos y observe si hay más efervescencia.



Figura 3.24 Determinación de la presencia de carbonato. (A) Submuestra en un vidrio de reloj antes de la acidificación. (B) Pipeteo de unas gotas de HCl débil. (C) Submuestra haciendo efervescencia. (© Hilary Kennedy, UWB)

Si ya no se produce CO_2 (no se observa más emanación de gas), el carbonato se ha eliminado. Una vez que el suelo se asiente en el fondo del vaso de precipitados o el tubo, podrá decantarse el ácido que lo cubre. En caso de que haya muchas partículas finas de suelo suspendidas en solución, centrifugue las muestras para separar la solución del suelo y luego decante o quite el líquido con una pipeta. Una vez que se haya quitado el ácido, agregue agua destilada a la muestra, revuelva, deje que el material se asiente en el fondo (o centrifugue) y decante el agua. Repita este paso de limpieza dos veces más. Deje secar a $60\text{ }^\circ\text{C}$ durante la noche y pese la muestra.

La diferencia de masa de la muestra antes y después de la acidificación es una estimación del carbonato de calcio en la muestra. No obstante, solo el 12 % de la diferencia de peso puede atribuirse al carbono (el carbono constituye el 12 % del peso molecular del carbonato de calcio [CaCO_3]). Por lo tanto, a fin de estimar la cantidad de carbono inorgánico presente, la masa de carbonato de calcio se multiplica por 0.12. Por último, sustraiga el contenido de carbono inorgánico del contenido de carbono total de la submuestra (del análisis de elementos descrito en la sección anterior) para obtener el contenido de carbono orgánico de la muestra (**Tabla 3.4**).

Tabla 3.4 Determinación del porcentaje de carbono inorgánico con el método de acidificación.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	CONTENIDO DE CARBONO TOTAL (ANALIZADOR DE ELEMENTOS)	MASA SECA ANTES DEL ÁCIDO (mg)	MASA SECA DESPUÉS DEL ÁCIDO (mg)	MASA DE CARBONATO (mg)	CARBONO INORGÁNICO (mg)	CONTENIDO INORGÁNICO DE LA MUESTRA	CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO DE LA MUESTRA
	A	B	C	$D = B - C$	$E = C * 0.12$	$F = (E/B) * 100$	$G = A - F$
Ejemplo	25 %	100	90	10	1.2	1.2 %	23.8 %

ANALIZADOR DE ELEMENTOS

Tome una submuestra aparte (correspondiente a las muestras utilizadas para el análisis de carbono orgánico, ~ 0.5 g) de suelo seco sin tratar, pésela en miligramos hasta el número entero más próximo y colóquela en un recipiente a prueba de temperatura (por ejemplo, un crisol de cerámica). Luego coloque estas muestras en un horno calentado a $500\text{ }^\circ\text{C}$ durante un mínimo de tres horas (hasta alcanzar un peso constante) para volatilizar los compuestos orgánicos. El peso de los restos de ceniza

se determina luego en miligramos al número entero más próximo. Un analizador de elementos se utiliza, según los procedimientos descritos anteriormente, para determinar el contenido de carbono de las cenizas que se supone que es en su totalidad carbono inorgánico.

Ponga a escala los resultados del analizador de elementos mediante la proporción entre el peso de la ceniza y el peso de la muestra seca para obtener el contenido de carbono inorgánico de la muestra seca original. Luego sustraiga el contenido de carbono inorgánico del contenido de carbono total de la submuestra para obtener el contenido de carbono orgánico de la muestra (**Tabla 3.5**).

Tabla 3.5 Determinación del porcentaje de carbono inorgánico mediante el análisis de elementos.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	CONTENIDO DE CARBONO TOTAL (ANALIZADOR DE ELEMENTOS)	MASA SECA ANTES DE LA INCINERACIÓN PARA OBTENER CENIZA (mg)	MASA SECA DESPUÉS DE LA INCINERACIÓN PARA OBTENER CENIZA (mg)	CONTENIDO DE CARBONO INORGÁNICO DE LA MUESTRA HECHA CENIZAS (mg)	CONTENIDO INORGÁNICO DE LA MUESTRA	CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO DE LA MUESTRA
	A	B	C	D	$E = D \cdot (C/B)$	$F = A - E$
Ejemplo	25 %	500	250	10 %	5 %	20 %

MEDICIÓN DEL PORCENTAJE DE CARBONO MEDIANTE UN ANALIZADOR DE LOI

En caso de que sea excesivo el costo por el uso de un analizador de elementos, recomendamos aplicar la técnica del porcentaje de pérdida por ignición (a menudo denominada también % LOI). El costo inicial del equipo necesario para el análisis de % LOI (que incluye una mufla y crisoles de cerámica) oscila entre los 5000 USD y los 10 000 USD. Este equipo relativamente simple es muy durable y puede utilizarse durante muchos años, por lo que disminuye considerablemente el costo por análisis de muestra a largo plazo.

La LOI es una medida de la masa de la muestra perdida (por ejemplo, oxidada y liberada como gas o volatilizada) al ser calentada a altas temperaturas. Por lo general, la muestra se calienta hasta llegar a la combustión a 450 °C durante 4 a 8 horas (Heiri *et al.* 2001). Esta temperatura se utiliza para garantizar que solo se oxide el carbono orgánico (no el inorgánico).

El % LOI se calcula de la siguiente manera:

- % pérdida por ignición = $[(\text{Masa seca antes de la combustión (mg)} - \text{Masa seca después de la combustión (mg)}) / \text{Masa seca antes de la combustión (mg)}] \cdot 100$

Tabla 3.6 Determinación del % LOI.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	MASA INICIAL ANTES DE LA COMBUSTIÓN (mg)	MASA FINAL DESPUÉS DE LA COMBUSTIÓN (mg)	DIFERENCIA ANTES Y DESPUÉS DE LA COMBUSTIÓN	% DE PÉRDIDA POR IGNICIÓN
Ejemplo	50	40	10	$(10/50) \cdot 100 = 20$

Es importante tener en cuenta que la LOI representa la pérdida de materia orgánica, que está formada por carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, azufre, etc. y no solamente la pérdida de carbono orgánico. Por lo tanto, debe determinarse una relación entre el % LOI y el % C_{org} .

Relación entre materia orgánica y carbono orgánico: Debe formularse una ecuación que relacione el contenido de materia orgánica (% LOI) con el contenido de carbono orgánico (% C_{org}) de la misma muestra. Esto puede lograrse enviando una cantidad limitada de muestras para análisis de carbono

orgánico a través de un analizador de elementos (ver arriba) y comparando el contenido de carbono orgánico resultante de esa técnica con los resultados del % LOI.

Si esto no fuera posible, tome un valor de la literatura para una ubicación/tipo de estudio que se asemeje lo más posible al que usted realizará. La siguiente tabla (**Tabla 3.7**) resume ejemplos de las relaciones entre el % LOI y el % C_{org} en suelos de manglares, marismas y praderas de pastos marinos. Encontrará información adicional sobre las relaciones entre el % LOI y el carbono orgánico en manglares, marismas y praderas de pastos marinos en el **Apéndice E**. No obstante, existe una amplia gama de relaciones entre el contenido de carbono (% C_{org}) y la materia orgánica (% LOI) publicada en la literatura científica, lo que hace que los valores de relación estándar sean posibles fuentes de error al estimar el contenido de carbono orgánico. Por lo tanto, es una buena práctica determinar la proporción para sus muestras de suelo en particular enviando algunas muestras al laboratorio para el análisis de elementos. Enviar una pequeña cantidad de muestras no debería ser muy costoso y mejorará en gran medida la exactitud de los resultados.

Tabla 3.7 Relación entre el % LOI y el % C_{org} en distintos ecosistemas. La variabilidad dentro de los ecosistemas puede deberse a leves diferencias en los métodos utilizados o en las características de los suelos.

ECOSISTEMA	FUERZA DE LA RELACIÓN (r ²)	RELACIÓN ENTRE EL % LOI Y EL % C _{org}	UBICACIÓN (FUENTE)
Manglares	0.59	% C _{org} = 0.415 * % LOI + 2.89	Palau (Kaufmann <i>et al.</i> 2011)
Marismas	0.98	% C _{org} = 0.47 * % LOI + 0.0008 (% LOI) ²	Maine (Johnson <i>et al.</i> en prep.)
Marisma influenciada por las mareas	0.99	% C _{org} = 0.40 * % LOI + 0.0025 (% LOI) ²	Carolina del Norte (Craft <i>et al.</i> 1991)
Praderas de pastos marinos (% LOI >0.2)	0.87	% C _{org} = 0.40 * % LOI - 0.21	Conjunto de datos globales (Fourqurean <i>et al.</i> 2012a)
Praderas de pastos marinos (% LOI >0.2)	0.96	% C _{org} = 0.43 * % LOI - 0.33	Conjunto de datos globales (Fourqurean <i>et al.</i> 2012a)

Si bien el % LOI puede ser un indicador adecuado del contenido de materia orgánica en muchos tipos de muestras (a menudo definido operacionalmente como porcentaje de materia orgánica), es importante comprender las posibles limitaciones de esta técnica. Se ha reportado que la técnica de la LOI lleva a sobrestimar el contenido de carbono orgánico de dos formas:

- 1) Si una muestra que contiene carbonato (por ejemplo, aquellas que provienen de las capas subyacentes de praderas de pastos marinos con brotes cubiertos por abundantes epífitas o suelos en la región de arrecifes de coral) se calienta por encima de los 500 °C, también podrá dispararse la pérdida de agua y CO₂ derivados de CaCO₃ (Hirota & Szyper 1975; Leong & Tanner 1999).
- 2) En suelos que contienen >11 % de minerales de arcilla, una cantidad importante de agua estructural (que no se pierde al calentar a 60 °C) puede perderse con el calentamiento a temperaturas de esta magnitud (Barillé-Boyer *et al.* 2003).

En ambos casos, el contenido de carbono orgánico podría sobrestimarse debido al hecho de que el % LOI podría reflejar la pérdida de la materia orgánica, el carbono inorgánico y el agua estructural contenidos en la muestra. Se puede reducir el margen de error derivado del % LOI mediante la determinación y la corrección del contenido inorgánico (ver la sección siguiente sobre corrección teniendo en cuenta el contenido de carbono inorgánico).

3

CÁLCULO DE LA EXISTENCIA DE CARBONO TOTAL DEL SUELO

La existencia de carbono total del suelo dentro del área de un proyecto se determina por la cantidad de carbono dentro de un área y una profundidad del suelo definidas. Para calcular el carbono total del suelo en el área de su proyecto, deberá contar con la siguiente información:

- Profundidad del suelo.
- Profundidad e intervalo de la submuestra.
- Densidad aparente.
- Porcentaje de carbono orgánico.

La existencia de carbono total en el área de un proyecto se puede determinar de la siguiente manera:

Paso 1: Para cada intervalo del núcleo muestreado o analizado, calcular la densidad de carbono orgánico del suelo de la siguiente manera:

$$\text{Densidad de carbono en el suelo (g/cm}^3\text{)} = \text{Densidad aparente (g/cm}^3\text{)} * (\% C_{\text{org}}/100).$$

Paso 2: Calcular la cantidad de carbono en las distintas secciones del núcleo muestreado multiplicando cada valor de densidad de carbono en el suelo obtenido en el paso 1 por el grosor del intervalo de la muestra (cm):

$$\text{Cantidad de carbono en la sección del núcleo (g/cm}^2\text{)} = \text{Densidad de carbono en el suelo (g/cm}^3\text{)} * \text{Grosor del intervalo (cm)}.$$

Paso 3: Sumar la cantidad de carbono de las secciones del núcleo a lo largo de la profundidad total de muestreo recomendada (1 m como mínimo). *Es fundamental incluir en el informe la profundidad total de muestreo.*

$$\text{Núcleo 1 sumado} = \text{Cantidad de carbono en la sección A del núcleo (g/cm}^2\text{)} + \text{Cantidad de carbono en la sección B del núcleo (g/cm}^2\text{)} + \text{Cantidad de carbono en la sección C del núcleo (g/cm}^2\text{)} + \dots \text{ todas las muestras del mismo núcleo.}$$

*Debe incluirse todo el núcleo en este cálculo. Si se tomaron submuestras a lo largo del núcleo (**Fig. 3.11**), sume la cantidad de carbono de cada una de las secciones y luego sume la profundidad total muestreada para obtener la existencia de carbono total.

Paso 4: Convertir el carbono total del núcleo del paso 3 a las unidades utilizadas habitualmente en las evaluaciones de las existencias de carbono (MgC/hectárea) aplicando los siguientes factores de conversión de unidades (hay 1 000 000 g por Mg (megagramo) y 100 000 000 cm² por hectárea):

$$\text{Carbono total del núcleo (MgC/hectárea)} = \text{Suma del carbono del núcleo (g/cm}^2\text{)} * (1 \text{ Mg}/1\,000\,000 \text{ g}) * (100\,000\,000 \text{ cm}^2/1 \text{ hectárea}).$$

La unidad utilizada aquí es Mg C/hectárea (para la capa superior de 1 m del suelo), y es una unidad que se utiliza habitualmente en la medición de las existencias de carbono.

REPETIR PARA CADA NÚCLEO

Paso 5: Determinar la cantidad promedio de carbono en un estrato para una profundidad determinada y calcular la desviación estándar asociada para establecer la variabilidad o el error.

$$\text{Promedio de carbono en un núcleo} = \text{Contenido de carbono del núcleo 1 (determinado en el$$

paso 4) + Contenido de carbono del núcleo 2 + Contenido de carbono del núcleo 3 + ... n) / n.

La desviación estándar (σ) determina qué tanto se aproximan los datos a el promedio, y se calcula de la siguiente manera:

Desviación estándar del núcleo
$$(\sigma) = \left[\frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{(N-1)} \right]^{1/2}$$

- \bar{X} = Carbono promedio en un núcleo
- X_1 = Resultado específico para el núcleo 1, en MgC/hectárea; X_2 = Resultado específico para el núcleo 2, en MgC/hectárea, etc.
- N = Número total de resultados

Paso 6: Para obtener la cantidad total de carbono del ecosistema, multiplique el valor promedio del carbono (MgC/hectárea) para cada núcleo obtenido en el paso 5 anterior por el área de cada estrato (en hectáreas) para determinar MgC para cada estrato, y luego sume los valores de MgC de cada estrato para determinar la existencia de carbono total del suelo.

Recuerde que es fundamental registrar la profundidad total de los núcleos del suelo. Por lo tanto, la unidad definitiva para la existencia de carbono en el suelo en cada estrato del proyecto se expresará en MgC para un intervalo específico de profundidad (por lo general, aunque no siempre, 1 m).

Carbono orgánico total en un área del proyecto (MgC) = (Promedio de carbono del núcleo del estrato A [MgC/hectárea] * Área del estrato A [hectáreas]) + (Promedio de carbono del núcleo del estrato B [MgC/hectárea] * Área del estrato B [hectáreas] + ...

Paso 7: Para reportar el valor de la variabilidad o el error asociados a estas mediciones, calcule la incertidumbre total en los datos. Primero, calcule la desviación estándar del promedio de MgC para cada estrato (multiplique el valor de la desviación estándar del carbono [MgC/hectárea] de cada núcleo determinado en el paso 5 anterior por el área de cada estrato [en hectáreas]). Luego distribuya la incertidumbre a través de los cálculos combinando las desviaciones estándar del promedio de MgC para cada estrato de la siguiente manera:

$$\sigma_T = \sigma_A^2 + \sigma_B^2 + \dots + \sigma_N^2$$

- Donde σ_T = Variabilidad total asociada a las mediciones
- σ_A = Desviación estándar del promedio de MgC del núcleo para el estrato A * Área del estrato
- σ_B = Desviación estándar del promedio de MgC para el estrato B * Área del estrato
- σ_N = Desviación estándar del promedio de MgC del núcleo para los demás estratos * Área de cada estrato por separado

Este enfoque puede aplicarse al sumar valores promedio, como se hace al combinar los datos de los estratos individuales.

Paso 8: La existencia final de carbono en el suelo se presentará como un valor promedio \pm la incertidumbre total. Como alternativa, se puede presentar una existencia de carbono mínima y máxima al multiplicar por el área del proyecto, y luego por las densidades de carbono mínima y máxima.

Carbono orgánico total en un área del proyecto (calculado en el paso 6) \pm la desviación estándar (calculada en el paso 7).

En los apéndices B y C se muestran ecuaciones y ejemplos.

GUÍA RÁPIDA

Paso 1: Determinación de la profundidad del suelo

- Mida la profundidad de la roca madre, el lecho rocoso o las arenas coralinas.

Paso 2: Obtención de núcleos del suelo

- Seleccione un nucleador en función del tipo de suelo y el nivel de saturación de agua del suelo.
- Inserte el nucleador en forma constante hasta que la parte superior del muestreador esté al mismo nivel que la superficie del suelo.
- Una vez alcanzada la profundidad deseada, gire el nucleador para cortar cualquier resto de raíces finas, mida la longitud del tubo fuera de los sedimentos y la longitud de tubo vacío, y selle la parte superior (el vacío evitará que se pierda la muestra).
- Extraiga suavemente el nucleador del suelo mientras continúa girándolo a medida que se extrae. Esta acción giratoria ayuda a recuperar una muestra completa de suelo.
- En el caso de praderas de pastos marinos, el nucleador a menudo debe quitarse del suelo con la ayuda de un cabrestante.
- Es fundamental registrar la profundidad total y si se observa compactación.

Paso 3a: Muestreo de la totalidad de un núcleo del suelo (si esto no es posible, se pueden tomar submuestras, próxima sección)

- Lo mejor es muestrear en toda la profundidad del núcleo. No obstante, puede que esto no sea siempre posible o práctico.
- Es fundamental registrar la profundidad, el intervalo de profundidad y el volumen de la submuestra.

Paso 3b: Submuestreo de un núcleo del suelo

- Las muestras deben obtenerse de intervalos homogeneizados de muestras o del punto medio aproximado de cada rango de profundidad deseada.

Paso 4: Archivo de las muestras

- Etiquetar adecuadamente los núcleos y las muestras en el campo es fundamental para evitar confusiones y errores comunes en la identificación de las muestras.
- Cada muestra/submuestra debe tener una etiqueta con al menos la identificación del núcleo, la profundidad de la muestra y el intervalo de profundidad.

Paso 5: Almacenamiento de las muestras

- Para minimizar la descomposición de la materia orgánica, las muestras deben conservarse frías (a 4 °C) y, de ser posible, congeladas antes de que transcurran 24 horas de la recolección.

Paso 6: Determinación de la densidad aparente (g/cm³)

- Calcule el volumen de suelo muestreado aplicando la ecuación (cm³).
- Determine el peso seco.
- Calcule la densidad aparente dividiendo la masa de suelo seco por el volumen de suelo muestreado (g/cm³).

Paso 7: Determinación del contenido de carbono orgánico

- Decida qué técnicas utilizar en función del resultado deseado, la capacidad y las limitaciones de presupuesto.
- Determine el contenido de carbono inorgánico.
- Determine el contenido de carbono orgánico.

Paso 8: Cálculo de la existencia de carbono total del suelo

- Si tomó una submuestra del núcleo, deberá determinar la cantidad de carbono del núcleo por cm³, multiplicar ese valor por la longitud del intervalo de la muestra y luego sumar todos los intervalos para determinar el carbono total/área representado en el núcleo.
- Debe incluir la variabilidad asociada a las mediciones y la profundidad total del suelo analizada cuando presente los resultados.