



# Estudio de campo y protocolo para el muestreo de sedimentos de lechos de pasto marino: Columbia Británica, Washington y Oregón



La presente investigación corrió a cargo de:

**F. Short**, de la Universidad de Nuevo Hampshire;

**M. Hessing Lewis**, del Instituto Hakai, Costa Oeste, Columbia Británica;

**C. Prentice**, del Instituto Hakai y la Universidad Simon Fraser;

**R. Sanders Smith**, del Instituto Hakai y la Universidad de Columbia Británica;

**J. Gaeckle**, del Departamento de Recursos Naturales (*Department of Natural Resources*) del estado de Washington, y

**A. Helms**, de la Reserva Nacional de Investigación Estuarina de South Slough (*South Slough National Estuarine Research Reserve*), Oregón.

Con el apoyo de la **Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA)** en el marco del proyecto *Avances en la práctica científica para la formulación de políticas en materia de carbono azul en América del Norte* (Plan Operativo 2015-2016).

El carbono almacenado en ecosistemas costeros y marinos se conoce como “carbono azul”, y sólo recientemente se empezó a aludir a las reservas de este carbono como de importancia mundial (Fourqurean *et al.*, 2012). De algunos metanálisis realizados se concluye que los ecosistemas que captan y almacenan carbono azul —sobre todo manglares, lechos de pasto marino y marismas salobres— desempeñan un papel desproporcionadamente significativo en el secuestro de carbono en relación con la superficie que ocupan en el planeta, lo que los convierte en puntos críticos en términos de almacenamiento de carbono (Duarte *et al.*, 2005; McLeod *et al.*, 2011; Fourqurean *et al.*, 2012). Si bien hoy día se reconoce ya en forma generalizada, y sin lugar a dudas, la importancia de estos ecosistemas en el balance mundial de carbono, lo cierto es que el conocimiento que se tiene en torno a los sumideros de carbono azul continúa siendo más deficiente que el de los sumideros terrestres de carbono (McLeod *et al.*, 2011), y esta falta de entendimiento limita nuestra capacidad para incluir las reservas de carbono azul en estrategias orientadas a contribuir a la mitigación de los efectos del cambio climático (Macreadie *et al.*, 2014; Hejnowicz *et al.*, 2015). Asimismo, la destrucción y la degradación de ecosistemas que captan y almacenan carbono azul suponen una gran preocupación, por su potencial para no sólo exacerbar los efectos del cambio climático, sino también limitar otros servicios ambientales que prestan estos importantes hábitats (Barbier *et al.*, 2011; Pendleton *et al.*, 2012).

A fin de incluir con toda precisión el carbono azul en los balances mundiales de carbono, es necesario cuantificar el alcance espacial (extensión) de los hábitats que captan y almacenan carbono azul, así como determinar la variabilidad en cuanto a capacidad de almacenamiento de carbono al interior



Foto: cortesía de Margot Hessing-Lewis

Recolección de núcleos de sedimentos, Bahía de Pruth, Columbia Británica.

de los hábitats, y entre un hábitat y otro. La presente investigación persigue dos objetivos: 1) formular un método para recoger y procesar núcleos de sedimentos a una profundidad de hasta un metro o más en hábitats de *Zostera marina*, y 2) con base en los núcleos obtenidos, ofrecer estimaciones de la capacidad de secuestro (captura y almacenamiento) de carbono azul en praderas de dicho pasto marino ubicadas en Columbia Británica (BC, por sus siglas en inglés), Canadá, y los estados de Washington (WA) y Oregón (OR), Estados Unidos. Los trabajos de muestreo de carbono azul almacenado en sedimentos de lechos de pasto marino se llevaron a cabo en un sitio en Columbia Británica, dos sitios en el estrecho de Puget, Washington, y dos sitios cerca de la bahía Coos, Oregón (véase la gráfica 1). En cada uno de los cinco sitios mencionados se recogieron núcleos largos (de hasta 100 cm de longitud), además de tres núcleos de 10 cm de longitud a lo largo de transectos en las porciones intermareales bajas, intermedias y altas de las praderas marinas, junto con tres núcleos de referencia —también de 10 cm de longitud— que se obtuvieron más allá del borde de las praderas. (Estos núcleos más pequeños se analizarán con mayor detalle más adelante.) Cabe señalar que cada uno de los sitios objeto de muestreo es también un sitio de monitoreo a largo plazo perteneciente a SeagrassNet, red mundial de monitoreo de lechos de pasto marino, y que todos los núcleos de carbono azul analizados se obtuvieron al mismo tiempo que se efectuaban tareas de monitoreo de SeagrassNet.

### Método para la obtención de núcleos concebido para Columbia Británica

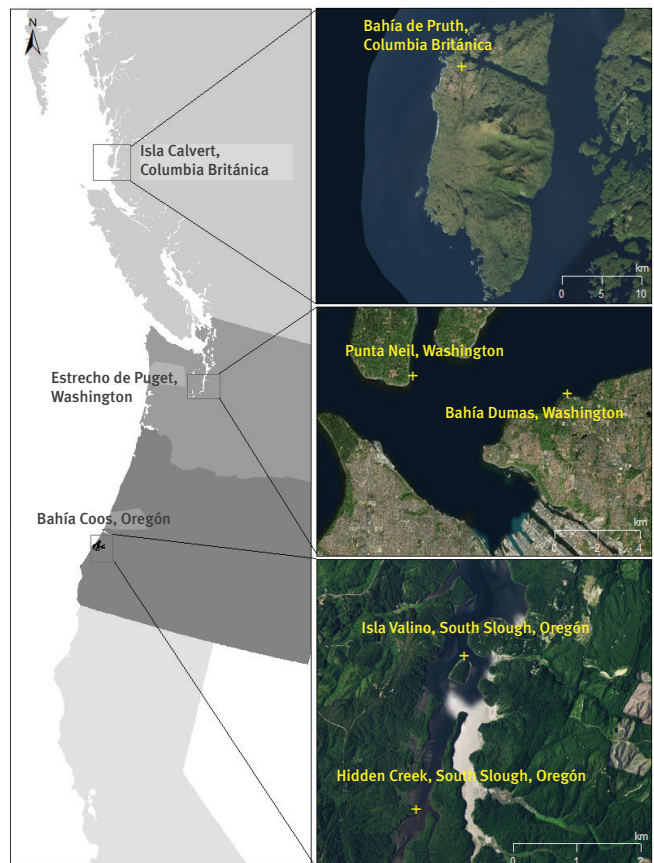
Los métodos para la obtención de núcleos de sedimentos de lechos de pasto marino creados por el grupo del Instituto Hakai en Columbia Británica, Canadá, son el resultado de modificaciones de los métodos de recolección de núcleos en marismas desarrollados por el Laboratorio de Ciencias de Sistemas Terrestres de la Universidad de Texas A&M-Corpus Christi (TAMUCC, por sus siglas en inglés) (<http://esslab.tamucc.edu/tools-marshcoring.html>), aunque éstos se refinaron aún más para la obtención de muestras de núcleos de sedimentos a lo largo del estrecho de Puget, Washington, y la bahía Coos, Oregón, con el propósito de reducir problemas de compactación de los sedimentos durante la inserción de los tubos “nucleadores” y aumentar la facilidad de remoción de los núcleos. Los muestreadores de núcleos de sedimentos se fabricaron con tubería de PVC cédula 40, con un diámetro interior de 4 pulgadas [10.16 cm], y se equiparon con un sistema “atrapanúcleos” en acero o galvanizado, con apego al diseño de la TAMUCC. Un atrapanúcleos consiste en un dispositivo de metal con “dientes” que se cierra en el momento en que se está extrayendo de los sedimentos el tubo nucleador, a fin de evitar que el material recogido se salga por el fondo del

tubo (véase la gráfica 2). La producción de nuevos atrapanúcleos se facilita utilizando un atrapanúcleos plantilla o modelo con el cual se recortan láminas de metal delgadas (se sugiere un grosor de 0.010 pulgadas [0.254 mm]) para armar nuevos dispositivos de encapsulación. Este modelo puede encontrarse en: <http://esslab.tamucc.edu/resources/corecatchertemplate.pdf>.

Obsérvese que los atrapanúcleos pueden necesitarse únicamente en determinados sitios y para obtener muestras de núcleos de mayor longitud. Su utilidad para retener los sedimentos varía en función del sitio de que se trate y depende de las características de los sedimentos. En este caso, el atrapanúcleos resultó de gran utilidad para la obtención de muestras de sedimentos de arena gruesa, comunes en entornos físicamente dinámicos. Para colocarlo, el atrapanúcleos se insertó en uno de los extremos del tubo nucleador, se perforaron orificios a través del PVC y el metal y se le sujetó con remaches de 1/8 de pulgada.

Los tubos nucleadores empleados para este estudio tenían una longitud de 150 centímetros. Sin embargo, debe dejarse

**Gráfica 1. Localización de los sitios de muestreo de núcleos de sedimentos en lechos de pasto marino**

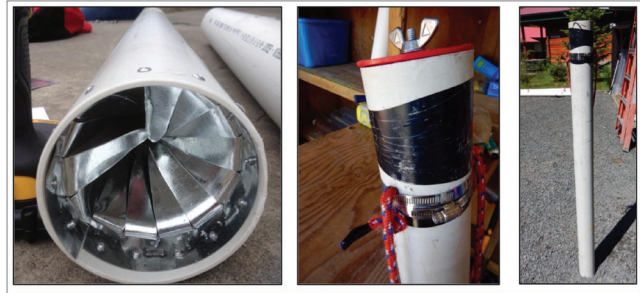


Los núcleos se obtuvieron de un sitio en la isla Calvert, bahía de Pruth, Columbia Británica (BC); dos sitios ubicados en la parte central del estrecho de Puget, Washington (WA 50.1-bahía Dumas y WA 50.2-punta Neill), y dos sitios cerca de South Slough, Oregón (OR 25.1-isla Valino y OR HC-Hidden Creek).

un espacio libre de cerca de 20 cm en la parte superior del muestreador de núcleos, además de que se pierden entre 10 y 15 cm de sedimentos debajo del atrapanúcleos. Asimismo, dependiendo del tipo de sedimento a estudiar, es posible que éste se compacte durante la inserción del tubo. Por todo ello, al momento de determinar la longitud a la que debe cortarse el tubo de PVC para la obtención de núcleos, es importante considerar las pérdidas de sedimento que se producen en relación con la longitud deseada para las muestras. En la parte superior del muestreador de núcleos se amarró una cuerda —asegurada con abrazaderas— que serviría de asa para extraer el tubo (véase la gráfica 2). Además, se perforaron tres orificios alrededor del tubo, a una distancia aproximada de 2.5 cm de la parte superior del muestreador, a fin de permitir la salida de agua en caso de que el tubo quedara sumergido parcial o totalmente; con ello, no sólo se libera presión sino que el muestreador puede penetrar con mayor facilidad en los sedimentos, lo cual, en última instancia, se traduce en menor compactación de la muestra. Los orificios perforados se cubrieron con cinta de aislar antes de extraer el tubo de los sedimentos para crear succión. En los casos en que se recogerían múltiples núcleos en el mismo lugar y al mismo tiempo, se colocaron previamente etiquetas en los tubos nucleadores.

En Columbia Británica, las muestras se tomaron entre el 5 y el 12 de mayo de 2016. Los muestreadores de núcleos se introdujeron en los sedimentos usando una almádena o mazo de 8 libras [17.6 kg]. Para evitar que el tubo nucleador se quebrara al momento de ser golpeado con el mazo, se colocó una plataforma de metal o madera en la parte superior del tubo de PVC, y una o dos personas guiaron el muestreador de núcleos para introducirlo verticalmente en el sedimento. Asimismo, a fin de minimizar las perturbaciones, el muestreador se empujó o golpeó despacio para introducirlo en los sedimentos hasta la profundidad deseada. Durante la inserción del muestreador, se tomaron mediciones de compactación a efecto de monitorear qué tanto cambiaban los índices de compactación con la profundidad: se observó un incremento en la compactación cuanto más profundo penetraba el muestreador, debido a la fricción de superficie. La compactación se determinó midiendo la distancia (en centímetros) desde la parte superior del núcleo hasta la superficie de los sedimentos tanto en el interior del tubo como en su parte externa: al restar la distancia registrada en la parte interna de la observada en la parte externa, se obtiene el índice de compactación. Para cada sitio de donde se obtuvieron núcleos, se registraron los siguientes elementos: localización con GPS, profundidad del agua, hora de recolección, altura estimada de la marea y observaciones adicionales sobre el lecho de pasto marino. Obsérvese que, con el propósito de resolver los problemas de compactación, en Oregón y Washington se empleó un motor vibrador —en lugar de un mazo— para insertar el núcleo en los sedimentos.

## Gráfica 2. Detalles del muestreador de núcleos de sedimentos



De izquierda a derecha: atrapanúcleos, asa de cuerda para facilitar la extracción del núcleo, y muestreador de núcleos listo para su uso.

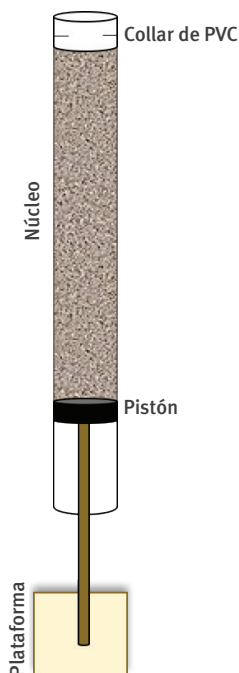
La remoción exitosa del tubo muestreador de núcleos dependió de la combinación de una buena succión al interior del núcleo y la activación adecuada del atrapanúcleos. Para mejorar la succión se cubrieron con cinta de aislar todos los orificios de ventilación en la parte superior del muestreador de núcleos, asegurando que no quedara ningún espacio por donde pudiera haber fuga de aire o agua. Enseguida se colocó en la parte superior del tubo un tapón de compresión, mismo que se aseguró apretando una tuerca de mariposa hasta sellar bien (véase la gráfica 2). Se deslizó un tubo o pedazo de madera por el asa de cuerda y dos personas (una en cada extremo) la jalaban hacia arriba para extraer el tubo nucleador de sus sedimentos circundantes. Una vez eliminada o superada la succión cerca del fondo, el esfuerzo físico para extraer el núcleo fue mínimo.

Tan pronto se lograba retirar del agujero el muestreador de núcleos, era importante tapar rápidamente el fondo del tubo para proteger los sedimentos al interior. Cuando se empleó el atrapanúcleos, y éste estaba adecuadamente instalado, entonces la mayor parte del sedimento se conservaba en su lugar. Los tubos muestreadores de núcleos se mantuvieron en posición vertical durante el transporte y se procuró minimizar la vibración.

Los núcleos de sedimentos se extrudieron (extrajeron) de los tubos muestreadores por medio de un poste de metal largo (>1.5 m) al cual se había sujetado un pistón fabricado en teflón con una junta tórica. Con fines de lubricación se aplicó al pistón una pequeña cantidad de grasa de vacío (calidad laboratorio).

Para poder insertar el pistón en el fondo del muestreador de núcleos, se retiraron el tapón del extremo inferior y el atrapanúcleos, eliminando los remaches con un taladro y un punzón de clavo. El tapón de compresión en el extremo superior se dejó puesto a fin de permitir que se siguiera creando succión. El muestreador de núcleos se colocó de inmediato y con mucho cuidado sobre el pistón, sostenido por dos personas por la parte inferior, y en la parte superior por una persona subida a una escalera.

Gráfica 3. Configuración del extrusor de núcleos de sedimentos



A continuación, luego de retirar también el tapón de compresión del extremo superior, se procedió a cortar, a intervalos designados, segmentos del núcleo —a manera de discos—, medidos con la ayuda de un collar de PVC del mismo diámetro que el muestreador, colocado encima del núcleo mismo conforme éste se extraía del muestreador (véase la gráfica 3). Se utilizaron collares de diversas alturas para obtener muestras o discos de distintas alturas (por ejemplo, collares de 2, 5, 6 y 10 cm) a diferentes intervalos de profundidad.<sup>1</sup>

Para su extrusión o extracción, el núcleo se empujó cuidadosamente con el pistón hasta que el sedimento quedara nivelado con la parte superior del collar. Se empleó una delgada pieza de plástico para cortar los segmentos del núcleo de sedimentos. En los casos en que la superficie del núcleo no era plana en la zona de contacto entre el agua y los sedimentos, se calculó una altura promedio a partir de mediciones tomadas alrededor del collar.

Cada uno de los segmentos o discos de sedimentos obtenidos a distintos intervalos de profundidad se transfirió a una bolsa Ziploc previamente etiquetada, y se homogeneizó. En los casos en que se encontraron rocas, palos, conchas y otros detritos en una parte y otra de dos segmentos conti-

guos, se reagrupó todo el material en el segmento que contenía la mayor parte, y se tomó nota al respecto. Durante el seccionamiento de los núcleos, se tomaron notas adicionales de observaciones cualitativas, entre otras: cambios en la composición de los sedimentos, color, olor y tamaño del grano, así como la presencia de fauna béntica (infauna o endofauna) como bivalvos o gusanos, los tipos de detritos o las obstrucciones al muestreo.

Una vez homogeneizados, los discos se analizaron para determinar en cada caso el tamaño del grano de sedimento, el contenido de carbono y los isótopos estables, la densidad aparente en seco y la geocronología (análisis de datación radioisotópica con plomo-210 [<sup>210</sup>Pb]). Con una jeringa de 30 ml, a la que se le recortó la punta (para formar, a efectos prácticos, un minimuestreador de núcleos), se recogieron fracciones de 30 cc de sedimento con el propósito de medir la densidad aparente y realizar todos los análisis químicos pertinentes. Cada una de estas fracciones se colocó en una pequeña bolsa Whirl-Pak, en tanto que las porciones restantes de las muestras se conservaron en su bolsa Ziploc original para los análisis de tamaño de grano y para “archivar” (conservar) los sedimentos excedentes. Todas las bolsas con muestras se mantuvieron en hielo en una nevera durante el proceso de extrusión y se etiquetaron con los datos sobre el sitio y la ubicación del núcleo, la fecha en que se obtuvo, el tipo de muestra y el intervalo de profundidad o sección a que correspondía (por ejemplo, 8-10 centímetros).

A fin de obtener cálculos volumétricos e interpretaciones del índice sedimentario geocronológico para cada intervalo de profundidad, se registraron los pesos húmedos (en gramos o kilogramos) de ambos grupos de bolsas: las que contenían las fracciones de sedimentos de 30 cc destinadas a análisis químicos y de densidad aparente, y las de las muestras más grandes para análisis de tamaño del grano y archivo. Estas últimas se mantuvieron en refrigeración, mientras que las primeras se congelaron a -20 grados Celsius.

Adicionalmente, en cada sitio, se recolectaron seis núcleos pequeños con jeringa (de 10 cm de longitud y 30 cc de volumen) en forma simultánea a las tareas de monitoreo de SeagrassNet, y se recogieron también tres núcleos a lo largo de transectos ubicados en las porciones intermareales bajas, intermedias y altas de las praderas marinas, así como tres núcleos de referencia obtenidos más allá del borde de las praderas. Los núcleos obtenidos con jeringa se extrudieron directamente en las bolsas etiquetadas y se mantuvieron en congelación antes de su procesamiento.

1. En términos generales, la capa superficial del núcleo se seccionó en un disco de 6 cm de grosor; a partir de ahí y hasta una profundidad de 20 cm, se obtuvieron discos de 2 cm de grosor; para la parte del núcleo correspondiente a una profundidad de entre 20 y 50 cm, se dio a los discos un grosor de 5 cm, y de 50 cm hasta el fondo del núcleo, el grosor de los discos fue de 10 centímetros.

## Modificaciones al método de obtención de núcleos en Washington y Oregón

Los métodos para la obtención de núcleos y muestras de sedimentos se optimizaron para los sitios en Washington (fechas de muestreo: del 19 al 24 de mayo de 2016) y Oregón (fechas de muestreo: 25 y 26 de mayo de 2016), con base en los aprendizajes adquiridos durante el muestreo inicial en Columbia Británica. La investigación tuvo por objetivo obtener datos sobre el almacenamiento de carbono para lechos de pastos marinos de los dos estados, a partir tanto de núcleos de sedimentos profundos (~1 m) como de núcleos someros, espacialmente distribuidos. El muestreo se llevó a cabo en dos sitios en el estrecho de Puget, Washington, y dos sitios en la bahía Coos, Oregón. Cada sitio objeto de muestreo es también un sitio de monitoreo a largo plazo perteneciente a la red SeagrassNet, y los núcleos de sedimentos con carbono azul se obtuvieron en forma simultánea a los monitoreos anuales realizados por SeagrassNet. En cada pradera, el muestreo comprendió tanto núcleos obtenidos con jeringa (de 10 cm) a lo largo de transectos pertenecientes a la red SeagrassNet y en sitios de referencia (tres réplicas de núcleos en cada uno), como tres núcleos (~1 m) recolectados en un sitio adyacente al transecto del sitio permanente de SeagrassNet.

En ambos casos (Washington y Oregón), la recolección de muestras de núcleos se realizó siguiendo el mismo procedimiento descrito para Columbia Británica, salvo que el tubo de núcleos se insertó en los sedimentos utilizando un motor vibratorio (martillo percutor Milwaukee), lo que permitió introducir el tubo en el sedimento con mucha menor compactación que la resultante de golpear con una almádena o mazo (véase la gráfica 4). (Las pruebas de compactación durante la inserción del muestreador de núcleos realizadas en Washington arrojaron una compactación del núcleo de 18 a 27 por ciento utilizando el mazo, en comparación con entre 4 y 10 por ciento al usar el motor vibratorio.)

Para la remoción del tubo muestreador de núcleos también se lograron mejoras en comparación con el método utilizado en Columbia Británica. El procedimiento consistió en: 1) antes de extraer el muestreador, tomar un tramo de conducto de acero de 150 cm (cinco pies) de longitud y 1.27 cm (media pulgada) de diámetro y adaptarle en el extremo inferior un perno de cabeza redonda de 1" flojo; 2) introducir el conducto en el sedimento a lo largo de la parte externa del muestreador hasta que su parte superior quedara a la misma altura que la del muestreador; 3) jalar el conducto hacia arriba ligeramente, apenas unos 13 mm (media pulgada), con lo que se liberaba el perno, de tal forma que se convirtiera en una especie de respiradero o esnórquel que permitía la entrada de aire, eliminando con ello la succión en la base del núcleo, y 4) retirar el tubo

nucleador siguiendo el mismo procedimiento aplicado en Columbia Británica. La extrusión o extracción del núcleo, por su parte, se llevó a cabo siguiendo exactamente el mismo protocolo que en Columbia Británica. Cabe señalar que varios de los núcleos sedimentarios de Washington se vieron alterados por sustratos rocosos y por la presencia de grandes conchas y almejas rey (*Panopea generosa*).

## Métodos y resultados de laboratorio

Con los análisis de laboratorio se perseguían los siguientes objetivos: 1) determinar las reservas de carbono sedimentario (en  $\text{kg-C m}^{-2}$ ) hasta 1 m por debajo de la superficie sedimentaria en praderas marinas y lechos de pasto marino de referencia; 2) identificar las fuentes de carbono orgánico sedimentario; 3) calcular los índices de sedimentación y acumulación de carbono ( $\text{g-C m}^{-2} \text{año}^{-1}$ ) para las diferentes regiones, y 4) describir las características de los sedimentos que podrían ayudar a explicar la variación en las reservas de carbono orgánico.

Los métodos descritos a continuación se adhieren a los procedimientos pormenorizados al principio de este informe. Los núcleos se extrajeron en campo y se empacaron en bolsas etiquetadas: a) una muestra de 30 cc para análisis de laboratorio, y b) el resto de la sección (en una bolsa más grande) para análisis de tamaño del grano y para conservar los sedimentos excedentes. Las primeras se mantuvieron congeladas a una temperatura de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  y las segundas debían almacenarse ya fuera en un refrigerador o bien en un congelador, pero evitando descongelarlas y volverlas a congelar múltiples veces. Las muestras se mantuvieron en

### Gráfica 4. Obtención de núcleos de sedimentos con martillo percutor



Para la obtención de núcleos de sedimentos resultó de gran utilidad el uso de un motor vibratorio —un martillo percutor de batería—, colocado sobre una barra de metal dispuesta en la parte superior del tubo nucleador. Al aplicar presión, el tubo se iba introduciendo en forma lenta y firme en el sedimento, con una compactación mínima.

congelación durante su transportación hacia la Universidad de Columbia Británica (UBC, por sus siglas en inglés), y no se sacaron del congelador sino hasta el momento de prepararlas para el proceso de liofilización. El procesamiento de las muestras se llevó a cabo en el laboratorio de geoquímica del Departamento de Ciencias de la Tierra, los Océanos y la Atmósfera (*Department of Earth, Ocean and Atmospheric Sciences*) y el laboratorio de isótopos estables (*Stable Isotope Facility*) del Departamento de Ciencias Forestales y Conservación (*Department of Forestry and Conservation Sciences*), ambos de la UBC.

El primer paso para los análisis de laboratorio consistió en liofilizar (secar por congelación) cada muestra de 30 cc. En los casos en que los pesos húmedos no se habían registrado al momento de recogerse las muestras, se les obtuvo antes del secado a fin de calcular la porosidad y el contenido de agua de los sedimentos. Las muestras se procesaron en un liofilizador marca Edwards Modulyo durante aproximadamente una semana, o hasta que se habían secado por completo. Las bolsas Whirl-Pak o Ziploc se entreabrieron antes de colocarlas en el liofilizador con el propósito de asegurar que las muestras se secaran por completo. Una vez secas, se obtuvo el peso en seco, en microgramos, de cada muestra de 30 cc utilizando una balanza Mettler Toledo XP205.

Tras obtener el peso en seco, cada una de las muestras se redujo a un polvo fino utilizando un molino Herzog HSM 100. Antes de la pulverización, se hizo un registro de las partículas de mayor tamaño (por ejemplo, rocas, trozos de madera, infauna, material vegetal inerte, conchas) presentes, así como cualquier otra observación general sobre la muestra (entre otras: sedimentos de grano muy fino, arenas con conchas trituradas). Toda la biomasa de pasto marino vivo visible (es decir, brotes, raíces o rizomas) se retiró de las muestras; sin embargo, se reconoce la posibilidad de que pequeños fragmentos de material vivo (radículas pequeñas, por ejemplo) se hayan triturado con la muestra, sobre todo en las muestras de superficie. Los contenedores del molino se limpiaron minuciosamente entre una muestra y otra para evitar la contaminación cruzada. Cada muestra se molió por tres minutos. En el caso de muestras con cantidades importantes de conchas trituradas o partículas de mayor grosor, fue necesario dividir la muestra hasta en dos o tres porciones menores para asegurar una molienda suficiente (los lotes separados se volvieron a combinar y se mezclaron después de la molienda). Las muestras completamente pulverizadas se regresaron a sus respectivas bolsas.

Las muestras pulverizadas se sometieron a cuatro tipos de análisis distintos: 1) análisis elemental de carbono total (% C) y nitrógeno (% N); 2) análisis por coulombimetría para determinar el carbono inorgánico total (% CIT); 3) análisis

de isótopos estables para determinar los valores  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{15}\text{N}$ , y 4) análisis de datación radioisotópica con  $^{210}\text{Pb}$  y  $^{226}\text{Ra}$  para determinar la edad de los sedimentos y, a partir de ello, los índices de acumulación sedimentaria. (Véase el cuadro en el apéndice, donde se enlistan todas las muestras de núcleos, las muestras de 30 cc obtenidas de sitios SeagrassNet y de referencia, y los análisis efectuados en cada una.)

Los resultados de laboratorio demostraron que, en promedio, los porcentajes de carbono total y nitrógeno más elevados se registraron en el sitio de Oregón, seguido por Columbia Británica y, en tercer lugar, Washington. Los valores promedio con su error estándar ( $\pm$ ), al combinar los núcleos largos y los pequeños, obtenidos con jeringa, en cada región, fueron de  $1.31 \pm 0.053$ ,  $0.67 \pm 0.060$  y  $0.32 \pm 0.025$  por ciento de carbono y de  $0.08 \pm 0.004$ ,  $0.06 \pm 0.005$  y  $0.02 \pm 0.001$  por ciento de nitrógeno para Oregón, Columbia Británica y Washington, respectivamente.

El contenido de carbonato de los sedimentos y el carbono inorgánico porcentual resultaron, en general, bastante bajos (<1% en casi todos los casos), pero para algunas muestras —en particular, en el sitio de Washington— el carbono total resultó también bastante bajo y, por consiguiente, el carbono inorgánico representó entre 20 y 60 por ciento del carbono total. En términos generales, se observaron valores elevados de carbono inorgánico total en la presencia de conchas de bivalvos al interior de los segmentos de núcleo. Los valores promedio del porcentaje de CIT ( $\pm$  el error estándar), al combinar todos los núcleos largos y de jeringa en cada región, fueron de  $0.017 \pm 0.003$ ,  $0.099 \pm 0.024$  y  $0.068 \pm 0.015$  para Oregón, Columbia Británica y Washington, respectivamente. Esto corresponde, en promedio, a 1.3, 14.7 y 21 por ciento del carbono total para Oregón, Columbia Británica y Washington, respectivamente.

Para calcular el porcentaje de carbono orgánico cada subsección (segmento o disco de sedimentos) de cada núcleo, se restó el porcentaje de carbono inorgánico del porcentaje de carbono total. Los valores promedio ( $\pm$  el error estándar) de los porcentajes de carbono orgánico, al combinar todos los núcleos largos y de jeringa en cada región, fueron de  $1.285 \pm 0.053$ ,  $0.569 \pm 0.051$  y  $0.248 \pm 0.053$  para Oregón, Columbia Británica y Washington, respectivamente.

Todos los sedimentos medidos estuvieron compuestos predominantemente por arena fina, siendo la superficie sedimentaria del sitio Hidden Creek en Oregón (OR HC) la que presentó un mayor contenido de lodo (25-46 por ciento), así como la arena menos gruesa (26%). El mayor porcentaje de arena se observó en los sitios WA 50.2, BC y OR 25.1, donde la fracción de arena fue la misma. WA 50.1 registró el contenido más bajo de lodo (2%) y la mayor cantidad de arena gruesa (35 por ciento).

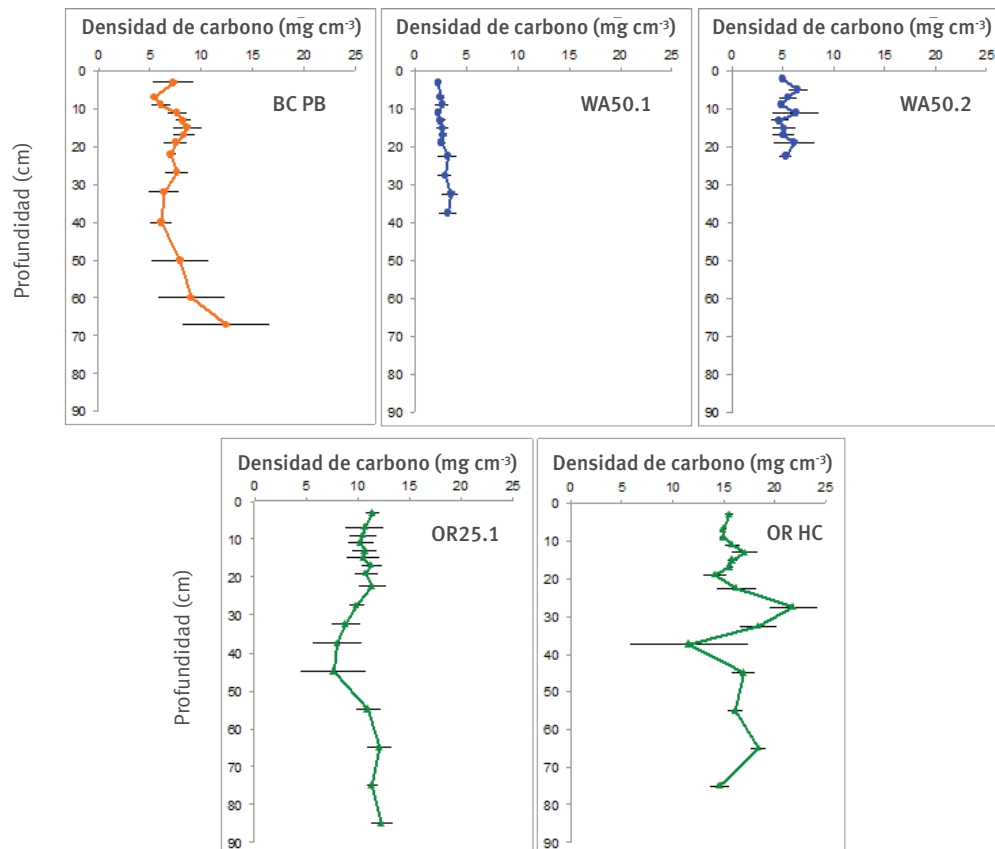
La densidad aparente promedio de los sedimentos de los lechos de *Zostera marina* para los cinco sitios objeto de este estudio osciló entre  $\sim 1.0$  y  $1.6 \text{ g m}^{-3}$  y no mostró ninguna tendencia o patrón consistente respecto de la profundidad en el núcleo. Los pesos húmedo y seco de las muestras de 30 cc se emplearon para calcular la densidad aparente en seco de los sedimentos y el porcentaje de humedad. El sitio OR HC, en Hidden Creek, presentó una menor densidad aparente que los otros sitios. La densidad de carbono en los sedimentos ( $\text{mg-C m}^{-3}$ ) se calculó a partir de la densidad aparente y el contenido de carbono sedimentario (véase la gráfica 5).

Por cuanto a  $\delta^{13}\text{C}$ , los valores promedio obtenidos fueron negativos, con Oregón al frente ( $-23.19 \pm 0.275$ ), seguido por Washington ( $-19.48 \pm 0.863$ ) y Columbia Británica ( $-16.23 \pm 0.635$ ) (véase la gráfica 6). El rango para el conjunto de las muestras y sitios osciló entre  $-11.94$  y  $-24.26\%$   $\delta^{13}\text{C}$ . Para los valores promedio de  $\delta^{15}\text{N}$ , el correspondiente al sitio BC fue el más positivo ( $7.18 \pm 0.201$ ), seguido por Oregón ( $6.94 \pm 0.125$ ) y después Washington ( $6.80 \pm 0$ ). Los valores promedio resultaron similares entre todas las muestras y sitios, con un rango de 6.3 a 8.2‰ en la  $\delta^{15}\text{N}$ .

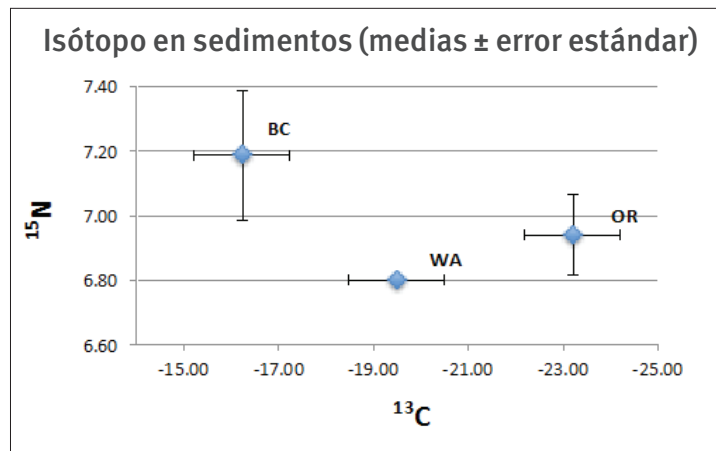
Los isótopos de  $^{13}\text{C}$  y  $^{15}\text{N}$  en los sedimentos de lechos de *Zostera marina* muestran claramente distintas fuentes de carbono para los tres sitios, mientras que únicamente para Columbia Británica y Washington se registraron diferencias en cuanto a las fuentes de nitrógeno. El valor  $^{13}\text{C}$  para el sitio OR fue considerablemente menor que los correspondientes a los sitios WA y BC (véase la gráfica 6), mismos que a su vez resultaron comparables a los de otros sedimentos de *Z. marina* (Rohr *et al.*, 2016).

Utilizando el índice de acumulación en masa sedimentaria derivado de los resultados obtenidos del análisis de datación con  $^{210}\text{Pb}$ , con la fracción de carbono orgánico, se determinaron los índices de acumulación de carbono a diferentes profundidades para cinco núcleos largos. (Véase la columna correspondiente al análisis de datación con  $^{210}\text{Pb}$  en el cuadro del apéndice.) En el sitio de Columbia Británica y los dos de Oregón, dicha acumulación difirió entre un sitio y otro, y pareció estar relacionada con la extensión de la cubierta de *Z. marina* en distintos momentos en el sitio en cuestión. El sitio de Columbia Británica mostró una acumulación de baja a constante en lo que hoy día es un lecho de *Z. marina* con

Gráfica 5. Densidad de carbono en núcleos de sedimentos de los sitios de Columbia Británica (BC), Washington (WA) y Oregón (OR)



Gráfica 6. Datos de isótopos de carbono ( $^{13}\text{C}$ ) y nitrógeno ( $^{15}\text{N}$ ) para los sedimentos de lechos de *Zostera marina* en los sitios de Columbia Británica (BC), Washington (WA) y Oregón (OR)



cubierta moderada, aunque se observó una rápida acumulación entre la década de 1950 y la de 1990, seguida de un intervalo de acumulación muy elevada alrededor de 2004, para luego registrarse una disminución hacia 2016. En Oregón, el sitio de Hidden Creek (OR HC) registró en 2016 una acumulación moderada con una presencia escasa de *Z. marina*, en tanto que en el sitio de South Slough de la red SeagrassNet (OR 25.1) se observó una elevada acumulación en un denso lecho de *Z. marina*; en este caso, el sedimento se ha acumulado a un ritmo cada vez mayor desde principios de la década de 1900.

La acumulación de carbono correspondió al índice global de acumulación sedimentaria. Al comparar el almacena-

miento de carbono en los primeros 18 cm respecto de los 10 cm superiores de todos los núcleos, se observa el mismo patrón de acumulación de carbono, siendo los núcleos de los dos sitios de Washington los que registraron el menor almacenamiento de carbono, y Hidden Creek en Oregón (dos núcleos) el que presentó la mayor cantidad (véase el cuadro 1). Entre los sitios de Oregón y Columbia Británica, el índice de acumulación de carbono fue menor en el sitio BC (un núcleo) y mayor en OR 25.1. Resultó imposible obtener información de datación o índices de acumulación de carbono a partir de los núcleos de los sitios de Washington porque el  $^{210}\text{Pb}$  se encontraba en niveles de referencia y no pudo detectarse ninguna señal.

Cuadro 1. Porcentaje de la cubierta de *Zostera marina*, y reservas e índices de acumulación de carbono para el sitio de Columbia Británica y los dos de Oregón, con base en los núcleos largos obtenidos en cada sitio ( $\text{t-C km}^{-2} \text{ año}^{-1} = \text{g-C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ )

Sitio	Cubierta de <i>Zostera marina</i> %	Reserva de carbono (18 cm superiores) $\text{kg-C m}^{-2}$	Reserva de carbono (10 cm superiores) $\text{kg-C m}^{-2}$	Índice de acumulación de carbono (10 cm superiores) $\text{g-C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$
BC PB	65	1.37	0.62	7.8
WA 50.1	34	0.42	0.22	-
WA 50.2	10	0.71	0.27	-
OR 25.1	70	2.35	1.32	32.4
OR HC	25	2.81	1.56	26.4



## Conclusiones

El protocolo para la recolección de núcleos de sedimentos profundos en lechos de *Zostera marina* descrito en este informe se aplicó para determinar la capacidad de captación y almacenamiento (secuestro) de carbono en sedimentos de lechos de este pasto marino en el Pacífico Noroeste de América del Norte, específicamente en Columbia Británica (BC, por sus siglas en inglés), Canadá, y Washington (WA) y Oregón (OR), Estados Unidos. El contenido de carbono en los sedimentos de lechos de *Z. marina* estudiados resultó bastante consistente entre réplicas de núcleos obtenidos en un mismo sitio, pero difirió entre los estados y la provincia, así como entre un sitio y otro. En Oregón, el sitio de Hidden Creek (OR HC) destaca entre los demás sitios objeto de estudio por su considerablemente más elevado contenido de carbono en todos sus perfiles de profundidad. El contenido de carbono de las capas superficiales observado en los cinco núcleos largos [para los que se determinaron índices de acumulación de carbono a diferentes profundidades] oscila entre 0.16 y 1.92 por ciento; es decir, se encuentra en el mismo rango que los contenidos de carbono observados en praderas de *Z. marina* en Finlandia y Dinamarca (Röhr *et al.*, 2016).

La densidad aparente es una medida del peso de la porción no acuosa de los sedimentos por unidad de volumen [peso específico]. Una baja densidad aparente indica un mayor contenido de agua. Cuando se conoce la densidad aparente, es posible calcular la cantidad de carbono por volumen de sedimentos. Los sedimentos con mayor contenido de carbono retienen más agua y, por ende, tienen una menor densidad aparente. Las densidades aparentes en seco de los sedimentos medidas en Columbia Británica, Washington y Oregón son representativas de las de otras áreas con presencia de *Zostera marina* (Rohr *et al.*, 2016), aun si la del sitio OR HC de Oregón resultó menor que las de los demás sitios estudiados. Los perfiles de profundidad de la densidad aparente demuestran un entorno sedimentario distinto a lo largo del último siglo en Hidden Creek, en comparación con los otros sitios objeto de estudio. Los datos correspondientes al tamaño del grano de los sedimentos para los distintos sitios muestran claramente la presencia de sedimentos más lodosos en el sitio OR HC —localizado en un canal remoto (véase la gráfica 1)—, lo mismo para las muestras obtenidas al interior del lecho de *Z. marina* que para las de las zonas de referencia sin vegetación.

La densidad de carbono, calculada a partir de la densidad aparente y su fracción de carbono, representa una muy útil medición de la distribución de carbono a lo largo del perfil sedimentario (véase la gráfica 5). Estos perfiles muestran claramente la cantidad promedio de carbono en los diferentes sitios de donde se obtuvieron los núcleos, así como en las capas sedimentarias de cada sitio. El sitio Hidden Creek, en Oregón, registró la mayor densidad de carbono en toda la longitud del núcleo, con un promedio de  $16 \text{ mg-C m}^{-3}$ . En contraste, los valores más bajos se observaron en el sitio WA50.1, donde los valores de densidad de carbono en toda la profundidad del núcleo promediaron  $2.8 \text{ mg-C m}^{-3}$ .

El análisis de datación con  $^{210}\text{Pb}$  de un núcleo sedimentario de cada sitio permitió determinar los índices de acumulación de carbono en los sedimentos. La edad de las secciones de los núcleos se determinó mediante la medición de la cantidad de  $^{210}\text{Pb}$  excedente en comparación con los isótopos de Pb de referencia. El análisis de los sedimentos en los sitios de Oregón y Columbia Británica demuestra un índice de acumulación mayor hoy día que en el pasado reciente. En estos lugares, la profundidad máxima de los núcleos se remonta a la década de 1950 para BC, a 1930 para OR HC y a 1910 para OR 25. En el caso del estrecho de Puget, Washington, el contenido excedente de  $^{210}\text{Pb}$  del sedimento fue sumamente reducido como para poder obtener fechas de los núcleos sedimentarios, probablemente debido al elevado contenido de arena en los sedimentos (>95%) y el bajo contenido de carbono orgánico (0.02%). Al calcular los índices de acumulación de carbono fue posible constatar que el más elevado — $32.4 \text{ g-C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ — se registró en OR 25.1, en tanto que el más bajo — $7.8 \text{ g-C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ — correspondió al sitio BC (véase el cuadro 1). El almacenamiento de carbono asociado en los segmentos superiores (primeros 18 cm) de sedimentos para estos tres sitios (BC, OR HC y OR 25.1) es de 1.4, 2.4 y  $2.8 \text{ kg-C m}^{-2}$ , respectivamente. El almacenamiento de carbono para profundidades de sedimentos comparables en los sitios de Washington es considerablemente menor, con 0.43 y  $0.71 \text{ kg-C m}^{-2}$  para WA50.1 y WA50.2, respectivamente.

Los índices de secuestro de carbono (índices de acumulación) y los valores de almacenamiento de carbono aportan medidas concretas de capacidad de captación y almacenamiento de carbono azul en los tres sitios objeto de estudio, pero no se les ha de considerar representativos de todo el territorio de regiones extensas. Se precisan investigaciones ulteriores en distintos tipos de hábitat de *Z. marina*, así como en el conjunto de estos lugares, para generar un rango de valores representativo. En futuras investigaciones será necesario tomar en cuenta ciertas inquietudes a fin de mejorar las mediciones de carbono sedimentario, a saber: la compactación de los núcleos generada por la inserción vigorosa del tubo en los sedimentos (misma que puede mitigarse en parte utilizando un martillo vibratorio en vez de un mazo, y también evitando forzar el núcleo a penetrar más allá de la capa de sedimentos de *Z. marina*); la pérdida de agua intersticial o capilar que drena del núcleo después de la recolección y afecta las mediciones de contenido de humedad y densidad aparente, y la presencia de conchas, rocas y bivalvos en el núcleo.

Para tener una idea sobre el origen del carbono sedimentario, se llevaron a cabo análisis de los isótopos estables en los sedimentos de *Z. marina*. Una comparación de los isótopos de nitrógeno (N) con los de carbono permitió examinar los materiales fuente y mostró las distintas fuentes de  $^{13}\text{C}$  presentes en los diferentes lugares. La separación o rango entre los valores de  $^{15}\text{N}$  fue considerablemente menor. Para entender las posibles fuentes que podrían haber intervenido en los distintos lugares, los datos isotópicos del análisis de este estudio se superpusieron a un esquema de dominios (o zonas) de fuentes, derivado de Cloern *et al.* (2002).

La materia orgánica de los sedimentos en los sitios de Oregón tiene su origen básicamente en los pastos de *Z. marina*, con un probable aumento por la presencia de plantas con vía de cuatro carbonos ( $\text{C}_4$ ) de marismas salobres; los sedimentos de los sitios de Washington, en la orilla expuesta del estrecho de Puget, corresponden probablemente a una mezcla de *Z. marina*, fitoplancton y algas, y en el sitio de Columbia Británica predominan *Z. marina*, plantas  $\text{C}_4$  de marismas y fitoplancton. La distribución de los isótopos  $^{15}\text{N}$  en los tres sitios indica que todos se encuentran en el rango inferior de los valores correspondientes a *Z. marina*, lo que sugiere que estos lechos de pasto marino no están significativamente afectados por fuentes antropogénicas de N. Los valores excedentes de  $^{13}\text{C}$  para Columbia Británica y Washington se ubicaron dentro de los rangos calculados para sitios muestreados en el Báltico (Röhr *et al.*, 2016); sin embargo, los valores obtenidos para los sitios de Oregón, localizados en un cenagal rodeado por marismas salobres, resultaron ligeramente más elevados (con un mayor contenido de  $^{13}\text{C}$ ).

Los resultados muestran que el hábitat de *Zostera marina* tiene capacidad para secuestrar y almacenar carbono no únicamente gracias a los pastos marinos mismos, sino también a través del hábitat adyacente o circundante. Oregón presentó la mayor capacidad de almacenamiento de carbono por metro cuadrado, al igual que los más altos índices de secuestro de entre los tres sitios objeto de estudio, mientras que Columbia Británica registró la mitad de esa capacidad y Washington, a su vez, la mitad de la de BC. Sin embargo, dadas las distintas características de estos sitios, con marcadas diferencias en el tamaño de los granos sedimentarios, en las fuentes de carbono orgánico y en las condiciones aparentes de exposición a olas, es probable que las divergencias observadas entre Columbia Británica, Washington y Oregón no obedezcan exclusivamente a la separación geográfica. Los hallazgos de la presente investigación sugieren que esta vasta región geográfica tiene una capacidad mínima de almacenamiento de  $0.4$  a  $2.8 \text{ kg-C m}^{-2}$  y un índice mínimo de secuestro de  $7.8$  a  $32.4 \text{ g-C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ . Estos resultados por cuanto a la capacidad de secuestro son comparables con los registrados para el estuario Kõmoks, Columbia Británica, con  $22.8 \text{ g-C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$  (Hodgson y Spooner, 2016), así como para Finlandia,  $5.2 \text{ g-C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ , y Noruega,  $35.2 \text{ g-C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$  (Röhr *et al.*, 2016).

Los métodos de muestreo descritos en el presente informe —con tubos nucleadores de bajo costo, dispositivos de extrusión fabricados, un motor vibratorio para una penetración de los núcleos sin compactación y un tubo de respiración tipo esnórquel para extracción— produjeron resultados que reflejan las condiciones de almacenamiento de carbono en una gama de entornos de *Z. marina* en la región del Pacífico Noroeste. Haciendo uso de dichos métodos, se obtuvieron algunos datos preliminares de mediciones de carbono azul para esta región y se calculó la capacidad de captación y almacenamiento (secuestro) de carbono de tales hábitats.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer a los numerosos científicos y voluntarios que contribuyeron a la realización del presente proyecto: Dante Torio, de la Universidad de Nuevo Hampshire, Estados Unidos; científicos, miembros de personal y voluntarios del Instituto Hakai, Costa Oeste, Columbia Británica; la Universidad de Columbia Británica; el Departamento de Recursos Naturales (*Department of Natural Resources*) del estado de Washington, la Universidad de Washington y la Reserva Nacional de Investigación Estuarina de South Slough (*South Slough National Estuarine Research Reserve*), Oregón. Asimismo, extienden un agradecimiento especial a Cathy Short, quien colaboró en la redacción y edición del informe.

## Referencias

- Barbier, E. E. B., S. D. S. Hacker, C. Kennedy, E. W. Koch, A. C. Stier y B. R. Silliman (2011), "The value of estuarine and coastal ecosystem services", *Ecological Monographs*, núm. 81(2).
- Cloern, J. E., E. A. Canuel y D. Harris (2002), "Stable carbon and nitrogen isotope composition of aquatic and terrestrial plants of the San Francisco Bay estuarine system", *Limnol. Oceanogr.*, núm. 47, pp. 713-729.
- Duarte, C. M., J. J. Middelburg y N. Caraco (2005), "Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle", *Biogeosciences*, núm. 2, pp. 1-8.
- Fourqurean, J. W., C. M. Duarte, H. Kennedy, N. Marbà, M. Holmer, M. A. Mateo, O. Serrano *et al.* (2012), "Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock", *Nature Geoscience*, núm. 5(7), pp. 505-509.
- Hejnowicz, A. P., H. Kennedy, M. A. Rudd y M. R. Huxham (2015), "Harnessing the climate mitigation, conservation and poverty alleviation potential of seagrasses: prospects for developing blue carbon initiatives and payment for ecosystem service programmes", *Frontiers in Marine Science* 2, núm. de junio, pp. 1-22.
- Hodgson, C. y A. Spooner (2016), *Estuarios K'omoks y Squamish: proyecto piloto sobre carbono azul*, informe final presentado por la Sociedad de la Cuenca del Proyecto sobre el Valle de Comox (*Comox Valley Project Watershed Society*) a la Alianza de América del Norte para la Acción Comunitaria Ambiental (NAPECA, por sus siglas en inglés) de la Comisión para la Cooperación Ambiental.
- Macreadie, P. I., M. E. Baird, S. M. Trevathan Tackett, A. W. D. Larkum y P. J. Ralph (2014), "Quantifying and modeling the carbon sequestration capacity of seagrass meadows – A critical assessment", *Marine Pollution Bulletin*, núm. 83(2), pp. 430-439.
- McLeod, E., G. L. Chmura, S. Bouillon, R. Salm, M. Björk, C. M. Duarte, B. R. Silliman *et al.* (2011), "A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO<sub>2</sub>", *Frontiers in Ecology and the Environment*, núm. 9, pp. 552-560.
- Pendleton, L., D. C. Donato, B. C. Murray, S. Crooks, W. A. Jenkins, S. Sifleet y A. Baldera (2012), "Estimating global 'blue carbon' emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems", *PLOS ONE*, núm. 7(9).
- Röhr M. E., C. Boström, P. Canal Vergés y M. Holmer (2016), "Blue carbon stocks in Baltic Sea eelgrass (*Zostera marina*) meadows", *Biogeosciences*, núm. 13, pp. 6139-6153.

## Apéndice: Núcleos recolectados y analizados

Región	Núcleos	Longitud total del núcleo (cm)	Número de subsecciones	Carbono total	Carbono inorgánico total	Datación con <sup>210</sup> Pb	Isótopos estables
Columbia Británica (BC)	Bahía de Pruth A	80	16	✓	✓	✓	✓
	Bahía de Pruth B	74	16	✓	✓		✓
	Bahía de Pruth C	70	15	✓	✓		✓
	SeagrassNet	10	0 (3 réplicas)	✓	✓		✓
	Referencia	10	0 (3 réplicas)	✓	✓		✓
Washington (WA)	50.1-1	57	16	✓	✓	✓	✓
	50.1-2	57	16	✓	✓		✓
	50.1-3	40	12	✓	✓		✓
	50.2-1	10	4	✓	✓		✓
	50.2-2	25	10	✓	✓		✓
	50.2-3	25	10	✓	✓	✓	✓
	SeagrassNet	10	0 (3 réplicas)				
	Referencia	10	0 (3 réplicas)	✓	✓		✓
Oregón (OR)	HC-1	100	18	✓	✓	✓	✓
	HC-2	78	16	✓	✓		✓
	HC-3	100	18	✓	✓		✓
	SeagrassNet	10	0 (2 réplicas)	✓	✓		✓
	Referencia	10	0 (3 réplicas)	✓	✓		✓
	25.1-1	90	17	✓	✓	✓	✓
	25.1-2	105	19	✓	✓		✓
	25.1-3	100	18	✓	✓		✓
	SeagrassNet	10	0 (3 réplicas)	✓	✓		✓
	Referencia	10	0 (3 réplicas)	✓	✓		✓