



© RODERIC B. MAST, CI

## Sensores remotos y mapeo

## INTRODUCCIÓN

Acceder a ecosistemas costeros tales como manglares, marismas y pastos marinos para realizar muestreos de campo puede ser costoso, difícil o peligroso. Además, no se prestan fácilmente a regímenes convencionales de muestreo manual, son tan grandes que es posible que no se llegue a estudiarlos dentro de las limitaciones de tiempo del proyecto, o requieren de un análisis de cambio cuando no se han realizado muestreos previos en el área. Dados estos impedimentos, los sensores remotos pueden brindar información única y valiosa sobre la estructura de la vegetación costera y la cobertura del área que de otro modo no podría obtenerse fácilmente.

Para medir el carbono azul, los sensores remotos son fundamentales para determinar la extensión del ecosistema, la estratificación y el diseño de parcelas, las mediciones de biomasa y para analizar el uso de la tierra y el cambio en la existencia de carbono a través del tiempo en la contabilidad de carbono a nivel nacional. Las mediciones con sensores remotos se pueden hacer con distintas resoluciones espaciales y, en función del sensor, pueden identificar distintas características biofísicas y estructurales de las comunidades vegetales costeras. Además, una vez en funcionamiento, los satélites son una fuente constante de información durante muchos años y ofrecen un monitoreo por décadas y a gran escala de cambios naturales y antrópicos en los ecosistemas.

Aquí brindamos directrices sobre las posibilidades y las limitaciones de distintos enfoques en los que se utilizan sensores remotos. En este capítulo no pretendemos describir cómo utilizar sensores remotos. Recomendamos invitar a expertos al proyecto para que colaboren en la recolección y el análisis de los datos reales. En su lugar, el objetivo de este capítulo es brindar información para que el lector se familiarice con los procedimientos y las opciones, y así pueda transmitir sus necesidades más efectivamente a los expertos en sensores remotos.

## FUNDAMENTOS DEL USO DE SENSORES REMOTOS

Aquí describimos brevemente los conceptos básicos del uso de sensores remotos. Hay una gran cantidad de libros y revisiones de literatura dedicados a este tema que brindan información de respaldo más detallada, así como también las aplicaciones posibles (Green *et al.* 2000; Klemas 2010; Kuenzer *et al.* 2011; Giri 2012; Rees & Rees 2012).

### Técnicas pasivas en comparación con técnicas activas

Los sistemas de sensores remotos se pueden clasificar como pasivos o activos en función de la fuente de energía que detectan. Los sensores pasivos registran la luz solar reflejada (ópticos) y la temperatura emitida (térmicos) de la superficie de la Tierra. En la actualidad, las imágenes ópticas y térmicas representan los conjuntos de datos disponibles más frecuentes para el monitoreo de ecosistemas costeros. Las imágenes ópticas son fáciles de utilizar e interpretar, pero las imágenes pueden verse obstaculizadas por la nubosidad permanente, habitual en regiones tropicales donde se encuentran muchos de estos ecosistemas. En comparación, los sistemas activos transmiten sus propios pulsos de energía y miden el tiempo de propagación y la intensidad del pulso que se refleja desde la superficie de vuelta al sensor. Los sensores remotos activos pueden ser más costosos, pero pueden atravesar nubes y doseles densos y, por lo tanto, proporcionar más información.

Cada sensor trabaja con bandas específicas del espectro de luz (colores) para generar imágenes. Las bandas son un conjunto de longitudes de onda o frecuencias similares. Por ejemplo, la luz visible

está formada por bandas azules, verdes y rojas del espectro electromagnético. Otras bandas incluyen ondas de radio, microondas (radar) y ondas infrarrojas. Las ondas visibles (azules, verdes y rojas), el infrarrojo cercano (near-infrared, NIR) y las microondas se usan principalmente para estudios de la vegetación costera.

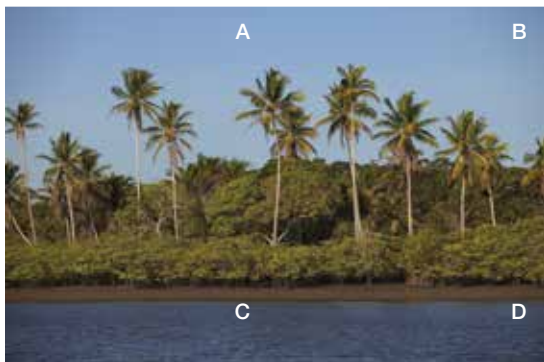
Tanto las técnicas activas como pasivas presentan ventajas y desventajas inherentes a cada una (**Tabla 6.1**). Combinar los datos de ambas técnicas es una opción posible que, a menudo, puede ofrecer información única no detectable mediante un solo método.

**Tabla 6.1** Ventajas y desventajas de las técnicas de sensores remotos.

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>Pasivas</b>	Por lo general, los datos son más fáciles de interpretar, ya que se producen imágenes similares a las de una cámara. El reflejo de las distintas bandas del espectro se puede utilizar para clasificar tipos de cobertura del suelo y especies vegetales. El estado de la vegetación se puede inferir a partir de reflejos del infrarrojo y del infrarrojo cercano.	Requieren de luz solar para generar imágenes. Se deben tener en cuenta los cambios de estación (regiones polares con grandes variaciones en la duración de la luz diurna según la estación, por ejemplo). La nubosidad puede limitar la capacidad de obtención de imágenes porque las nubes dispersan y absorben la luz (regiones ecuatoriales que suelen presentar nubosidad en forma constante todo el año).
<b>Activas</b>	Transmiten sus propios pulsos de energía que, a menudo, no dependen del tiempo ni de la luz diurna. Se puede comparar las imágenes directamente con los mismos parámetros (modo, ángulo de incidencia, polarización y nivel de procesamiento).	Pueden ser más costosas. Las imágenes son más difíciles de analizar y pueden diferir drásticamente en función de los parámetros utilizados.

## Resolución

Cuando se utilizan sensores remotos, la unidad fundamental para la recolección de datos se denomina pixel y se define en términos de las dimensiones del terreno. Por lo general, se presenta como un valor único que representa la longitud de un lado de un cuadrado. Por ejemplo, una resolución espacial de 30 metros significa que un pixel representa un área de 30 metros por 30 metros en el terreno. La resolución de una imagen es un indicador de su nivel posible de detalle. Cuanto más pequeño sea el pixel, mayor será el detalle (**Fig. 6.1**). En otras palabras, con datos de una resolución de 30 metros se podría identificar un rasgo del terreno que fuese de 30 metros por 30 metros (útil para mapear la extensión del ecosistema).



**Figura 6.1** Efecto del tamaño de pixel en la apariencia visual de un área.

- (A) Tamaño de pixel de 10 m.
- (B) Tamaño de pixel de 20 m.
- (C) Tamaño de pixel de 40 m.
- (D) Tamaño de pixel de 80 m.

(© Centre for Remote Imaging, Sensing & Processing)

Cualquier elemento que mida menos de 30 metros por 30 metros requiere de una resolución más baja (se puede utilizar una resolución de 10 metros para monitorear el avance de la agricultura). Recomendamos comenzar con imágenes satelitales de resolución más baja para obtener un panorama de la extensión del ecosistema y su estado en general. Luego siga con imágenes de alta resolución solo en áreas de interés en particular. En la mayoría de los casos, imágenes con una resolución de 30 metros de acceso libre y gratuito serán suficientes para mapear el ecosistema de carbono azul.

## CONJUNTOS DE DATOS DISPONIBLES

Muchos países han lanzado en órbita satélites equipados con instrumentos para monitorear la superficie de la Tierra desde la década de 1970, lo que ha creado un enorme archivo de datos. No obstante, esta riqueza de datos puede ser abrumadora y no todos los datos son de acceso libre y gratuito para el público. Además de los datos satelitales, también se han utilizado fotografías aéreas para el monitoreo costero, en especial después de desastres naturales o antrópicos (como huracanes o derrames de petróleo), pero estos conjuntos de datos son muy limitados, están orientados a la investigación y no son fáciles de obtener. En la actualidad, los conjuntos de datos de los Landsat, de los sensores MODIS, de la SRTM, del PALSAR y del GLAS del ICESat son apropiados y de acceso libre y gratuito para los fines operacionales de estudiar ecosistemas costeros a escala global. Todos estos se describen en detalle a continuación.

### Landsat

**Descripción:** Landsat es la serie más popular y de mayor duración de satélites civiles de observación terrestre. El primer Landsat fue lanzado en 1972 y el más reciente satélite de la serie, Landsat-8, en 2013. El conjunto de datos de Landsat son sin duda los más ampliamente utilizados para mapear y monitorear humedales. Todas las misiones llevaron consigo sensores multiespectro que funcionan desde la fracción visible hasta el NIR del espectro electromagnético. El Landsat 8 se potenció con una nueva banda (azul verdadero) para facilitar las mediciones en aguas costeras. Se trata



Figura 6.2 Ejemplo de imagen de datos de LANDSAT-8 (© NASA)

de un sensor pasivo que proporciona imágenes tanto ópticas (tamaño de pixel de 30 m) como térmicas (tamaño de pixel de 60 m). Las bandas ópticas de este satélite registran las regiones del azul, verde, rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo medio de la luz solar reflejada. Se utilizan distintas combinaciones de estas bandas para detectar el estado de la vegetación, la variabilidad estacional, el índice de área foliar, los cambios en la cobertura de la tierra, la deforestación y la aforestación. Encontrará información detallada sobre Landsat en el siguiente sitio web: <http://landsat.usgs.gov/>.

**Dónde hallar los datos:** Los datos de Landsat se pueden ver y descargar a través de varios sitios web, pero el más confiable es el portal del Servicio Geológico de los EE. UU. (U.S. Geological Survey, USGS). El sitio Landsat Look Viewer (<http://landsatlook.usgs.gov/>) sirve para visualizar la disponibilidad de datos y descargar una imagen jpeg con seudocolor. El sitio web GloVis (<http://glovis.usgs.gov/>) sirve para navegar y descargar imágenes individuales. Si desea buscar y descargar varias imágenes de un área

cubriendo todas las imágenes disponibles, el sitio web EarthExplorer (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) es el indicado. Todos estos sitios web son intuitivos, autoexplicativos y hacen que sea sencillo navegar y descargar datos. El sitio web EarthExplorer permite al usuario filtrar datos con base en distintos criterios, tales como rango de fechas, porcentaje de nubosidad en una imagen, distintos satélites Landsat, etc.

**Posibles aplicaciones:** Para analizar el carbono azul, las imágenes de Landsat se pueden utilizar para generar productos del índice de vegetación (Vegetation Index, VI), que indican la abundancia y la presencia o ausencia de vegetación. En Bannari *et al.*, (1995) encontrará una revisión detallada de los distintos VI y sus aplicaciones. El índice de vegetación de diferencia normalizada (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) y el índice de vegetación mejorado (Enhanced Vegetation Index, EVI) son los VI más sólidos y más ampliamente utilizados. No obstante, cada uno tiene sus propias limitaciones. Los valores del NDVI se saturan fácilmente con densidades de vegetación entre moderadas y altas, lo que lleva a subestimaciones en ecosistemas muy densos. El EVI no se satura, pero la reflectancia de la banda azul puede aportar mucha interferencia debido a la dispersión atmosférica de la luz azul. Estudios recientes han demostrado que para ecosistemas costeros, un EVI modificado, denominado EVI2, se adapta mejor para brindar estimaciones precisas de la intensidad de la vegetación. A diferencia del NDVI, el EVI2 no se satura ni tampoco agrega interferencia debido a que carece de banda azul.

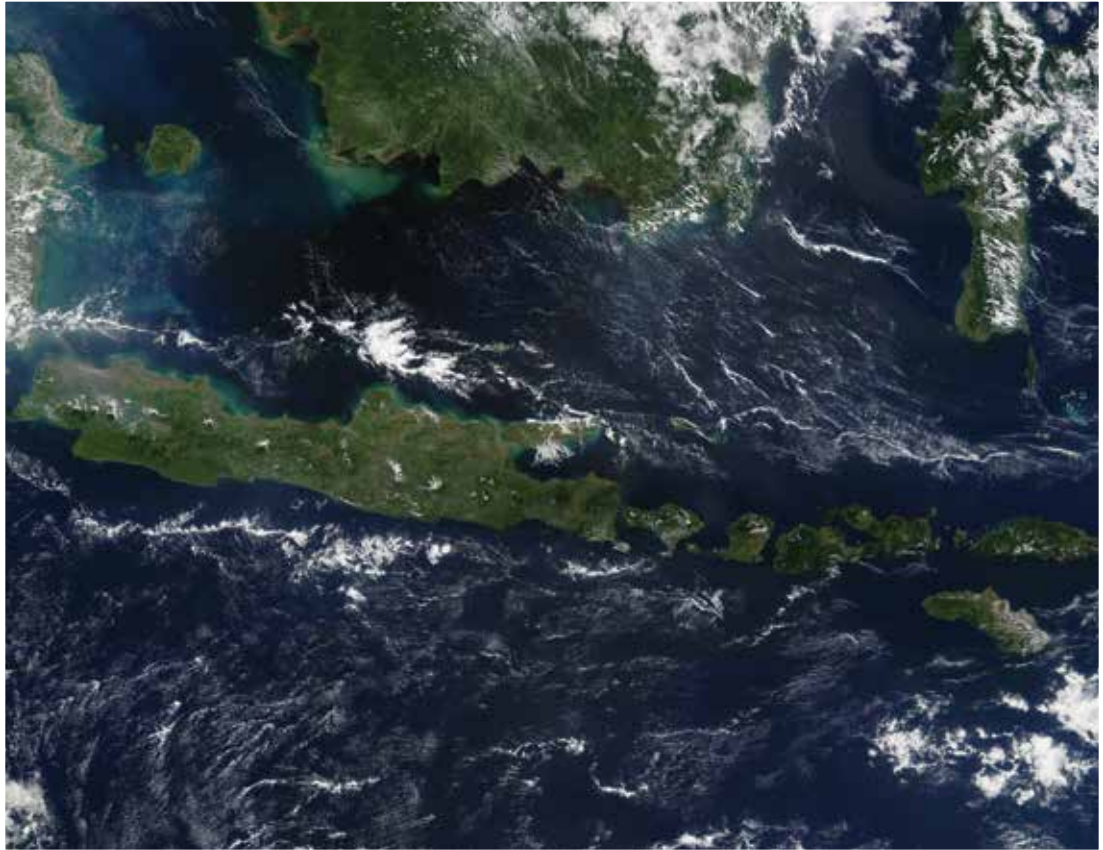
Los datos del VI calculados a partir de imágenes de Landsat pueden estimar la intensidad de la cubierta vegetal en manglares costeros, marismas y en algunos ecosistemas de pastos marinos. A mayores valores del VI, más densa es la vegetación y mayor es el índice de área foliar. Hacer correlaciones entre los valores del VI y la densidad de vegetación observada en el campo produce mapas espacialmente explícitos de la biomasa con un tamaño de pixel de 30 metros para toda el área de estudio.

## MODIS

**Descripción:** El espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) de la NASA es un sensor colocado en los satélites Terra y Aqua de la NASA. Terra fue lanzado en 1999 y orbita la Tierra de norte a sur atravesando el ecuador durante la mañana. Aqua fue lanzado en 2002 y orbita de sur a norte sobre el ecuador durante la tarde. El MODIS del satélite Terra y el MODIS del satélite Aqua ven la superficie total de la Tierra cada 1 a 2 días y adquieren datos en 36 bandas espectrales a una resolución espacial de 250 m, 500 m y 1 km. Encontrará descripciones detalladas sobre los sensores MODIS en el sitio web de la NASA: <http://modis.gsfc.nasa.gov/>.

**Dónde hallar los datos:** Los datos de MODIS con distintos niveles de procesamiento y producto pueden descargarse de los sitios web de los sensores MODIS de la NASA (como el del Centro de Archivos Activos Distribuidos de Procesos Terrestres [Land Processes Distributed Active Archive Center, LPDAAC]: [https://lpdaac.usgs.gov/products/modis\\_products\\_table](https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table)). No obstante, cada porción de datos de MODIS cubre un área vasta, que podría representar un área demasiado grande en comparación con lo necesario para los proyectos de carbono azul. Un sitio más adecuado para descargar datos de MODIS como subconjuntos de áreas es el Centro de Archivos Activos Distribuidos (Distributed Active Archive Center, DAAC) de la NASA en el Laboratorio Nacional Oak Ridge (Oak Ridge National Laboratory, ORNL) (<http://daac.ornl.gov/MODIS/>). Este sitio es intuitivo y brinda instrucciones paso a paso para descargar los datos. Otra ventaja de usar este sitio web es que los datos se pueden descargar como archivos geo-tiff en el formato de latitud-longitud y se pueden abrir fácilmente con cualquier software para procesar imágenes o de sistema de información geográfica (Geographic Information System, SIG).

**Posibles aplicaciones:** De forma similar a los datos de Landsat, las imágenes del VI a partir de los datos de MODIS se pueden utilizar para identificar la densidad de la vegetación en ecosistemas costeros y, en correlación con la biomasa de parcelas en el campo, estos datos se pueden utilizar para mapear



**Figura 6.3** Ejemplo de imagen de datos del sensor MODIS (© NASA)

grandes áreas de biomasa. Otro uso importante de los datos de MODIS es la detección de cambios en áreas costeras. Los sensores MODIS han recolectado datos en el ámbito global de las superficies terrestres y oceánicas desde 2000 y han puesto datos en series temporales diarias a disposición para estudiar los cambios en la cubierta vegetal de áreas costeras. Dado que la mayor resolución espacial de MODIS es 250 m, las imágenes del EVI2 obtenidas a partir de estos conjuntos de datos son herramientas apropiadas para estudiar los cambios temporales en marismas y manglares costeros. Encontrará un método detallado para el uso de datos de MODIS para cuantificar la destrucción de un área grande en manglares en Rahman *et al.* (2013).

## SRTM

**Descripción:** La Misión Topográfica de Radar del Transbordador (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) estuvo a bordo del transbordador espacial Endeavour entre el 11 y el 22 de febrero de 2000. Se utilizó interferometría radar en una única pasada para obtener estos conjuntos de datos, para adquirir dos señales simultáneas utilizando dos antenas de radar distintas. La antena que se colocó a bordo del transbordador espacial recolectó un conjunto de datos, mientras que otro conjunto de datos fue recopilado por una antena colocada en el extremo de un mástil de 60 metros extendido desde el transbordador. Las diferencias entre ambas señales permitieron calcular la elevación de la superficie. Los datos procesados están disponibles en una resolución de elevación de 1 arco segundo (aproximadamente 30 metros) solo para los Estados Unidos, y una resolución de elevación de 3 arco segundos (aproximadamente 90 metros) para la cobertura global.

**Dónde hallar los datos:** El sitio web EarthExplorer del USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) ofrece datos de SRTM para los EE. UU. La cobertura global de datos de SRTM se puede descargar del sitio web del Consorcio de Información Espacial (Consortium for Spatial Information, CSI) que depende

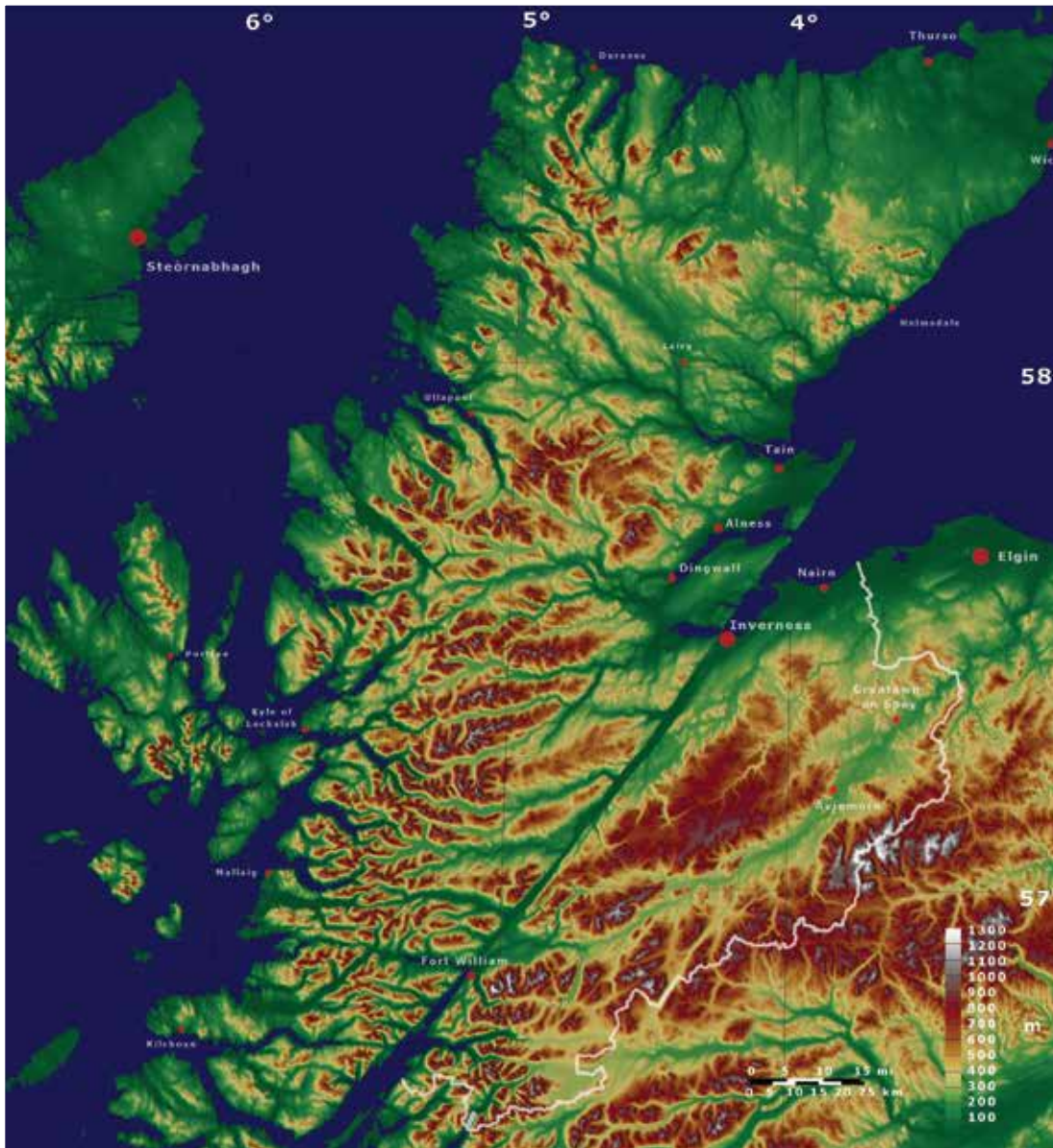


Figura 6.4 Ejemplo de imagen con colores falsos de datos de elevación de SRTM (© PawełS Wikimedia Commons)

del Grupo Consultivo sobre Investigación Agrícola Internacional (Consultative Group on International Agricultural Research, CGIAR) (<http://srtm.csi.cgiar.org/>). La NASA lanzó la versión 3 de los datos de SRTM, que presentan costas y cuerpos de agua bien definidos. El directorio de la versión 2 también contiene la máscara de la costa en formato vector obtenida por la Agencia Nacional de Inteligencia Geospacial en formato ESRI Shapefile. Este conjunto de datos se denomina Datos de Cuerpos de Agua de SRTM (SRTM Water Body Data, SWBD). Estos datos se pueden obtener a través del sitio web <http://dds.cr.usgs.gov/srtm/>. Todas las versiones se distribuyen con la documentación de metadatos apropiada.

**Posibles aplicaciones:** La aplicación de los datos de la SRTM para estimar el carbono azul es principalmente para mapear ambientes de cuencas y manglares. Dado que los manglares crecen a nivel del mar, los datos de la SRTM pueden posiblemente dar las alturas de la vegetación de rodales de manglar. Si bien los datos son del año 2000, los manglares crecen muy lentamente y estos datos aún pueden utilizarse para evaluar la altura de la vegetación en rodales de manglar que no han sido perturbados. Con ecuaciones alométricas que correlacionan la biomasa aérea con las mediciones de la

altura del dosel y el diámetro a la altura del pecho (dap), los datos de la SRTM pueden brindar la biomasa de rodales de manglar. Los datos de áreas que han sido perturbadas o deforestadas desde el año 2000 se pueden usar para estimar la pérdida de biomasa aérea (Simard *et al.* 2006; Simard *et al.* 2008).

## PALSAR

**Descripción:** El radar de apertura sintética con arreglo de fases en banda L (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar, PALSAR) de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) produjo datos entre 2006 y 2011, y luego se lanzó un nuevo sensor en 2014. El PALSAR es un sensor activo de microondas que sirve para la observación terrestre sin nubes tanto diurna como nocturna. Es un instrumento totalmente polarimétrico, es decir, mide la polarización de ondas electromagnéticas transversales. El PALSAR puede emitir y recibir ondas transversales horizontales (H) o verticales (V) en varias combinaciones, modo de haz fino con polarización única de HH (transmisión horizontal, recepción horizontal) o VV (transmisión vertical, recepción vertical), polarización doble (HH+HV o VV+VH) o polarimetría total (HH+HV+VH+VV). Los patrones de dispersión medidos a partir de distintas polarizaciones brindan información sobre la estructura de la vegetación. También incluye el modo ScanSAR de barrido ancho, con polarización única (HH o VV). La resolución espacial para el modo de haz fino con polarización HH o VV es de aproximadamente 12 m y la del modo ScanSAR es de 100 m.

**Dónde hallar los datos:** Los datos del PALSAR se pueden descargar del sitio web de la Estación Terrena de Alaska (Alaska Satellite Facility, ASF): <https://ursa.asfdaac.alaska.edu/cgi-bin/login/guest/>. Los datos pueden importarse con el software MapReady de la ASF para obtener imágenes en formato geo-tiff. Las interferencias de fondo que podrían disminuir la calidad de la imagen se pueden eliminar con un filtro Lee, y las imágenes se pueden colocar en mosaicos para cada polarización (HH con HH, HV con HV).

**Posibles aplicaciones:** Los datos del PALSAR recolectados con haz fino se pueden utilizar para hacer mapas

digitales de elevación (Digital Elevation Maps, DEM), extraer datos topográficos o estimar la biomasa de ecosistemas costeros. Para poder extraer la información sobre la vegetación costera, recomendamos realizar un análisis de componentes principales (Principal Component Analysis, PCA). El primer paso es crear un índice de degradación forestal por radar (Radar Forest Degradation Index, RFDI) a partir de las imágenes HH y VV. El RFDI puede evaluar la intensidad de la dispersión de doble rebote, que es la dispersión de las ondas de radar a partir de una superficie horizontal (suelo) y vertical (pasto, troncos de árboles, etc.). Esta dispersión de doble rebote tiene el potencial de diferenciar entre distintos tipos de vegetación. Luego las capas del RFDI, la HV y la HH se combinan para crear una imagen de tres bandas. Hay estudios que han demostrado que PCA-1 puede distinguir claramente entre agua y vegetación, lo que permite mapear la deforestación costera (principalmente en manglares). PCA-2 puede posiblemente utilizarse para estimar la altura de la vegetación con una resolución de ~12 m. Esto se puede combinar con datos de campo para estimar la biomasa de ecosistemas costeros.

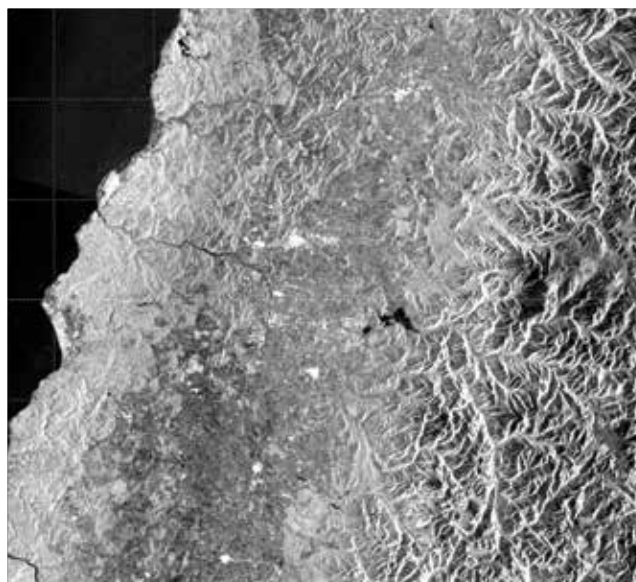


Figura 6.5 Ejemplo de imagen de datos PALSAR (© JAXA)



Un documento de JAXA que explica los datos del ALOS PALSAR está disponible en [www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/fdata/ALOS\\_HB\\_RevC\\_EN.pdf](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/fdata/ALOS_HB_RevC_EN.pdf). La sección 7 de ese documento presenta una descripción detallada de los datos del PALSAR e incluye los pasos necesarios para procesar datos a distintos niveles según las necesidades del usuario. JAXA también lanzó mosaicos globales del ALOS PALSAR que se pueden consultar en [www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/palsar\\_fnf/fnf\\_index.htm](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/palsar_fnf/fnf_index.htm) y se pueden utilizar para monitorear los cambios en el uso de la tierra, así como también la biomasa.

## GLAS del ICESat

**Descripción:** La misión científica del satélite para la medición del hielo, las nubes y la elevación (Ice, Cloud and land Elevation Satellite, ICESat), lanzado el 12 de enero de 2003, finalizó debido a la falla de su instrumento principal después de siete años en órbita y 18 campañas de operaciones con láser. El objetivo principal del instrumento del sistema de altímetro láser para las geociencias (Geoscience Laser Altimeter System, GLAS) era medir las elevaciones de las capas de hielo y los cambios en la elevación a través del tiempo. Sus objetivos secundarios eran medir los perfiles de altura de nubes y aerosoles, la elevación de la tierra, la cubierta vegetal y el grosor de hielos marinos. Los conjuntos de datos del líder GLAS del ICESat incluyen puntos de datos globales recolectados durante un período de siete años (2003 a 2009).

**Dónde hallar los datos:** El Centro Nacional de Datos de Hielo y Nieve (National Snow and Ice Data Center, NSIDC) distribuye 15 productos de datos de nivel 1 y nivel 2 del GLAS que estuvo a bordo del ICESat. Para obtener más información, consulte el sitio web del NSIDC: <http://nsidc.org/data/icesat/data.html>.

**Posibles aplicaciones:** Los datos del GLAS permiten estimar la altura del dosel con una exactitud de unos pocos metros (Simard *et al.*, 2011; Simard *et al.*, 2008; Fatoyinbo & Simard 2012). El lanzamiento del nuevo ICESat-2 se prevé para 2016. En condiciones favorables, los datos producidos podrían brindar una cobertura espacial más densa.

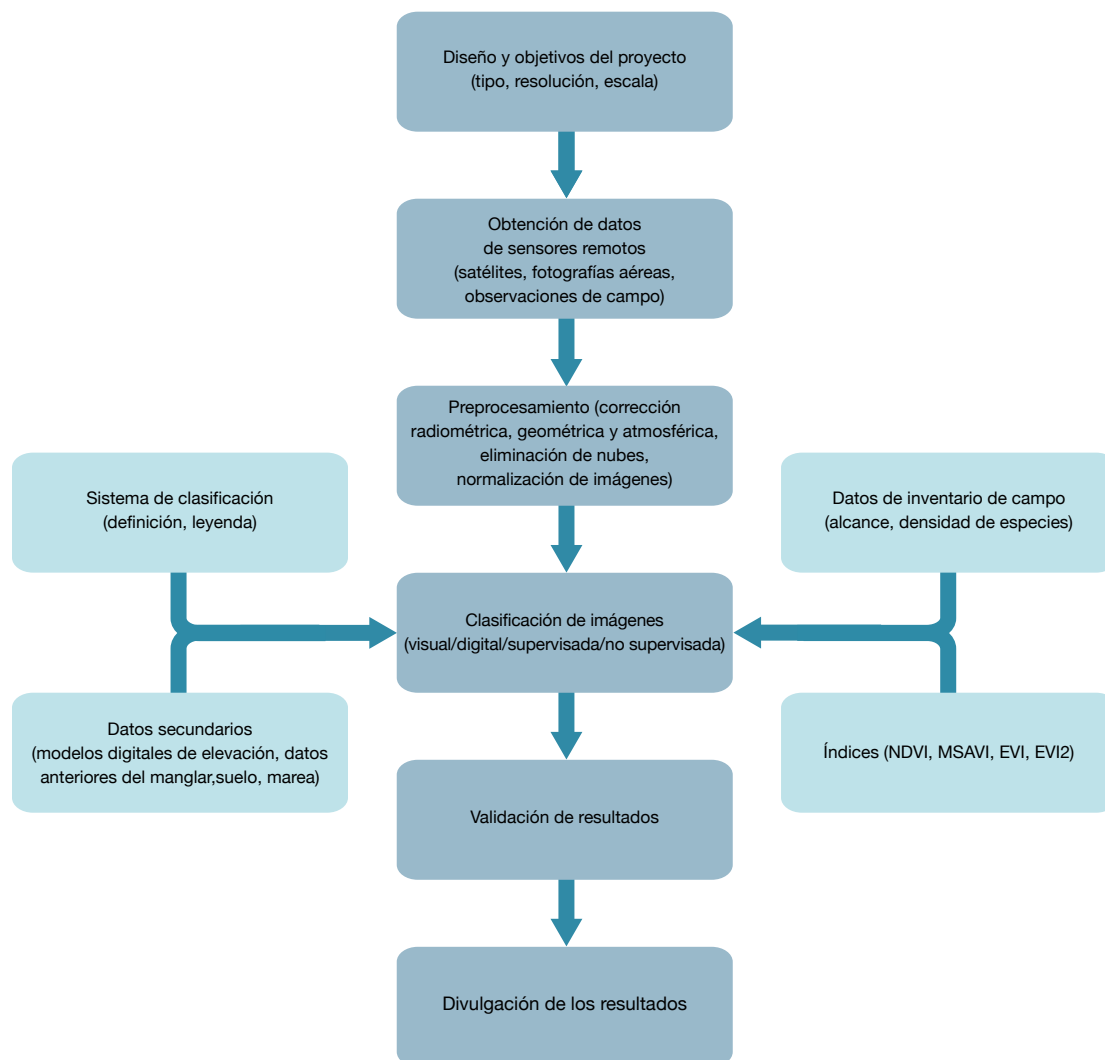
Es importante observar que existen muchos otros conjuntos de datos que no se destacan aquí. Los datos de satélites europeos, tales como SPOT, también han sido utilizados para estudios de ecosistemas costeros, pero estos datos son de acceso limitado. Los datos en formato de imágenes disponibles de satélites comerciales, tales como IKONOS, GeoEye y QuickBird también se han utilizado para estudiar ecosistemas costeros, pero el alcance de estos datos es limitado espacial y temporalmente, y no son de acceso libre y gratuito. Los datos de sonar son útiles principalmente para mapear pastos marinos sin importar la claridad del agua, pero muy rara vez están disponibles. Las aplicaciones, las limitaciones y los usos posibles de los datos de sonar para estimar el carbono azul se encuentran aún en la fase de investigación activa y todavía no son operacionales a escala global.

Desarrollar objetivos claros y trabajar con un experto en sensores remotos de confianza para determinar qué sensor y qué método de análisis de datos son los más adecuados y convenientes para su proyecto garantizará que el producto final cumpla con los objetivos del proyecto (Capítulo 2: Conceptualización del proyecto y desarrollo de un plan de medición en el campo).

## OBTENCIÓN Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Una vez que haya determinado el tipo, la resolución y la escala necesarios para su proyecto, deberá procesar las imágenes obtenidas (**Fig. 6.6**). Esta tarea deberá realizarla un especialista en sensores remotos, pero el alcance del procesamiento aplicado a una imagen debe constar en los metadatos de la imagen (Capítulo 7: Manejo de datos).

Los conjuntos de datos de los sensores remotos son amplios, abarcan décadas y la mayoría de ellos requiere de conocimientos y software profesional para su descarga y análisis. Por lo tanto, implementar un proyecto puede llevar entre 10 y 32 semanas (razonablemente). Este marco temporal depende en gran medida de la experiencia de la organización, de si hubo que solicitar otras imágenes además de los archivos de acceso libre y gratuito, o de la cantidad de pasos brindados por otras personas (por ejemplo, proveedores de datos, software). El atractivo de los datos sin procesar, que pueden obtenerse más rápidamente, es la capacidad de aplicar las propias fórmulas de calibración o navegación en lugar de utilizar los algoritmos estándar de un proveedor de datos. La desventaja de este enfoque es que el usuario debe tener el hardware, el software y los recursos de personal para llevar a cabo estos pasos antes de poder utilizar los datos.



**Figura 6.6** Pasos para el procesamiento de imágenes obtenidas con sensores remotos

El preprocesamiento de los datos de sensores remotos implica la corrección de la distorsión, la degradación y la interferencia introducidas durante el procesamiento de las imágenes, y su resultado es una imagen corregida libre de estas anomalías. Por lo general, las imágenes deberán procesarse para corregir cuestiones radiométricas (neblina y dispersión atmosférica) y geométricas (rotación de la Tierra y posición de los satélites). La nubosidad persistente es un problema de importancia en la mayoría de las regiones tropicales donde se encuentran los ecosistemas de carbono azul. Cuando no

haya datos de radar disponibles o estos sean demasiado costosos, se puede recurrir a fotos sin nubes tomadas a través del tiempo. El marco temporal depende de la tasa de cambio de ese ambiente. Por ejemplo, si el ecosistema que se mapea es relativamente estable, se podrían combinar imágenes que abarquen varios años sin perder ninguna información. No obstante, si el ecosistema se destruye a una tasa del 10 % cada 5 años, tal vez le convenga acotar la investigación a imágenes obtenidas en el último año para crear un mapa actual que sea lo más preciso posible. La normalización de imágenes es necesaria para analizar datos multitemporales o datos que abarquen grandes áreas.

Una vez que las imágenes se hayan obtenido y preprocesado para generar una imagen utilizable, esta imagen deberá procesarse aún más para extraer datos relevantes al proyecto. El procesamiento implica la clasificación de los componentes de la imagen (es decir, árboles, arbustos, agua, llanuras de lodo, etc.) y podrá incluir también datos sobre la composición, densidad y biomasa de las especies vegetales. Cualquier información adicional, como por ejemplo la cubierta vegetal conocida, su densidad y composición de especies, los antecedentes de manejo y las perturbaciones previas, será de utilidad durante la clasificación de las imágenes. Los datos secundarios, como la información de mareas, mapas de elevación, mapas e informes del ecosistema tanto publicados como no publicados, también son de mucha ayuda. El sistema de clasificación de la cobertura terrestre (Land Cover Classification System, LCCS) de las Naciones Unidas es el estándar recomendado para definir las clases de mapeo (Di Gregorio & Jansen 2000; Di Gregorio 2005). Deberá validarse con datos de sensores remotos de resolución más alta o con datos verificados en el terreno.

## POSIBLES USOS DE LOS DATOS DE SENSORES REMOTOS

### Mapeo

El mapeo y la clasificación de hábitats por medio de sensores remotos se realizan mediante la correlación de un conjunto de valores numéricos de píxeles con rasgos verificados, tales como la cobertura vegetal, aguas abiertas, llanuras de marea, marismas tierra adentro, humedales forestados o tipo de suelo desnudo. Las técnicas de uso de sensores remotos, combinadas con la validación en el terreno y el modelado, han llevado al desarrollo de huellas espectrales que se pueden utilizar para mapear la extensión y el tipo de ecosistema, y en algunos casos brindar información sobre las especies (ver Apéndice E para consultar un protocolo general para el mapeo de manglares y marismas). No obstante, desafíos tales como distinguir la vegetación de humedales costeros de la vegetación vecina tierra adentro, contabilizar áreas donde la vegetación es dispersa y la detección de rutina de especies en particular siguen siendo difíciles de superar (Heumann 2011).

Existen muchas técnicas para crear mapas de ecosistemas costeros. Por ejemplo, los manglares y las marismas se encuentran dentro del rango de la zona intermareal (hasta dos metros por encima del nivel del mar). Por lo tanto, es posible utilizar la elevación del terreno y los datos de rangos intermareales para determinar la ubicación posible de estos sistemas. No obstante, son escasos los datos exactos de modelos digitales de elevación a grandes escalas, por lo que es posible que se requiera de conocimientos locales adicionales del área de interés para diseñar los límites adecuados. Otra técnica que se puede utilizar es mapear la extensión de las mareas con una serie temporal de imágenes que coincidan con la pleamar y la bajamar (Murray *et al.* 2012). Los datos de un radar de apertura sintética (Synthetic Aperture Radar, SAR) se utilizan cada vez más para el mapeo y el monitoreo tanto en el ámbito local como regional. Un SAR es particularmente útil, ya que puede penetrar el dosel en zonas boscosas e interactuar con componentes vegetales de mayor tamaño (ramas, troncos y raíces aéreas) (Lucas *et al.* 2007a;

Souza-Filho *et al.* 2011; Nascimento Jr *et al.* 2013). Los datos de un SAR también se han utilizado para identificar parámetros estructurales en manglares, tales como la densidad arbórea, el área basal, la altura, la biomasa, la distribución por edad y la estructura del bosque (Aschbacher *et al.* 1995; Mougin *et al.* 1999; Held *et al.* 2003). Más recientemente, PNUMA-CMCA actualizó el Atlas Mundial de Manglares en 2010 (Spalding *et al.* 2010) y Giri *et al.* (2011) generaron un mapa global de línea base de los manglares utilizando principalmente datos de Landsat (**Fig. 6.7**). PNUMA-CMCA también recopiló observaciones globales sobre la distribución y la extensión de las marismas (Mcowen *et al.* 2017).

Los pastos marinos son difíciles de mapear con sensores remotos. La turbidez y el color del agua, el reflejo de la luz solar y las epífitas que cubren las hojas del pasto pueden diluir la señal de reflectancia espectral de los pastos marinos y obstaculizar la capacidad de los instrumentos de “ver” a través del agua. Además crecen con un amplio rango de densidades y esto puede afectar la señal de retorno a los sensores. En condiciones de aguas transparentes, gracias a imágenes obtenidas por sensores remotos, se ha podido detectar una amplia diversidad de densidades de pastos marinos con coberturas que oscilan desde <25 % a 100 % (Roelfsema *et al.* 2009; Pu *et al.* 2012) y, al combinarlas con el conocimiento local, fotografías aéreas y observaciones en el campo, se pueden mapear con éxito los contornos de la extensión de los pastos marinos.



**Figure 6.7** Distribución global de manglares correspondiente al año 2000 preparada a partir de datos satelitales de Landsat con una resolución espacial de 30 m (Giri *et al.* 2011)

## Altura del dosel y biomasa

Los sensores remotos se pueden utilizar no solo para mapear la extensión del ecosistema, sino también para mapear la biomasa. Luego estos datos se pueden utilizar para estimar la cantidad de carbono en el sumidero formado por la vegetación aérea. La biomasa se mapea en función de la composición y la altura de las especies, ya hay disponibles varios conjuntos de datos para este propósito. Los datos del GLAS permiten estimar la altura del dosel con una exactitud de unos pocos metros (Simard *et al.* 2008; Simard *et al.* 2011; Fatoyinbo & Simard 2013). TanDEM-X, el nuevo sistema interferométrico espacial lanzado por el Centro Aeroespacial Alemán, se podría utilizar para medir la altura y la biomasa en marismas y la altura del dosel en manglares. En febrero de 2000, STS-109 completó con éxito su SRTM y recopiló datos topográficos de más del 80 % de la superficie de la Tierra, además de la retrodispersión de radar (polarización HH, VV) y coherencia interferométrica. Las mediciones de elevación obtenidas por la SRTM se pueden utilizar para estimar la altura del dosel con una exactitud de entre 2 y 4 metros, pero, lamentablemente, esto no alcanza para mapear la altura en marismas (Simard *et al.* 2012). El transbordador espacial Endeavour fue equipado con dos antenas de radar que empleaban los patrones de interferencia entre ambas señales de radar para calcular la altura del terreno.

Se han generado mapas de línea base de la altura y la biomasa de manglares para varias regiones, entre ellas África (Fatoyinbo *et al.* 2008; Fatoyinbo & Simard 2013), Florida (Simard *et al.* 2006) y Colombia (Simard *et al.* 2009). Se proyectó publicar un mapa global en 2015. Cuando se utilizan en combinación

con los datos de un SAR, los mapas de altura no solo mejoran la exactitud de las estimaciones de biomasa, sino que además pueden usarse para mapear especies de los manglares (Held *et al.* 2003; Lucas *et al.* 2007b). Por ejemplo, Held y Ticehurst (2003) y Lucas *et al.* (2007) observaron que, donde hay sistemas radiculares extensos (por ejemplo, en manglares donde predominan especies de *Rhizophora*), ocurre una posterior disminución de la retrodispersión proporcional al aumento de la biomasa. Estas disminuciones ocurren generalmente una vez que los manglares alcanzan un umbral de altura. Lucas *et al.* (2007) sugieren una altura de 10 m como un umbral adecuado. Aprovechando estas características observadas en los manglares, se han desarrollado nuevas técnicas de mapeo de manglares que pueden distinguir entre el tipo de mangle (con raíces aéreas o sin ellas) y la especie.

## Monitoreo de los cambios en el ecosistema

El monitoreo de los impactos causados por los esfuerzos de restauración y conservación en ecosistemas de carbono azul y de las tasas de degradación y deforestación a causa de cambios en el uso de la tierra es valioso para los programas de contabilidad de carbono a nivel nacional y para el monitoreo de estrategias de adaptación y mitigación del cambio climático. No obstante, a pesar de su importancia, no existen actualmente mapas sistemáticos del cambio de los ecosistemas costeros en el ámbito regional ni global.

Para hacer evaluaciones en el ámbito regional, se ha demostrado exitosamente y por lo general se recomienda el uso de datos ópticos de resolución espacial moderada (<30 metros) (por ejemplo, Landsat) (Spalding *et al.* 1997; Giri *et al.* 2011). No obstante, la detección de rutina de cambios ha demostrado ser difícil, en parte debido a que la nubosidad permanente en los trópicos impide la observación regular. En algunos casos, esto ha resuelto recurriendo a un SAR (por ejemplo, Souza-Filho & Paradella 2003; Nascimento Jr *et al.* 2013). Se puede utilizar un SAR para detectar cambios dentro y fuera de las líneas base actuales (donde haya disponibles mapas de línea base), y esos datos se pueden complementar aún más con los datos de la biomasa correspondiente. Aprovechar esta abundancia de datos de series temporales de los sensores de Landsat, incluso de los datos provistos por el recientemente lanzado Landsat-8, también puede incrementar el nivel de cambio detectado.

## Estimaciones de carbono

Combinar mapas de la extensión del ecosistema, especies y biomasa con los valores promedio de la existencia de carbono obtenidos a partir de datos de campo permite hacer estimaciones nacionales, regionales y globales de las existencias de carbono (DeFries *et al.* 2007). De forma similar, estos datos se pueden utilizar luego para monitorear cambios en las existencias de carbono y estimar las emisiones de carbono (emitido o removido) en función de la degradación, la conservación y la restauración de ecosistemas de carbono azul. Los datos históricos obtenidos de sensores remotos se pueden utilizar para armar una historia de las existencias y emisiones de carbono que sirva para escenarios de referencia (Gibbs *et al.* 2007). Esta técnica se ha aplicado para manglares, pero la investigación para poder expandir la técnica e incluir marismas y pastos marinos es una prioridad alta.

Se encuentra disponible una gran cantidad de libros y estudios dedicados a la generación de mapas de existencias de carbono y a la medición de emisiones de carbono con sensores remotos, los cuales pueden brindar más información general y métodos más detallados.

## VALIDACIÓN CON DATOS DE CAMPO

Para poder utilizar los datos de sensores remotos para inventarios y, en especial, para relacionar la cobertura de la tierra con el uso de la tierra, se considera una buena práctica complementar los datos de los sensores remotos con datos de referencia del terreno (a menudo denominados “ground truth”, es decir, datos verdaderos observados en el terreno). Los usos de la tierra que se modifican rápidamente o que se pueden clasificar mal con facilidad deberían verificarse en el terreno con mayor intensidad que otras áreas, preferentemente mediante muestreos terrestres independientes. También puede ser de utilidad contar con fotografías aéreas o imágenes satelitales de alta resolución.

Los parámetros que pueden medirse en forma remota en la actualidad son la presencia o la ausencia de un ecosistema, especies, área foliar y cobertura del dosel, altura del dosel y biomasa vegetal. Por lo tanto, se deberán medir parámetros similares en el terreno. Lo ideal es que cada parcela del campo englobe un área similar a la de un único pixel y que abarque todo el rango de las características macroestructurales del ecosistema. En la ecología de humedales, una parcela típica mide unos metros y puede no ser apropiada para aplicaciones con sensores remotos. Por otra parte, parcelas de 1 hectárea sí permitirían una caracterización exacta de la heterogeneidad del dosel y permitirían una calibración excelente para hacer mediciones con sensores remotos. Si eso no fuese posible, se pueden usar tamaños de parcelas de unas decenas de metros si fuesen representativas de la estructura local (a escala de hectáreas).

Existe la oportunidad de hacer partícipes a las comunidades locales en la recolección de datos de referencia en el terreno. Si bien se ha avanzado muchísimo hacia el desarrollo de capacidades y la transmisión de la importancia de los ecosistemas de carbono azul a los tomadores de decisiones en el ámbito local, nacional e internacional, estos esfuerzos aún están en su etapa inicial y es necesario trabajar constantemente para garantizar el éxito continuo y la implementación de estos y otros proyectos afines. Las oportunidades para trabajar en el campo fortalecen las relaciones dentro de la comunidad y generan una sensación de propiedad que promueve el apoyo continuo a los esfuerzos de conservación y restauración mucho después de que se haya finalizado el estudio.

## CONCLUSIÓN

Cuando los sistemas de sensores remotos se utilizan con inteligencia, incluir las combinaciones complementarias de distintos satélites y sensores aerotransportados, pueden brindar datos que fortalezcan la investigación y la gestión de ecosistemas costeros. Cada tipo de sensor tiene su propia métrica para registrar cambios sutiles y evidentes en los ambientes costeros. Por lo tanto, combinar datos de distintos sensores ha brindado y continuará brindando información pertinente sobre los componentes biofísicos y estructurales de los paisajes costeros. Una de las principales ventajas de los sensores remotos es que pueden monitorear y evaluar más rápidamente las tendencias a largo plazo y los cambios a corto plazo en la vegetación y la hidrología, y lo hacen de forma más completa y a menor costo por unidad de área que si se hicieran solo muestreos en campo o por barco (Klemas 2013).