

Sitio de Monitoreo Intensivo del Carbono en Quintana Roo

Gonzalo Sánchez Santos, José A. Arreola Palacios, David López Merlín, Vanessa Maldonado Montero,
Marcela Olguín Álvarez, Craig Wayson, Oswaldo Carrillo Negrete y Ramiro Puc Kauil

27/07/2015

CONTENIDO

	Pag.
Prefacio.....	6
Agradecimientos.....	6
Abreviaturas y acrónimos	6
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	7
CAPÍTULO II. SITIOS DE MONITOREO INTENSIVO DEL CARBONO EN “QUINTANA ROO”	9
Antecedentes	9
Características generales	10
Ubicación	10
Topografía	12
Clima	13
Vegetación.....	13
Diseño	13
Objetivos del SMIC	15
CAPITULO III. UNIDADES PERMANENTES DE MUESTREO	16
Diseño de unidades de muestreo y sus componentes	17
Establecimiento de las unidades de muestreo.....	20
CAPÍTULO IV. BIOMASA AÉREA.....	22
A. Diseño de muestreo en campo	23
Arbolado (diámetro > 2.5 cm).....	25
Biomasa menor (diámetro < 2.5 cm).....	29
Re-medición de la biomasa aérea	33
B. Estimación del contenido de carbono en la biomasa aérea.....	33
Enfoque de estimación del carbono forestal.....	33
Arbolado.....	35
Biomasa menor.....	40
Cambio en el contenido de carbono en la biomasa aérea	40
CAPÍTULO V. MADERA MUERTA.....	42
A. Diseño de muestreo en campo	42
Árboles muertos en pie	44

<i>Tocones</i>	46
Material leñoso caído.....	46
B. Estimación del carbono en la madera muerta	55
Árboles muertos en pie	55
Tocones	56
Material leñoso caído.....	56
Madera muerta.....	57
CAPÍTULO VI. COMPONENTES SUBTERRÁNEOS	59
A. Diseño de muestreo en campo	61
Mantillo.....	63
Materia orgánica del suelo.....	66
Biomasa subterránea: raíces.....	71
B. Estimación del carbono en los componentes subterráneos.....	72
Mantillo.....	72
Materia orgánica del suelo.....	73
Raíces	73
CAPÍTULO VII. FLUJOS DEL CARBONO FORESTAL	74
Producción de hojarasca.....	76
A. Diseño de muestreo	76
B. Estimación del contenido de carbono vía hojarasca	82
Descomposición de la fracción foliar.....	84
A. Diseño de muestreo en campo	84
B. Estimación de la tasa de descomposición de las hojas.....	87
Descomposición de material leñoso	88
A. Diseño de muestreo en campo	88
B) Estimación de la tasa de descomposición del material leñoso	97
CAPÍTULO VIII. DINÁMICA DEL CARBONO EN EL SMIC QUINTANA ROO	97
Retos	97
Sigüientes pasos	97
LITERATURA CITADA	98
ANEXOS	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Pag.

Figura 1. Localización del SMIC en el ejido Felipe Carrillo Puerto	10
Figura 2. Tipos de vegetación dominantes en la reserva “Much Kanan Ka’ax” y la distribución de los 32 conglomerados.....	15
Figura 3. Unidad de muestreo permanente del Inventario Nacional Forestal y de Suelos	18
Figura 4. Unidad de muestreo permanente del SMIC tipo INFyS	19
Figura 5. Conglomerado con parcelas anidadas	21
Figura 6. Diseño del conglomerado y parcelas de permanentes	24
Figura 7. Forma de la numeración de árboles, lianas y palmas	25
Figura 8. Forma de medición del diámetro normal en árboles en pie, inclinados y caídos	26
Figura 9. Forma de medición del diámetro normal en árboles bifurcados en pie, palmas y lianas	27
Figura 10. Mediciones de la longitud (m) y altura total (m) de especies arbóreas	27
Figura 11. Clasificación de árboles muertos	28
Figura 12. Diseño de muestreo con parcelas de 1m ² para la cosecha de biomasa	30
Figura 13. Delimitación de parcelas de 1m ² para la cosecha de biomasa del sotobosque	31
Figura 14. Forma de medición del diámetro para las lianas	32
Figura 15. Diseño de muestreo para árboles muertos en pie, tocones y MLC	43
Figura 16. Clasificación de árboles muertos en pie	45
Figura 17. Diagrama que muestrala altura algunos árboles muertos en pie	45
Figura 18. Conglomerados con el muestreo de MLC con transectos	47
Figura 19. Diseño de muestreo para MLC por transecto con el método de líneas de intersección planar	48
Figura 20. Calibrador de diámetro utilizado para medir el MLC mediano y fino	53
Figura 21. Medición del diámetro en piezas de MLC con forma (a) geométrica ovalada y (b) media luna	53
Figura 22. Ubicación de los puntos de muestreo para los componentes subterráneos: mantillo, suelo y raíces	62
Figura 23. Medición de la profundidad del mantillo en los 4 cuadrantes	64
Figura 24. Colecta y embolsado de las capas orgánicas de mantillo	65
Figura 25. Representación del proceso para la toma de muestra del suelo	67
Figura 26. Determinación del volumen del hueco con perlita	68
Figura 27. Muestras de suelo tomadas a diferente profundidad, en un punto de muestreo ...	69
Figura 28. Registro de la profundidad máxima en cada punto de muestreo	69
Figura 29. Separación de la submuestra de suelo en componentes, suelo mineral, raíces gruesas y finas	71

Figura 30. Ejemplo de diseño de una canasta para la colecta de hojarasca.....	77
Figura 31. Distribución y ubicación trampas de hojarasca con cuatro canastas.....	78
Figura 32. Distribución y ubicación trampas para la colecta de hojarasca con 12 canastas	79
Figura 33. Etiquetado de las bolsas de hojarasca por trampa de hojarasca	81
Figura 34. Representación de los distintos pasos del procesamiento de la hojarasca en laboratorio	82
Figura 35. Distribución de los conglomerados en los cuales se colocaron los ensayos de descomposición foliar.....	85
Figura 36 Proceso de pesaje, llenado, etiquetado de bolsas y el proceso de descomposición foliar en campo	86
Figura 37. Ubicación de los ensayos de descomposición foliar.....	86
Figura 38. Distribución de los 16 conglomerados con ensayos de descomposición para ramas finas, medianas y gruesas.....	89
Figura 39. Colecta, agrupación y numeración de ramas vivas por categoría diamétrica	91
Figura 40. Ramas vivas y rodajas por categoría diamétrica de las tres especies con mayor importancia estructural (IVIR)	92
Figura 41. Ubicación de cuadros para la distribución de ramas vivas finas, medianos y gruesos	93
Figura 42. Proceso de trituración, molienda y de ramas derivadas de los ensayos de descomposición.....	96

CONTENIDO DE TABLAS

Pag.

Cuadro 1. Tipos de vegetación dominantes, superficie y porcentaje de cobertura en el ejido de Felipe Carrillo Puerto.....	13
Cuadro 2. Coordenadas geográficas y número de conglomerados por tipo de uso de la vegetación en el SMIC	14
Cuadro 3. Ecuaciones alométricas utilizadas para la estimación de la biomasa aérea por forma de vida	23
Cuadro 4. Tiempo (en horas y días) requerido para obtener el peso constante de las distintas formas de vida cosechadas en las parcelas de 1m ²	33
Cuadro 5. Clasificación del MLC en el SMIC-Quintana Roo y en el INFyS	49
Cuadro 6. Clases de descomposición del MLC, de acuerdo a los criterios del INFyS	50
Cuadro 7. Ecuaciones alométricas para estimar volumen de fuste limpio	55
Cuadro 8. Clasificación propuesta por el IPCC (2006) para estimar el carbono en componentes subterráneos.....	59
Cuadro 9. Número de trampas de hojarasca por conglomerado y por condición de manejo	80
Cuadro 10. Especies arbóreas con mayor IVIR estructural en los 16 conglomerados	89
Cuadro 11. Número de ramas por conglomerado, especie y clase diamétrica	94
Cuadro 12. Fecha de colecta por tipo de rama.....	94

Prefacio

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo y colaboración del ejido Felipe Carrillo Puerto por permitir el establecimiento del Sitio de monitoreo intensivo del carbono (SMIC) en el mismo ejido. Igualmente, destacamos el enorme esfuerzo y colaboración de la Organización No Gubernamental U'yool'che para los procesos de establecimiento del SMIC-Quintana Roo.

Abreviaturas y acrónimos

SMIC	Sitio de monitoreo intensivo del carbono
MRV	Monitoreo, Reporte y Verificación
GEI	Gases de efecto invernadero
REDD+	Reducción de emisiones por deforestación y degradación de bosques
M-REDD+	Reducción de emisiones por deforestación y degradación de bosques
Red Mex-SMIC	Organización no gubernamental
ONG	Proyecto México Noruega
PMN	Proyecto México Noruega
CONABIO	Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad
CBM-CFS3	
Tier 3	
FCP	Felipe Carrillo Puerto
SMIC-FCP	Sitio de monitoreo intensivo de carbono Felipe Carrillo Puerto
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
PMF-FCP	Programa de manejo forestal del ejido Felipe Carrillo Puerto
FONAFE	Productora nacional de durmientes
CONANP	Comisión nacional de áreas naturales protegidas
SIG	Sistema de información geográfica
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
UPM	Unidad de muestreo permanente
INFyS	Inventario nacional forestal y de suelos
CONAFOR	Comisión nacional forestal
IPCC	siglas en inglés para Panel intergubernamental sobre cambio climático
MLC	Material leñoso caído
GPS	siglas en inglés para Sistema de posicionamiento espacial
ER	Estimador de razón
ASTM	siglas en inglés para la Sociedad americana para pruebas y materiales
PPN	Productividad primaria neta
IVIR	Índice de valor de importancia relativo estructural

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

México, como parte de sus compromisos internacionales, trabaja en el diseño e implementación del sistema nacional de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV) de emisiones y adsorciones de gases de efecto invernadero (GEI); dicho sistema lo coordina la Comisión Nacional Forestal a través del Proyecto “Fortalecimiento REDD+ y Cooperación Sur-Sur”.

Como componente apoyo al sistema nacional MRV y como elemento para la integración de información multi-escala, en el año 2012, se conformó una red mexicana de sitios de monitoreo intensivo del carbono (Red Mex-SMIC). Dicha red está integrada por el gobierno federal, gobiernos internacionales, academia, ONGs y ejidos, con el fin de generar información de parcelas de campo sobre almacenes y flujos de carbono en sistemas forestales, integrándolos con información derivada de inventarios forestales, sensores remotos, intercambio de gases entre la atmósfera y la vegetación, e información sobre perturbaciones (estadísticas).

Los sitios de monitoreo intensivo del carbono (SMIC) se establecieron en paisajes considerados estratégicos, y se seleccionaron con base a los siguientes criterios (Olguín *et al.* 2012):

1. Representan paisajes con una contribución importante al balance neto de emisiones de gases de efecto invernadero del sector forestal en el país.
2. Permiten un soporte multi-institucional, que facilita la generación/disponibilidad de datos.
3. Contribuyen con otras iniciativas nacionales e internacionales (áreas de acciones tempranas de CONAFOR, Servicio Forestal de Estados Unidos, M-REDD+).

Hasta el momento la Red Mex-SMIC consiste en 5 SMIC, los cuales se ubican en los estados de Campeche, Chiapas, Hidalgo, Yucatán y Quintana Roo, y representan distintos tipos de bosques.

En particular, el SMIC del estado de Quintana Roo se encuentra ubicado en el ejido Felipe Carillo Puerto, en un área de 9 km² que abarca dos tipos de condiciones de la selva mediana subperennifolia: bajo manejo forestal y área voluntaria de conservación. En las dos

condiciones se ha realizado trabajo para el monitoreo de los almacenes y flujos del carbono. Cuya finalidad es de proveer información al sistema nacional MRV para reducir la incertidumbre asociada a las estimaciones de emisiones y adsorciones de GEI. Así mismo, generar insumos para la calibración y validación de las simulaciones de emisiones y adsorciones de GEI bajo un enfoque Tier 3 de modelación.

El trabajo en campo en el SMIC-Quintana Roo se ha desarrollado en estrecha colaboración con los ejidatarios de Felipe Carrillo Puerto. A los ejidatarios, se les brindo capacitación antes de iniciar el levantamiento de información en campo. El trabajo de campo incluyó distintas etapas: elaboración de diversos materiales, establecimiento de sitios de muestreo permanente, mediciones en campo, establecimiento de ensayos en campo, colectas y procesamiento de muestras en laboratorio.

CAPÍTULO II. SITIOS DE MONITOREO INTENSIVO DEL CARBONO EN “QUINTANA ROO”

Antecedentes

Por su ubicación geográfica, topografía, clima y los diferentes tipos de selvas de la vegetación subperennifolia, hacen del estado de Quintana Roo, una de las regiones tropicales de México con mayor importancia en especies de flora y fauna (Miranda y Hernández 1963, CONABIO 2006, Valdez-Hernández e Islebe 2011, Pozo 2011). También, es considerado como uno de los estados con mayor potencial en el aprovechamiento de especies maderables y no maderables (Argüelles 1991, Colmero *et al.* 1999, Rebollar *et al.* 2002).

Los bosques de esta región continuamente están sujetos a fenómenos naturales como los huracanes y perturbaciones antrópicas como el sistema agrícola de milpa con el método de roza, tumba y quema (Jauregui 1989, Rojas 1989, Hernández-Xolocotzi *et al.* 1994, Barrera *et al.* 1977, Moya y Kú 2001). Estas perturbaciones juegan un papel importante acelerando la dinámica de este tipo de vegetación a diferencia de los efectos que tiene en otro tipo de bosque del país (Sánchez-Sánchez e Isleb 1999, Cairns *et al.* 2003, Chazdon *et al.* 2007, Heartsill *et al.* 2010). Es por ello que el estado de Quintana Roo, fue considerado como una región importante para el estudio de la dinámica del carbono para lograr los objetivos de los SMIC en México, sobre todo aquellos sitios que frecuentemente están bajo la influencia de perturbaciones naturales y antrópicas como las actividades agrícolas y el aprovechamiento de especies maderables.

Los SMIC son áreas forestales de aproximadamente 9 km² utilizados para mediciones continuas en las que se colecta información a través de diferentes métodos, entre los que destacan: sitios intensivos, inventarios forestales y sensores remotos (Hollinger 2008). En los sitios intensivos se registra continuamente información y se analizan los diferentes componentes de la biomasa aérea y subterránea, para entender y conocer los procesos involucrados en la dinámica del carbono.

Los SMIC en México, iniciaron como parte del componente de modelación del proyecto “fortalecimiento REDD+ y Cooperación Sur-Sur”, para obtener información que se usará en la modelación de la dinámica del carbono forestal (CBM-CFS3), y datos que permitan comparar

los resultados de las simulaciones con el modelo. **(Este párrafo lo insertó David. Pero no se entiende que datos va a comparar y con qué).**

Características generales

Ubicación

El SMIC-Quintana Roo se localiza en el ejido de Felipe Carrillo Puerto (FCP) en el centro sur del municipio con el mismo nombre (Figura 1). El ejido se ubica entre las coordenadas 87° 52' 00" y 88° 06' 00" longitud oeste y 19° 42' 00" y 19° 25' 00" latitud norte (INEGI 2003). Limita con los siguientes ejidos; al norte con X-Maben y anexos y Tres Garantías, al sur con Santa Isabel, X-Conha, X-Hazil y Anexos, al este con la Reserva de la Biosfera de Sian-Ka'an y al oeste con terrenos particulares y el ejido de San Antonio Nuevo (PMF-FCP 2011). El SMIC ocupa el 1.9 % de la superficie total forestal (47 223 ha) del ejido.

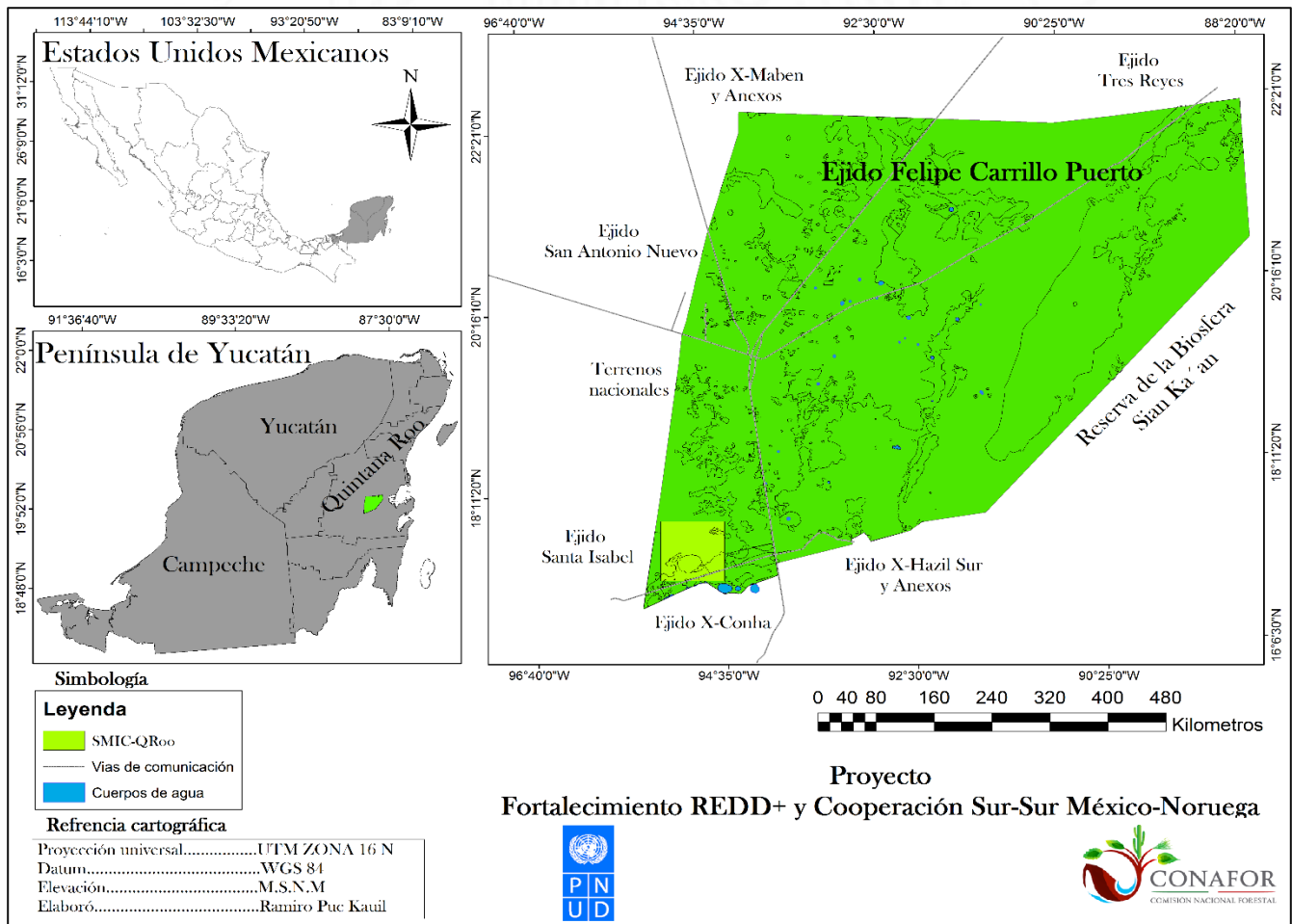


Figura 1. Localización del SMIC en el ejido Felipe Carrillo Puerto en el estado de Quintana Roo

La formación del ejido FCP inició como una comunidad en 1850 con el nombre de Chan Santa Cruz, pero a inicios del año de 1940 fue reconocida como ejido con el nombre de Felipe Carrillo Puerto (Argüelles 2005). Este ejido tiene una amplia historia en el uso y aprovechamiento de sus recursos maderables. Con base al estudio de Ordenamiento Territorial del ejido elaborado por la Asociación Civil U'yo'olche (2005), menciona que este dio rentado gran parte de su territorio forestal a muchos contratistas madereros entre 1950 y 1980. Durante este periodo, el aprovechamiento de la madera especies de alto valor comercial, principalmente la caoba (*Swietenia macrophylla* King) y el cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) se realizó sin aparente regulación forestal.

En 1970 el ejido participó en el proyecto de producción de durmientes de vías férreas implementado por la empresa descentralizada FONAFE, conocida como Productora Nacional de Durmientes (Enríquez *et al.* 1978). En 1985 fue partícipe del proyecto Plan Piloto Forestal promovida por el Gobierno del Estado y la entonces Subsecretaría Forestal. Así mismo, implementaron el uso de aserraderos y carpinterías para transformar la madera en diferentes productos para su venta.

En la última década se ha promovido el establecimiento de plantaciones forestales con especies de valor comercial, de rápido crecimiento y otras actividades relacionadas al uso y aprovechamiento de especies maderables y no maderables. Una de las iniciativas del ejido y que mayor destaca es el fomento de conservación de sus recursos naturales. Ya que se caracteriza por poseer masas forestales que albergan una gran cantidad de especies de flora y fauna nativa. Por la cual, la CONABIO lo considera como una de las Regiones Terrestres Prioritarias de México, destacando su importancia como una unidad ambiental estable con alta riqueza ecosistémica y con una oportunidad para su conservación (Arriaga *et al.* 2008). También forma parte del Corredor Biológico Mesoamericano (CBM) que une las reservas de la biosfera de Sian Ka'an y Calakmul del estado de Campeche.

En una visita al ejido realizada en mayo del 2012 por miembros de la Red Mex-SMIC, iniciaron la discusión sobre la factibilidad del establecimiento de un SMIC en el área de la reserva "Much Kanan Ka'ax" perteneciente al mismo ejido. Es un área destinada voluntariamente para la conservación natural, la cual fue certificada en el año 2007 por la

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas de México (CONANP). En el área se consideró que existe la oportunidad de abarcar dos formas de manejo: conservación y aprovechamiento forestal. Además de diferentes edades de abandono de tierras previamente utilizadas para la agricultura conocidas bajo el enfoque de cronosecuencias.

La reserva ejidal se encuentra al sur del ejido Felipe Carillo Puerto (Figura 1). Forma parte de un proyecto de carbono que es coordinado por la organización U'yool'che A.C. desde el año 2007. El uso de suelo de la reserva radicó en el aprovechamiento maderable y uso agrícola de milpa bajo el sistema roza, tumba y quema en determinadas áreas. El último aprovechamiento maderable de especies comerciales se realizó hace 25 años en diferentes áreas de la reserva ejidal.

Para el establecimiento del SMIC, se consideró importante la historia de uso de la tierra, manejo forestal y la edad de la vegetación como resultado de los diferentes usos e incendios forestales en la reserva "Much Kanan Ka'ax" del ejido FCP. Con base a esta información, se determinó que el SMIC puede estar localizado en el suroeste de los terrenos del ejido, y abarcar dos tipos de condiciones; área bajo conservación ejidal y área forestal.

Considerando la definición de Hollinger (2008) sobre los SMIC, se procedió a trazar un polígono de 3 X 3 km² (900 ha) abarcando las condiciones antes mencionados. El diseño del polígono, se realizó a partir de coordenadas geográficas de sitios de muestreo establecidos durante el proyecto de Servicios Ambientales por Captura de carbono en el 2007. Dentro del cual se ubicaron 32 conglomerados que sirvieron para la medición de los componentes de la biomasa, distribuidos sistemáticamente a través del uso de las herramientas de sistema de información geográfica (SIG).

Topografía

El terreno es de superficie plana con ligeras ondulaciones, conformada por rocas calizas permeables, altitud no mayor a 25 metros sobre el nivel del mar, son poco profundas (de 15 hasta 40 cm de profundidad) debido a la elevada pedregosidad, favoreciendo un rápido escurrimiento, presenta textura arcillosa y alto contenido de materia orgánica. Los tipos de suelo predominantes son el Cambisol lítico (Pus-Lum-Kaankab), Rendzina (Tzequel), Vertisol crómico (Kankab), Gleysol (Sabana) y Vertisol (Ak'alche) con Ph neutro a ligeramente alcalino de 7.0 a 8.0 (FAO-UNESCO 1990).

Clima

De acuerdo a la clasificación de Köppen modificado por García *et al.* (2004) corresponden a cálido subhúmedo de tipo Aw1(x')(i') con lluvias en verano, temperatura media anual de 25.8 °C y una precipitación media anual de 1,204 mm.

Vegetación

La vegetación que predomina es la selva mediana subcaducifolia, selva mediana subperennifolia y selva baja inundable (Miranda y Hernández 1963). La mayor superficie es ocupada por la selva mediana superennifolia con vegetación madura y secundaria (Cuadro 1).

Cuadro 1. Tipos de vegetación dominantes, superficie y porcentaje de cobertura en el ejido de Felipe Carrillo Puerto

Tipo de vegetación	Superficie (ha)	Cobertura (%)
Selva mediana con vegetación madura	25854.87	55
Selva mediana con vegetación secundaria	12267.87	26
Tular	4339.95	9
Selva baja espinosa	3356.38	7
No aplicable	1355.76	3
Agua	48.17	0

La vegetación tular corresponde a suelos inundados conocidas como sabanas y la selva baja espinosa son suelos inundables durante la temporada de lluvias (Miranda y Hernández, 1963).

Particularmente, la vegetación del sitio corresponde a la selva mediana subperennifolia conservada, selva mediana subperennifolia afectados por incendios forestales hace aproximadamente 18 a 25 años y acahuales con edades de 5 a 20 años producto del sistema agrícola de milpa. Como se mencionó anteriormente, el sitio presenta áreas de aprovechamiento que se realizaron hace aproximadamente 40 a 50 años.

Diseño

El SMIC-Quintana Roo consiste de un polígono regular de 3 X 3 km² con una superficie de 900 ha. Las coordenadas geográficas de los vértices del polígono se encuentran en el Cuadro 2. El sitio se encuentra en dirección suroeste dentro del área de conservación “Much Kanan Ka’ax” del ejido FCP.

Cuadro 2. Coordenadas geográficas y número de conglomerados por tipo de uso de la vegetación en el SMIC

Vértice	Longitud oeste	Latitud norte	Vegetación	Conglomerados
1	88°05'02.52960"	19°30'18.79200"	Acahuales	5
2	88°03'19.85760"	19°30'19.40040"	Selva mediana subperennifolia conservada	6
3	88°03'19.18440"	19°28'41.77560"	Selva mediana subperennifolia perturbada	21
4	88°05'02.11560"	19°28'41.21040"	Total	32

Dentro del área de 900 ha se encuentran ubicadas 32 conglomerados (Figura 2) con superficies de 1 ha, distribuidas sistemáticamente y estratificado de acuerdo a la superficie y tipo de vegetación con edades conocidas bajo el enfoque de cronosecuencias (Cuadro 2).

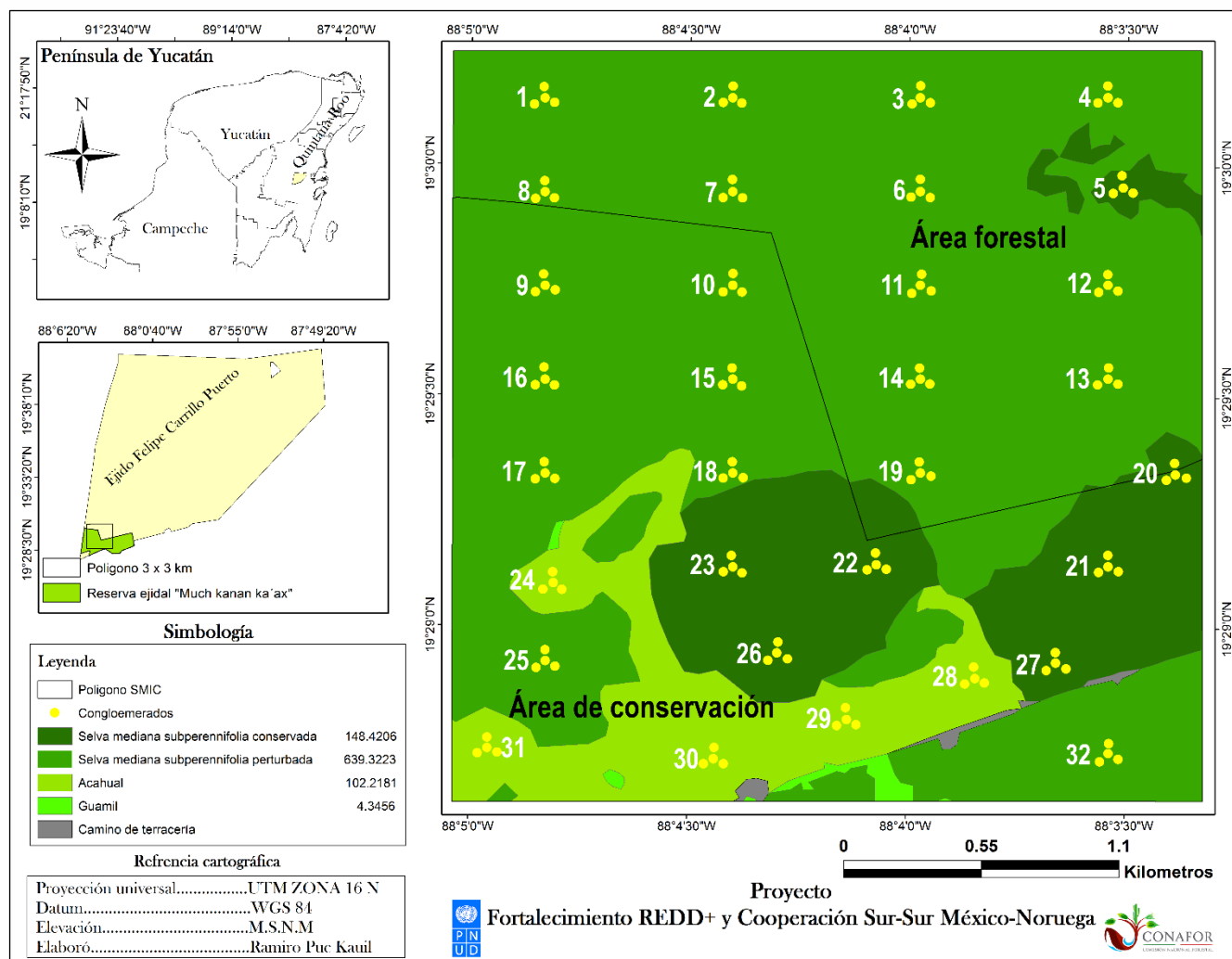


Figura 2. Tipos de vegetación dominantes en la reserva “Much Kanan Ka’ax” y la distribución de los 32 conglomerados

Objetivos del SMIC

1. Documentar el proceso de selección del sitio intensivo, diseño general y características relevantes.
2. Describir las metodologías empleadas sobre la colecta y análisis de datos para la estimación de reservorios y flujos del carbono en el sitio.
3. Promover insumos necesarios para la mejora del conocimiento científico, aplicado y de largo plazo sobre la dinámica del carbono a escala regional a nacional.
4. Identificar áreas prioritarias de investigación futura con relevancia para el sitio.

CAPITULO III. UNIDADES PERMANENTES DE MUESTREO

Las unidades permanentes de muestreo (UPM), son una herramienta utilizados para tres objetivos principales: 1) para el manejo forestal, 2) investigación de la dinámica de los bosques naturales e intervenidos y 3) por cuestiones de sensibilización pública (Corral-Rivas *et al.*, 2008; Gómez, 2010). Para ejemplificar el primer objetivo, las UPM nos permiten realizar mediciones continuas del crecimiento, incremento y producción del bosque teniendo implicaciones directas en el manejo forestal (Prodan *et al.* 1997, Groothousen y Alvarado, 2000, Gómez 2010).

Por lo general, la información es utilizada para construir tablas y funciones de rendimiento, ajuste de modelos de predicción, descripción de la cantidad o calidad de las especies, mejorar y actualizar cálculos y, debido a su carácter de permanente, permiten evaluar la dinámica de cambio del bosque en su estado natural o manejado para mejorar su estructura y/o calidad de sitio (Romahn *et al.* 1994, Prodan *et al.* 1997, Groothousen y Alvarado 2000, Vallejo *et al.* 2005; Gómez 2010).

En las últimas tres décadas, el uso de UPM abarcan objetivos más amplios, por ejemplo en bosques tropicales son utilizados como elementos importantes para analizar a largo plazo los efectos de las perturbaciones naturales y antrópicas sobre la estructura de las comunidades vegetales a través de los patrones de distribución, patrones de establecimiento, crecimiento y mortalidad de las especies (Hubbell y Foster 1986, Pérez 1994). Los UPM también permiten analizar los patrones de composición, riqueza florísticas y demografía poblacional con el tiempo (Condit 1995), y estudios encaminados a evaluar la importancia de los bosques tropicales en el ciclo global del carbono (Phillips *et al.* 1998, Malhi y Grace 2000, Houghton 2010, de Jong *et al.* 2010, Pan *et al.* 2011).

El establecimiento y seguimiento de los UPM es un compromiso fuerte y difícil, por lo que ninguna metodología desarrollada para los propósitos de investigación puede considerarse como un receta completa y definitiva (Corral-Rivas *et al.* 2008). Entonces, el diseño de muestreo y tamaño de las parcelas permanentes pueden variar en función de las

características del área de estudio, objetivos y alcances de la investigación, y los recursos económicos disponibles.

Phillips (1996) y Comiskey *et al.* (1999) señalan que el establecimiento de las UPM son importantes, pero es mayor el compromiso de monitorearlas de manera periódica, continua y consistente, registrando información de alto valor científico. Las cuales, pueden ayudar a la toma de decisiones encaminadas a la conservación y aprovechamiento racional de los recursos forestales (Vallejo *et al.* 2005, Corral-Rivas *et al.* 2008, Gómez 2010).

Diseño de unidades de muestreo y sus componentes

El diseño utilizado para el muestreo en el SMIC es una modificación del diseño por conglomerado implementado en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR 2010). En la Figura 3, se muestra un ejemplo del diseño de muestreo por conglomerado utilizado para bosques y zonas áridas de México, misma que está integrado por 4 unidades secundarias circulares, integrando un arreglo en forma de “Y invertida”.

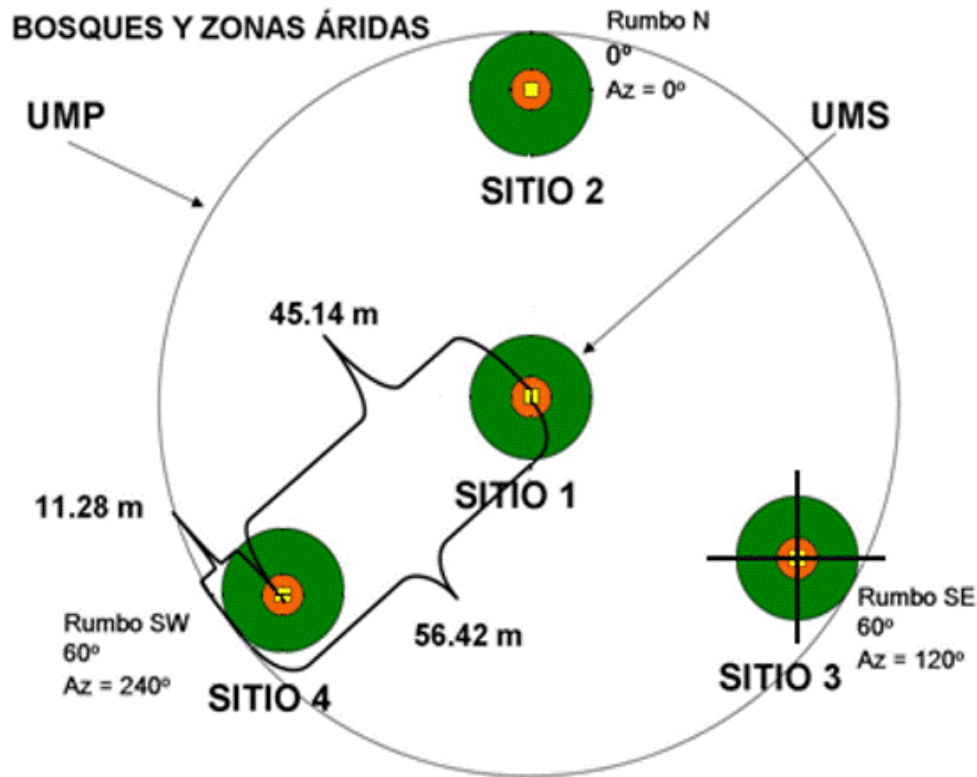


Figura 3. Unidad de muestreo permanente o conglomerado del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (CONAFOR, 2010)

Para diseñar las UPM en el SMIC-Quintana Roo, se tomó como referencia el diseño de los conglomerados del INFyS con algunas modificaciones. Por lo que, cada conglomerado consistió de una parcela circular de 1 ha de superficie, conformado por cuatro sitios con parcelas anidadas ubicadas estratégicamente formando un arreglo de “Y invertida” (Figura 3). El sitio del centro del conglomerado consistió en tres parcelas anidadas con superficies de 80, 400 y 1000 m², mientras que en los otros sitios se establecieron únicamente parcelas de 80 y 400 m² de superficie. En las parcela se tomaron variables para estimar la biomasa aérea viva de cada sitio por conglomerado (Figura 4).

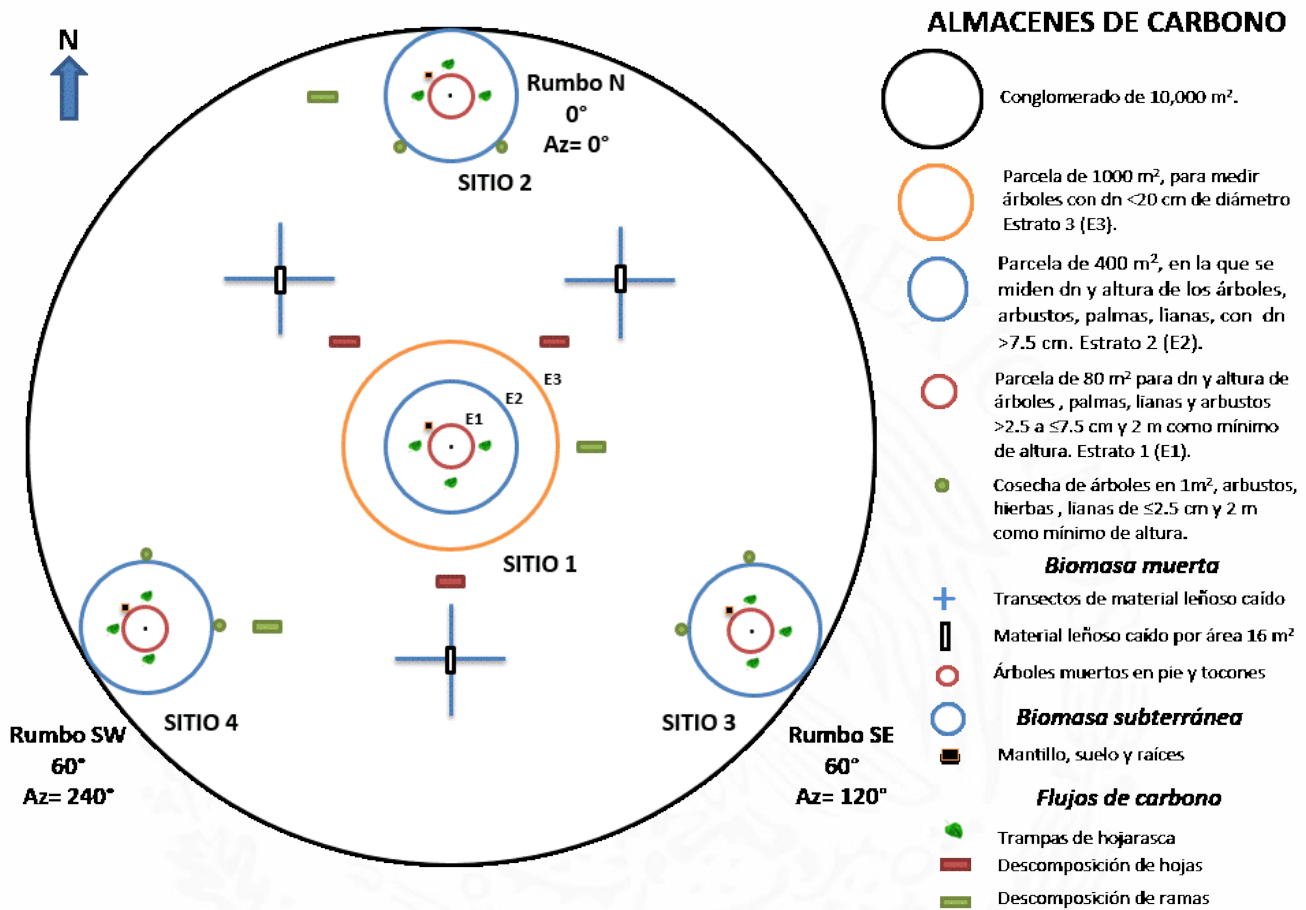


Figura 4. Unidad de muestreo permanente del SMIC tipo INFyS, con las parcelas donde se miden distintos componentes para las estimaciones de los reservorios de carbono

El muestreo del SMIC presentado en la Figura 4 se realizó con la finalidad de mejorar las estimaciones de los reservorios del carbono considerados por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPPC) y, escalar esta información a nivel regional con la vinculación de los datos obtenidos en el muestreo del INFyS.

En las parcelas de 80, 400 y 1000 m², se tomaron medidas de las variables dasométricas de árboles, lianas, palmas y arbustos, incluyendo individuos muertos en pie y tocones de acuerdo a los diámetros señalados en la Figura 4. Por conglomerado se establecieron 6 parcelas de 1 m² para la estimación de biomasa aérea en especies con diferentes formas de vida del sotobosque a partir de un muestreo destructivo.

Se evaluaron otros componentes como el mantillo, suelo y raíces en cuatro puntos de muestreo ubicados en dirección sureste de las parcelas de 80 m² y para evaluar el material

leñoso caído (MLC), se establecieron tres transectos en forma de cruz ubicados estratégicamente en cada conglomerado y sin interferir en los muestreos dasométricos de las parcelas. Finalmente, se evaluó los flujos de carbono a partir de ensayos de la caída de hojarasca y descomposición de ramas y hojas.

Establecimiento de las unidades de muestreo

En gabinete, se diseñó una malla de 32 puntos en el área que abarca el polígono de 3 x 3 km² utilizando herramientas de SIG del software Arc Map, versión 9.1. Los puntos se consideraron como el centro de cada conglomerado llamados UPM. Dentro del polígono se ubicaron de manera sistemática 30 conglomerados considerando los dos tipos de estrato del bosque: área forestal manejada y área forestal bajo conservación ejidal y, 12 puntos de manera proporcional al tipo y superficie de la vegetación dominante en el área de conservación ejidal.

En campo se localizó los centros de los conglomerados usando un Sistema de Posicionamiento Espacial (GPS) Garmin GPSMAP® 62S configurado con el DATUM NAD 83. La localización es importante, debido a que son un punto de referencia para el trazado y establecimiento de las parcelas circulares de muestreo (Figura 5). Una vez localizado el centro del conglomerado se procedió a trazar las parcelas.

La primera parcela que se estableció es el de 80 m², y para delimitarlo se trazó un radio de 5.04 m con un longímetro Trupper® (50 m) con rumbo norte, sur, este y oeste con el uso de una brújula sunnto®. En cada rumbo se colocó una baliza de 1.0 a 1.20 m de altura debidamente marcado con pintura fluorescente para una mejor visibilidad y delimitación de la periferia de la parcela. Posteriormente, se delimitaron las parcelas de 400 m² con un radio de 11.28 m y la parcela de 1000 m² con un radio de 17.84 m aplicando los procedimientos antes descritos. Este primer conjunto de parcelas integraron el sitio 1 del conglomerado.

Seguidamente, se trazaron las parcelas de 80 y 400 m² del sitio 2 ubicados con rumbo norte con azimut 0°. El centro de estas parcelas, se ubicó a 45.14 m a partir del centro del conglomerado. Posteriormente, se trazaron las parcelas del sitio 3 y 4 con rumbo sureste y azimut 120° y rumbo suroeste y azimut 240°, respectivamente. El conglomerado se integró por 4 sitios de muestreo permanente equidistantes con incrementos de 120° teniendo un

arreglo en forma de “Y invertida con respecto al norte. La delimitación de las parcelas del sitio 2, 3 y 4, se realizaron con los mismos procedimientos aplicados en las parcelas del sitio 1.

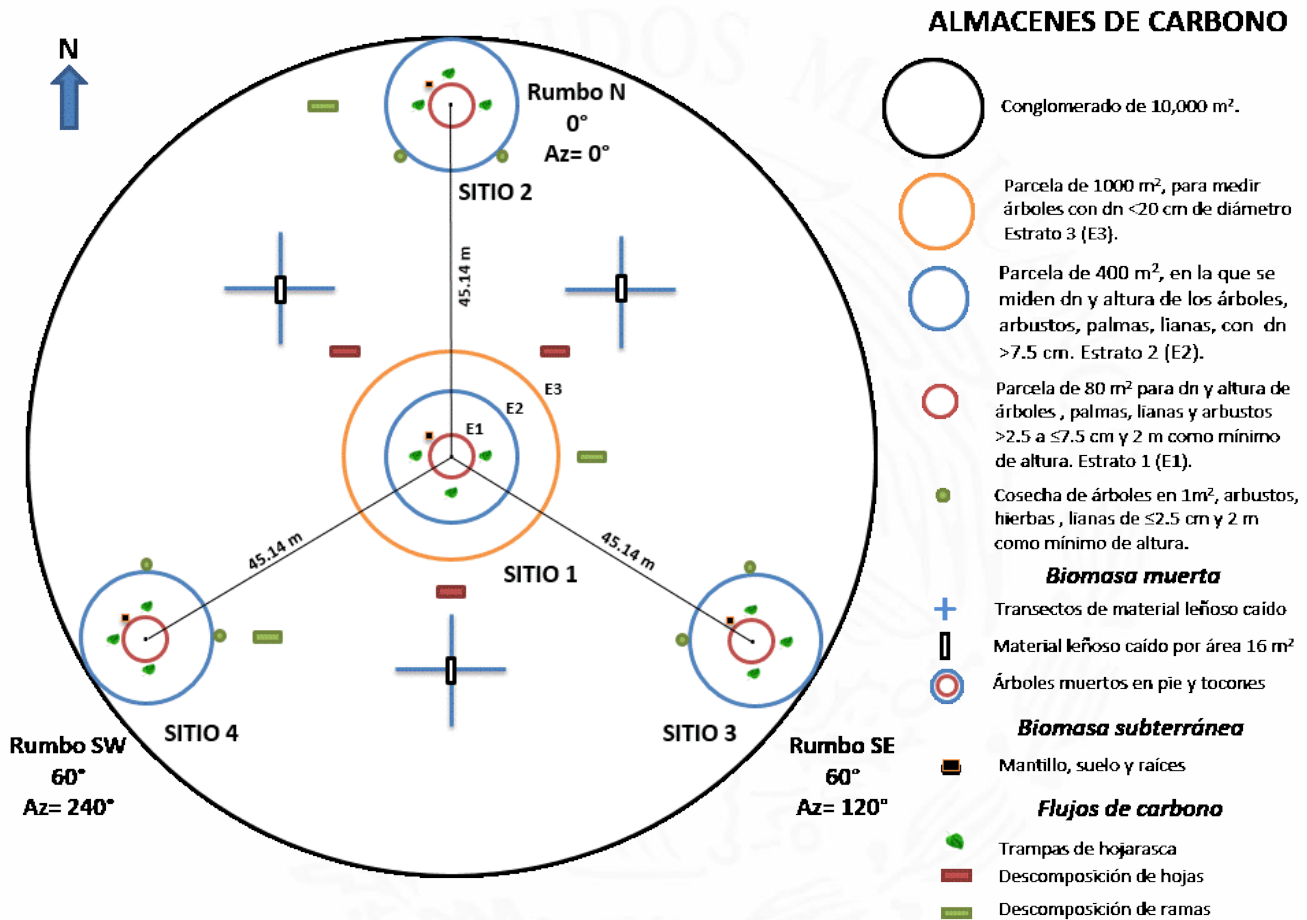


Figura 5. Conglomerado con parcelas anidadas donde se miden distintos componentes para las estimaciones de los reservorios de carbono

En aquellos sitios en donde la pendiente fue mayor a 10%, se compensó la distancia por la pendiente utilizando un hipsómetro *Vertex IV* (Figura 6). Para mayor información del proceso de establecimiento de las parcelas se puede consultar en el apartado de anexos.

CAPÍTULO IV. BIOMASA AÉREA

La biomasa en un ecosistema vegetal es todo material orgánico vivo o muerto e incluye la biomasa aérea y la subterránea (Brown 1997, FAO 2001, Kohl *et al.* 2006). De acuerdo al IPCC (2006), la biomasa aérea es toda la biomasa vegetal viva sobre la superficie del suelo de árboles y herbáceas, que incluye desde ramas, corteza, follaje y estructuras reproductivas.

La biomasa aérea es un componente del bosque ampliamente utilizado en los diferentes campos de las ciencias biológicas y destacan los siguientes: permite estimar los rendimientos de productos comerciales, caracterizar y describir las condiciones o salud de un bosque (Parresol 1999, Ketterings *et al.* 2001, Douterlungne *et al.* 2013), es un parámetro que sirve como base para la planificación del aprovechamiento sostenible de los recursos forestales (Kanninen *et al.* 2007, Kauffman *et al.* 2009), también es una variable para generar y desarrollar modelos de predicción (Jenkins *et al.* 2003, Zianis *et al.* 2005, Ruiz-Peinado *et al.* 2012) proporciona información de la cantidad de productos maderables y no maderables presentes en un bosque, es una variable para determinar la productividad primaria, se considera un factor clave en el estudio del ciclo de nutrientes (Brown 1997, Dimitris 2008, Basuki *et al.* 2009) y es componente clave para cuantificar la carga de combustible presente en un determinado espacio geográfico y entender los regímenes y efectos de los incendios forestales (Vargas *et al.* 2008, Morfín *et al.* 2012)

La biomasa como medida indirecta del carbono, es una variable clave para entender el papel de los bosques en el ciclo global del carbono, al mismo tiempo, es esencial para entender la dirección y magnitud de los flujos de carbono en los sistemas terrestres (Malhi y Grace 2000, Cairns *et al.* 2003). También, la estimación del carbono, expresado en función de la biomasa, permite obtener estimaciones confiables a nivel local y regional para desarrollar escenarios realistas de las existencias de carbono a través del tiempo.

En los bosques tropicales las estimaciones de la biomasa son una prioridad para evaluar las variaciones de las reservas de carbono (Ketterings *et al.* 2001, Chave *et al.* 2004), debido a la alta dinámica de cambio que ocurre en los patrones estructurales de las comunidades

como parte de las constantes afectaciones por perturbaciones naturales y antrópicas (Cairns *et al.* 2003, Pregitzer y Euskirchen 2004, Houghton 2005, Orihuela-Belmonte *et al.* 2013).

A. Diseño de muestreo en campo

La estimación de la biomasa aérea en los 32 conglomerados se realizó a partir de mediciones dasométricas y con el uso de ecuaciones alométricas generadas para árboles vivos y muertos, lianas, bejucos y palmas en bosques tropicales con clima cálido húmedo y subhúmedo (Cuadro 3).

Cuadro 3. Ecuaciones alométricas utilizadas para la estimación de la biomasa aérea por forma de vida

No	Forma de vida	Diámetro (cm)	Ecuación	Estimadores		
				β_0	β_1	β_2
1	* Árboles	≤ 9.9	$y = \exp^{[\beta_0 + \beta_1 LN(Dn^2)(1.14/10^6)(db/pm)]}$	4.9375	1.0583	-----
2	Árboles	≥ 10	$y = \exp^{[\beta_0 + \beta_1 LN(Dn^2 HT) + (\beta_2 / 2)(db/pm)]}$	-2.173	0.868	0.0939
3	Lianas	≥ 2.5	$y = (\beta_0 + \beta_1 LN(Dn))$	0.049	2.053	-----
4	* Palmas	≥ 2.5	$y = (\beta_0 + \beta_1 HT / 10^3)$	-4.51	7.7	-----
5	Árboles muertos en pie	≥ 2.5	$y = \exp^{[\beta_0 + \beta_1 LN(Dn^2 HT) + (\beta_2 / 2)(db/pm) / 100]}$	0.003	1.2411	0.4968
6	Tocones	≥ 2.5	$V_c = \Pi r^2 h$ $y = V_c ge$			

1) Hughes *et al.* (1999) Modificado por Chave *et al.* (2003), 3) Cairns *et al.* (2003) modificado por Urquiza *et al.* (2007), 3) Chave *et al.* (2003), 4) Frangi y Lugo (1985), V_c = Volumen del cilindro, ge = gravedad específica de madera muerta.* biomasa en toneladas, cm = centímetros, Exp = exponente, Dn = diámetro normal a la altura del pecho, HT = altura total, LN = logaritmo natural, db = densidad básica de la madera, pm = promedio de la densidad básica de la madera a nivel sitio, y β_s = parámetros de la ecuación.

En las parcelas con superficies de 80, 400 y 1000 m² de cada conglomerado, se registraron todos los individuos de árboles juveniles y adultos, lianas y palmas (Figura 6) de acuerdo al diámetro normal (dn): a) en parcelas de 80 m² se midieron individuos con dn $\geq 2.5 \leq 7.49$ cm, b) en superficies de 400 m² se registró información de individuos con dn ≥ 7.5 y c) se midieron únicamente aquellos individuos con dn ≥ 20 cm en parcelas de 1000 m².

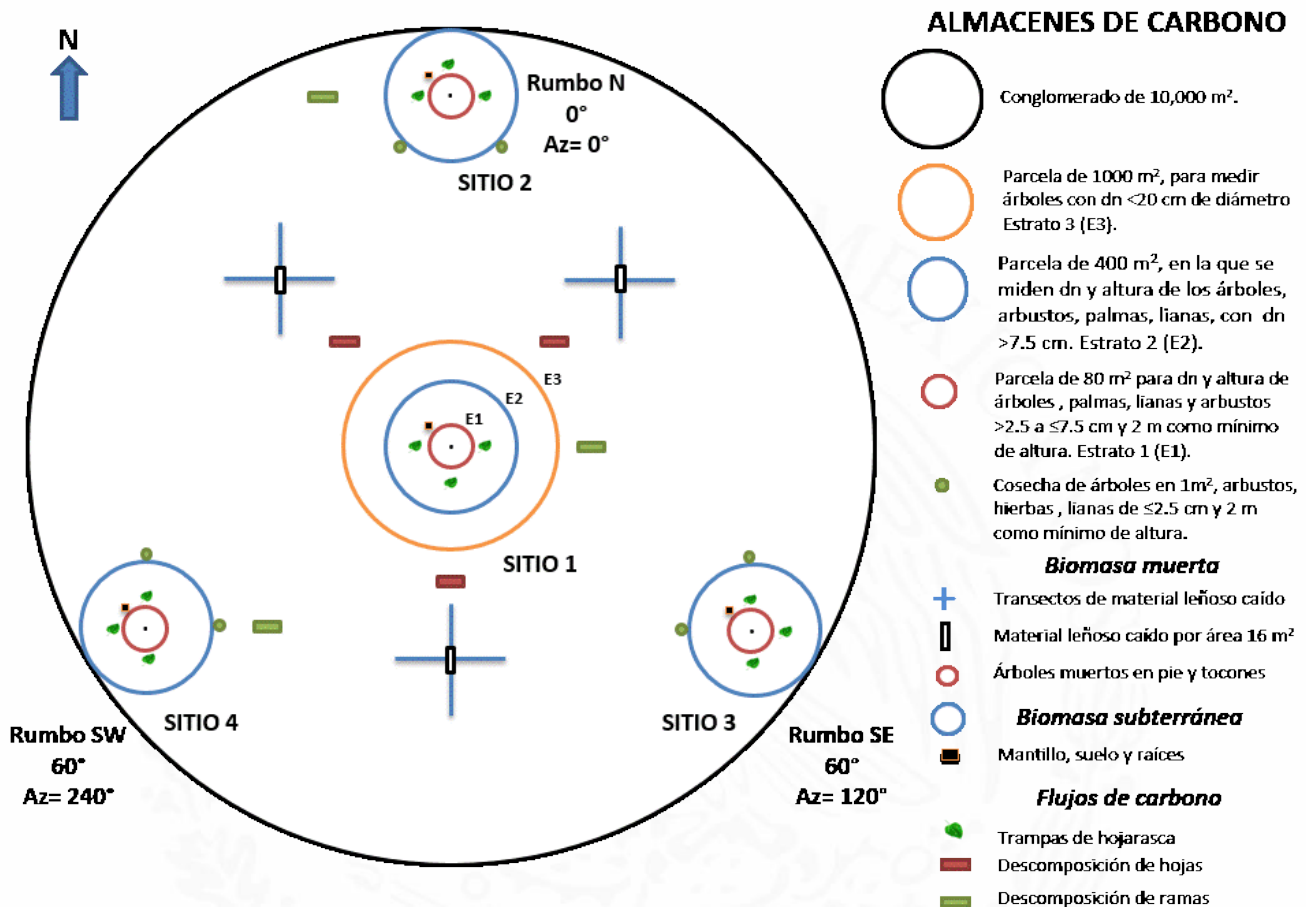


Figura 6. Diseño del conglomerado con sus respectivas parcelas con superficies de 80, 400 y 1000 m². Las variables dasométricas de cada árbol en cada uno de los sitios se tomaron empezando en el norte, siguiendo el sentido de las manecillas del reloj, para mayor control durante el muestreo y para futuras remediciones e investigaciones. De modo que la medición, numeración y etiquetado de los árboles inició a partir del individuo más cercano al centro de la parcela y con rumbo norte (azimut 0°), continuando con dirección noreste, este, sureste, sur, suroeste, oeste y noroeste (Figura 7).

Todos los individuos registrados, además de ser etiquetados en la base, se marcaron con pintura en spray a la altura de 1.30 m, indicando el lugar en donde se midió el diámetro. La numeración se realizó de forma consecutiva por categoría diamétrica, forma de vida y condición (vivo, muerto en pie y tocón). Para cada individuo se registraron datos como diámetro normal, altura y longitud, especie, condición, entre otras variables.

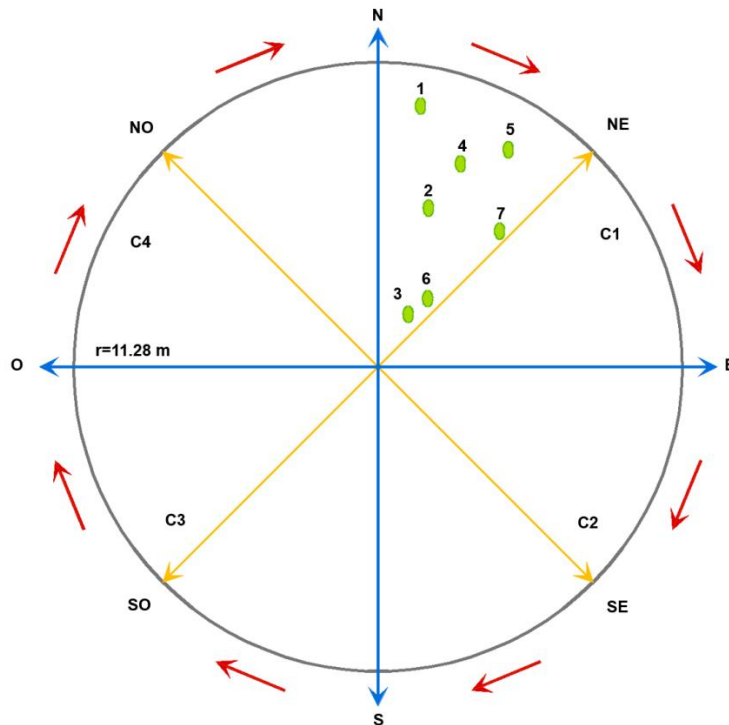


Figura 7. Forma de la numeración de árboles, lianas y palmas en las parcelas de 80, 400 y 1000 m²

A continuación se presentan las consideraciones importantes para el registro de la información de dn, altura y longitud, y las categorías de árboles muertos en pie. Las otras variables se detallan en los Anexos.

Arbolado (diámetro > 2.5 cm)

El dn de los individuos vivos y muertos en pie se midió a partir de la base a 1.30 m de altura. Durante la medición del dn se consideró las características topográficas del sitio (Figura 8). La medición del dn en el caso de los árboles en pie o inclinados se realizó con una cinta diamétrica, mientras que para los individuos caídos se utilizó una forcípula graduada en milímetros.

En el caso de las lianas con crecimiento horizontal, el diámetro se midió a partir del origen de la raíz a 1.30 m, y en lianas con crecimiento vertical se midió a 1.3 m tomando como base la superficie del suelo (Modificado de DeWalt *et al.* 2003). Para las palmas, como *Sabal japa* y *Trinax radiata* con tallos mayor a 1.30 m de altura, el diámetro se midió a 0.30 m a partir de la

base. En la Figura 9 se ilustran las formas de registrar el diámetro normal para especies de lianas y palmas, así como árboles bifurcados en pie.

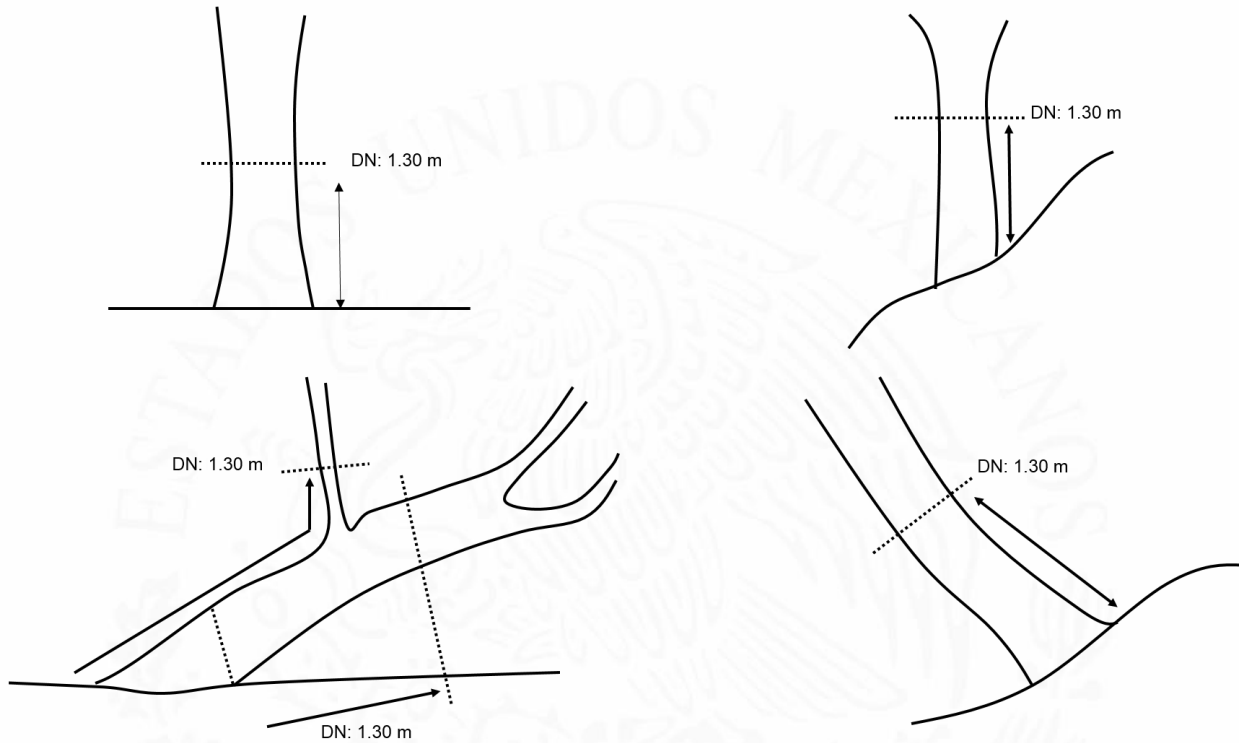


Figura 8. Forma de medición del diámetro normal en árboles en pie, inclinados y caídos, bajo diferentes características topográficas

Para la estimación del contenido de carbono es importante contar con la longitud del tallo para el caso de los individuos inclinados, ya que teniendo solo la altura se estaría subestimando el contenido de carbono en el árbol. Por ello, se tomaron ambos datos: altura y longitud, los cuales se definen como: a) la altura total a partir del suelo hasta la parte más alta del árbol (Roma de la Vega, 2006) y b) la longitud total, es la distancia entre la base y el ápice del árbol (Figura 10).

La longitud total se obtuvo en forma directa con el uso de un flexómetro graduado en milímetros. La medición de altura total, se realizó en forma indirecta con el uso de un hipsómetro *Vertex IV* (Figura 10). Este instrumento funciona con señales ultrasónicas mediante el transponder T3 colocado en el tallo a 1.30 m, el cual obtiene la distancia del árbol al punto de referencia (lector). Las alturas se calculan trigonométricamente con la

distancia y los ángulos. El uso de señales de ultrasonido sirve para eliminar señales o ecos de otros equipos que puedan distorsionar la señal.

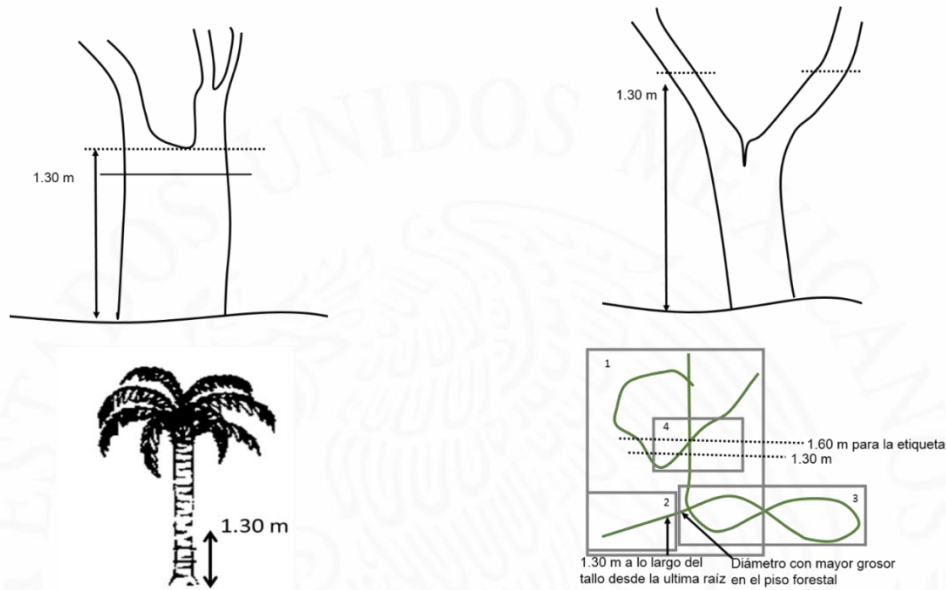


Figura 9. Forma de medición del diámetro normal en árboles bifurcados en pie, palmas y lianas
Forma de medición del diámetro normal en árboles bifurcados en pie, palmas y lianas

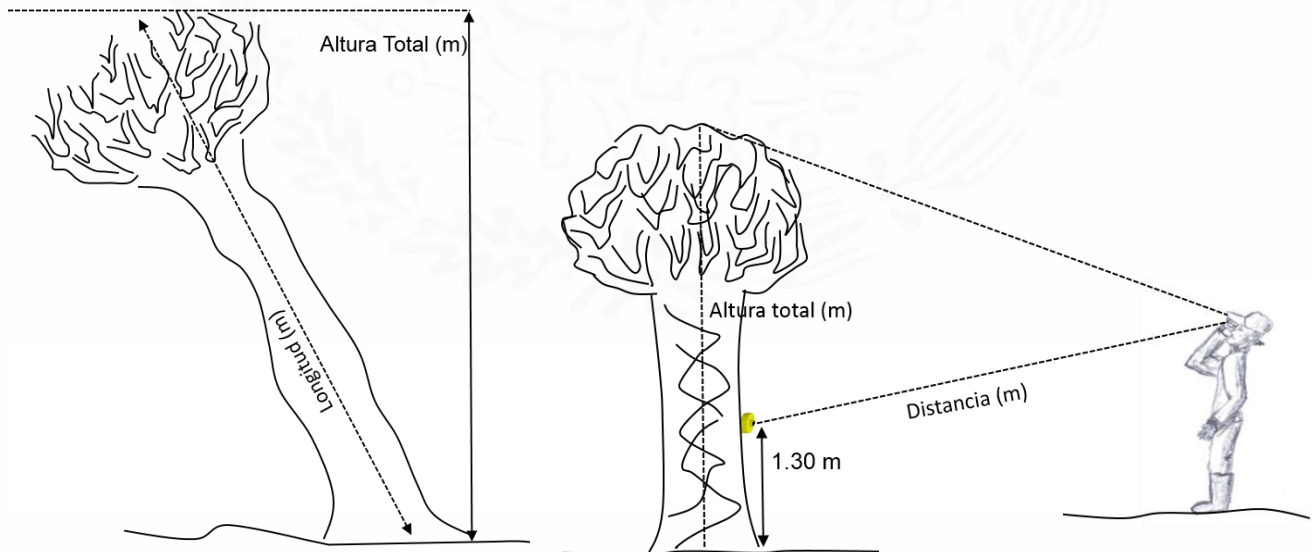


Figura 10. Mediciones de la longitud (m) y altura total (m) de especies arbóreas con el Vertex

Para los individuos pertenecientes a la clase “muerto en pie”, se registró el diámetro a la altura del pecho y la altura total, fueron categorizados de acuerdo a las características que tenían, siguiendo la clasificación de Walker *et al.* (2012) y como se puede observar en la Figura 11:

1. Clase 2a. Árbol que mantiene sus ramas grandes y pequeñas, pero las hojas están ausentes. El árbol se consideró como muerto al confirmar la falta de humedad en el tallo mediante un corte ligero en forma tangencial.
2. Clase 2b. Árbol con ramas gruesas o medianas, pero sin ramas pequeñas ni hojas.
3. Clase 2c. Individuo con tallo principal mayor a 1.30 m de altura, con ramas y hojas ausentes.
4. Clase 2d. Individuo con una altura no mayor a 1.30 m, sin evidencia de daño humano (corte).

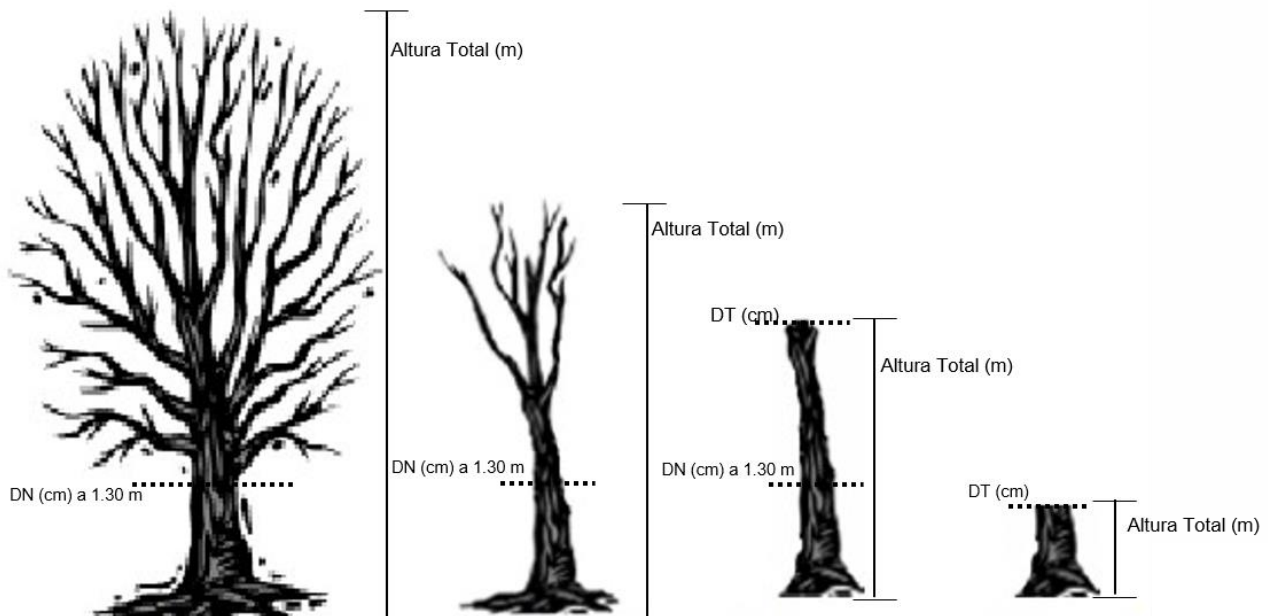


Figura 11. Clasificación de árboles muertos en pie, indicando el lugar de la medición del DN y la altura (Modificado de Walter *et al.*, 2012). AT= altura total (m), DN=Diámetro normal (cm), DT=Diámetro total o promedio de dos mediciones (cm)

Biomasa menor (diámetro < 2.5 cm)

Considerando la alta complejidad y dinámica de los bosques tropicales (Gómez-Pompa 1985, Quinto *et al.* 2009) se consideró realizar cosechas para representar los componentes del sotobosque y conocer su aporte en el almacén de la biomasa aérea.

El sotobosque puede contribuir entre el 3 y 5 % de la biomasa aérea total de un bosque denso, y en bosques secundarios su aportación puede ser mayor (Francis 2000, Locatelli y Leonard 2001). Aunque su aporte en carbono puede ser pequeño a nivel de una parcela, estas pueden llegar a representar un porcentaje significativo del total de carbono a nivel paisaje (Herrera 2002). Es importante ya que es un componente dinámico.

El muestreo de este componente se realizó en las parcelas de 1 m² establecidas en los sitios 2,3 y 4 de cada conglomerado. Mismas que se establecieron a 11.84 m del centro de los sitios 2, 3 y 4, y se enumeraron del 1 al 6 en sentido de las manecillas del reloj, comenzando por la parcela ubicada en el sureste del sitio 2 (Figura 12). En total, se establecieron 192 parcelas de estas dimensiones en todo el SMIC.

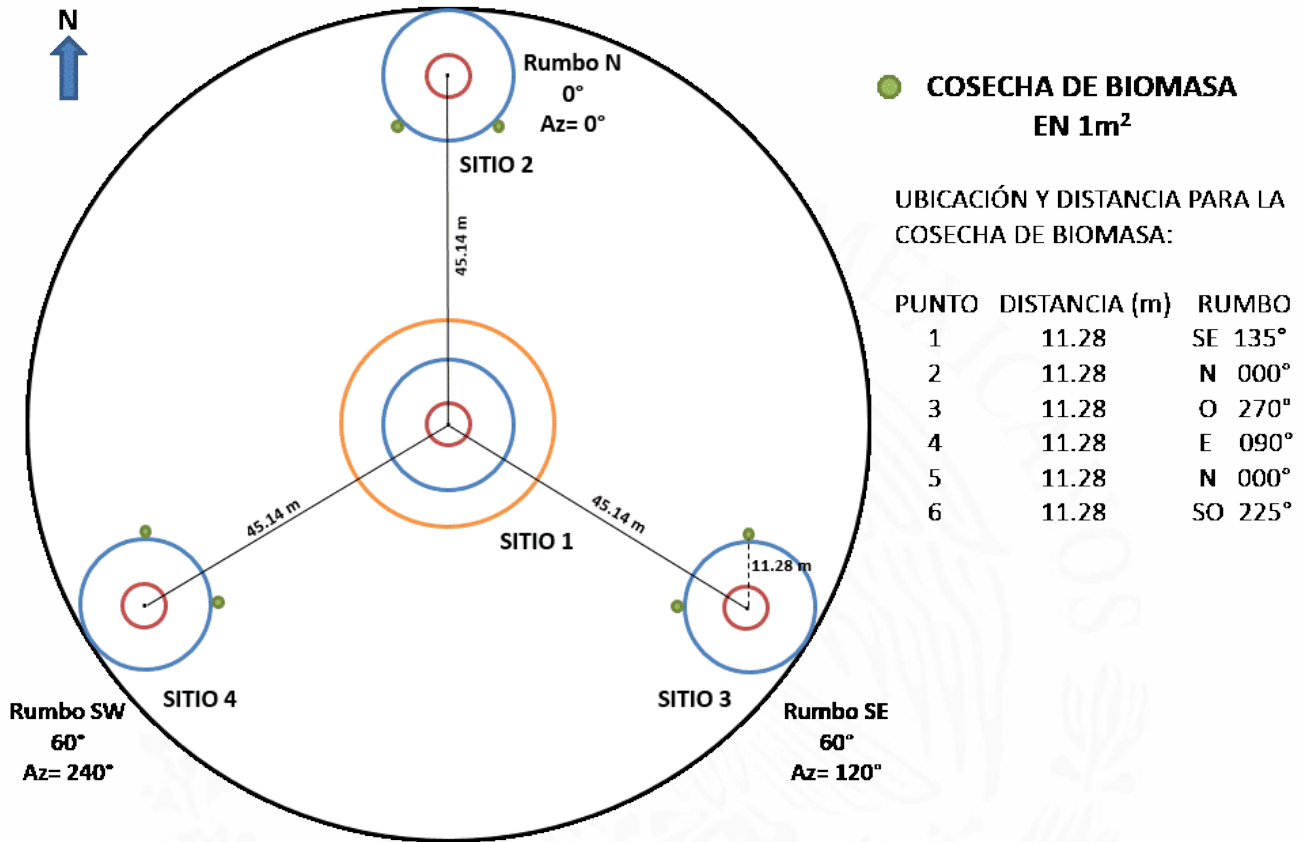


Figura 12. Diseño de muestreo con parcelas de 1m² para la cosecha de biomasa

En cada parcela circular de 1 m², se ubicó el centro de la parcela y se marcó con una estaca de madera (Figura 13), posteriormente se delimitó el área con un círculo construido con PVC (una pulgada de grosor).



Figura 13. Delimitación de parcelas de 1m² para la cosecha de biomasa del sotobosque

Una vez delimitada la parcela, se procedió a identificar y cosechar los individuos con diámetro ≤ 2.5 cm, agrupándolos por forma de vida (Walker *et al.* 2009).

En el caso de las lianas, cuando la cosecha se complicó, se midió y registró el diámetro normal (Figura 14) tal como lo indica Gerwin y colaboradores (2006) bajo los siguientes criterios:

- (A) Lianas que ascienden hacia el dosel, se miden a 1.30 m a lo largo del tallo, desde el punto de enraizamiento principal.
- (B) Lianas que se enrollan en un tronco, se miden a lo largo del tallo de la liana, a 1.30 m desde el punto de enraizamiento.
- (C) Lianas que se ramifican por debajo de 1.30 m del punto de enraizamiento, se miden 20 cm por debajo del punto de ramificación.
- (D) Lianas cuyo tallo descenden de la copa de los árboles y se enraíza en el suelo, el diámetro se mide a 1.30 m antes de ascender al dosel.
- (E) Lianas que enraízan en los puntos 1 y 2 (ver Figura 14), se registran dos diámetros para un individuo, y el diámetro se mide a 1.30 m. Pero, únicamente en los tallos que ascienden a la copa de los árboles.
- (F) Lianas con raíces adventicias que abarcan hasta 0.8 m desde la base del tallo, el punto de medición es a 0.5 m de la última raíz adventicia.
- (G) Lianas que se ramifican por debajo del 1.30 m, pero con un tallo principal muy irregular o ramificación cerca de la tierra, se registra cada tallo por separado, a 1.30 m, y se registra que proceden de un mismo individuo.

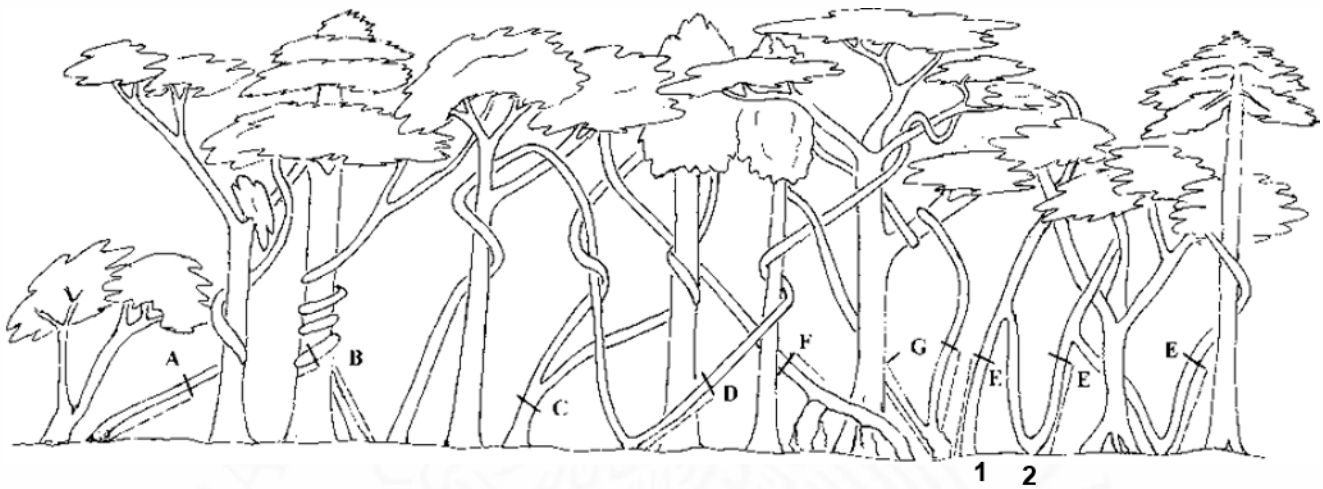


Figura 14. Forma de medición del diámetro para las lianas (modificado de Gerwin et al., 2006)

Durante la cosecha se registró el peso fresco con una balanza digital Radwag® wlc10/A2 con capacidad de 10 kg, con una precisión de ± 0.01 gramos. Una vez concluida la cosecha, se depositó el material en bolsas de papel clasificadas por formas de vida y parcela, para ser enviadas y procesadas en el laboratorio. Todas las bolsas se enumeraron para un mejor control de la información del material cosechado.

El procesamiento del material cosechado se llevó a cabo en el laboratorio y para obtener el peso seco constante se colocaron en una estufa de circulación forzada eléctrica Binder® GmbH a una temperatura de 70 °C (Muñoz *et al.* 2005). El tiempo requerido para obtener el peso seco varió según la forma de vida (Cuadro 4).

Cuadro 4. Tiempo (en horas y días) requerido para obtener el peso constante de las distintas formas de vida cosechadas en las parcelas de 1m²

Formas de vida	Horas	Días
Árbol	96	4.0
Arbusto	93	3.8
Hierba	72	3.0
Liana	96	4.0
Palma	72	3.0
Lechuguilla (Piñuela)	72	3.0
Cactácea	90	3.8
Orquídea	72	3.0
Samia	72	3.0
Bromelias	72	3.0

Re-medicación de la biomasa aérea

Para conocer la dinámica de la biomasa aérea, se realizó la primera re-medicación del arbolado en las parcelas de 80, 400 y 1000 m² a principios del año 2014 y para evaluar la regeneración del sotobosque se realizaron dos cosechas periódicas. La primera colecta de las 192 parcelas se realizó de febrero a marzo de 2014, y la re-cosecha de las mismas parcelas se realizó en el mes de febrero a marzo de 2015.

B. Estimación del contenido de carbono en la biomasa aérea

Enfoque de estimación del carbono forestal

Con base a los lineamientos propuestos por el IPCC 2006 para orientar a los países en la estructuración de metodologías que permitan mejorar la estimación de emisiones y remociones de gases de efecto invernadero (GEI), la **Red Mex-SMIC** desarrolló una metodología con un enfoque multi-escala para estimar los cambios que ocurren en los reservorios del carbono en un bosque tropical influenciadas por perturbaciones naturales y antrópicas.

En el SMIC-Quintana Roo, se desarrolló una metodología para evaluar la dinámica del carbono a partir de UPM con un diseño de muestreo sistemático y estratificado por edades de la vegetación (cronosecuencia), con ellos generar información precisa para las estimaciones del contenido de carbono aéreo y subterráneo en los distintos reservorios del ecosistema vegetal bajo estudio.

Las características particulares de la vegetación predominante en el SMIC, permitieron desarrollar una metodología adecuada a las condiciones del sitio y similares a la metodología implementada por el INFyS, para que la información que se genere pueda ser analizada bajo un procedimiento similar. De esta manera, se pueda agrupar la información derivada del sitio con la información que se obtiene a nivel regional y nacional. Lo cual, es de mucho valor para lograr los niveles de precisión de los stocks de carbono a nivel país y comprender el sistema y sus particularidades de manera más completa.

Las estimaciones de carbono en el SMIC se basan en el muestreo de los diferentes componentes de la biomasa aérea viva y muerta, biomasa subterránea, madera muerta, mantillo y suelo mineral. Con lo anterior, se cumplen los lineamientos del Nivel II y III del IPPCC 2006, en donde considera que para lograr niveles de precisión en los stocks de carbono, se debe escalar la información a nivel local, regional y nacional a partir de las evaluaciones de la biomasa aérea y subterránea, la materia orgánica muerta (mantillo y madera muerta), y suelo mineral (Gibbs *et al.* 2007).

El análisis de los datos de carbono se realizó mediante los estimadores de razón o proporción haciendo uso del lenguaje de programación estadístico R versión 3.1.1 (R Development Core Team 2014). Los estimadores de razón se utilizan para obtener la proporción (R) de una variable de interés (Y) con respecto a una variable auxiliar (X), mismos que son extraídas aleatoriamente de la población (N), sin embargo, cuando se desconoce el tamaño de N se utiliza el estimador de razón para determinar la media de X , y con R se estiman los parámetros de interés muestral o poblacional (Arana, 2003). Entonces, la importancia de los estimadores de razón radica en incrementar la precisión de los promedios e incluso de los totales poblacionales (Schreuder *et al.* 2004). De acuerdo con Wabo (2002) los estimadores de razón se utilizan para tres propósitos: 1) estimación de la proporción de la

variable Y respecto a X , 2) estimación de la media poblacional de Y y 3) estimación del total poblacional de Y .

Arana (2002) argumenta que los estimadores de razón no son insesgados bajo un muestreo simple aleatorio, es decir, no son aplicados a este tipo de muestreo, en contraste, Wabo (2002) señala que los estimadores de razón pueden ser utilizados para cualquier tipo de muestreo. Sin embargo, Velasco (2004) sugiere utilizar los estimadores de razón para obtener parámetros forestales a partir de muestreos sistemáticos por conglomerado.

Para este estudio se empleó el enfoque propuesto por Velasco (2004) para estimar el reservorio de carbono por unidad de superficie. A manera de ejemplo se presenta como se obtiene el reservorio de carbono con la siguiente expresión:

$$\hat{R}_K = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} y_{ik}}{\sum_{i=1}^{n_k} a_{ik}}$$

Donde \hat{R}_k = Estimador del reservorio de carbono de la clase k , y_{ik} = reservorio total de carbono en la parcela i la clase k , a_{ik} = superficie muestreada en la parcela i de la clase k y n_k = número total de las unidades de muestreo de la clase k .

Arbolado

Control de calidad de los datos del arbolado

Previo a la estimación de biomasa a nivel de registro (árbol), se realizó un proceso de control de calidad de los datos dasométricos para identificar inconsistencias. El procedimiento se enfocó en tres componentes principales (Carrillo *et al.* 2014):

1. *Depuración taxonómica.* Para la adecuada identificación de las especies en campo, es necesario apoyarse con personal calificado y con experiencia en inventarios forestales de la región, para garantizar una correcta determinación de las especies. En los casos en los cuales no se pudo identificar la especie, se tomaron especímenes que se cotejaron con muestras botánicas de los herbarios de instituciones de investigación locales.

2. *Estandarización de bases de datos.* Las bases de datos se estandarizaron entre los sitios que conforman la Red Mex-SMIC, y se revisó que el contenido fuera el adecuado, que estuviera en las unidades establecidas, así como los nombres correctos de las variables, y que no se presentaran espacios en blanco entre caracteres, esto para facilitar el proceso de automatización del control de calidad en el lenguaje de programación estadístico R.
3. *Datos dasométricos.* Esta revisión se hizo a nivel de especie. En primer lugar se identificó el conjunto de especies con un número de individuos suficiente para emplear métodos estadísticos automatizados, de los cuales se obtuvieron por cada variable rangos de valores por especie, y así se identificaron posibles errores, que posteriormente se rectificaron con los formatos de campo o directamente en los individuos en campo. Cuando no se tuvo un número suficiente de individuos, la depuración se realizó de forma manual.

Estimación de carbono a nivel individuo

El carbono en la biomasa aérea se estimó a nivel individuo y a nivel de paisaje. Para la estimación a nivel individuo, primero se calculó la biomasa usando ecuaciones alométricas reportadas en la literatura (Cuadro 3) y considerando los siguientes criterios:

- Considerar en primer término los modelos alométricos locales y después los regionales.
- Usar modelos por especie, de no haberlos, por grupo de especies o elegir ecuaciones a nivel de ecosistema.
- Elegir ecuaciones alométricas que reporten el rango diamétrico con el que fueron construidas.
- Elegir las ecuaciones que indiquen el r^2 ajustado con mayor valor y el menor cuadrado medio del error (Picard *et al.* 2012, Andrade *et al.* 2014).
- Identificar en qué unidades se reporta el resultado de cada modelo, kilogramos o toneladas.

Una vez que se eligió la ecuación alométrica para cada registro, se calculó la biomasa y después se transformó a carbono, usando una fracción de carbono de 0.47, de acuerdo a lo sugerido por el IPCC (2006) para bosques tropicales.



Con el valor de carbono por cada individuo, el siguiente paso fue agregar la información a nivel de parcelas de 80, 400 y 1000 m². Para ello, sólo se sumó el carbono de los individuos que pertenecían a cada parcela.

Estimación de carbono a nivel paisaje

Después de haber agrupado el carbono a nivel de parcelas se hicieron los cálculos para obtener la estimación del contenido de carbono de la biomasa aérea a nivel de paisaje. Esto es a nivel del sitio de monitoreo intensivo. El cálculo dependió del diseño de muestreo del SMIC, ya que cumple con los criterios de aleatoriedad, distribución sistemática y homogeneidad en la densidad del muestreo. Con base a los criterios, se utilizó el *estimador de razón* (ER): es la relación entre el valor total de una variable dasométrica y el área total muestreada o por unidad de superficie, el cual se propuso para obtener parámetros forestales que cumplen con los criterios mencionados (Velasco 2004).

La expresión del estimador de razón se muestra en la siguiente ecuación:

$$\hat{R}_k = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} y_{ik}}{\sum_{i=1}^{n_k} a_{ik}}$$

Donde:

\hat{R}_k = Estimador del almacén de carbono de la clase k

y_{ik} = Almacén total de carbono en la parcela i de la clase k

a_{ik} = Superficie muestreada en la parcela i (400 m²) de la clase k

n_k = Número total de parcela en la clase k

Para estimar la incertidumbre, se siguieron las directrices del IPCC (2006). En la ecuación 3 se muestra la expresión utilizada:

$$U_k = \frac{IC_k / 2}{\hat{R}_k} 100$$

Dónde:

U_k = Incertidumbre del estimador de carbono de la clase k

\hat{R}_k = Estimador de carbono de la clase k

IC_k = Intervalo del estimador de carbono \hat{R}_k de la clase k

En la que el IC_k está en función de la varianza de \hat{R}_k :

$$\hat{R}_k - 1.96 \sqrt{\hat{V}(\hat{R}_k)} \leq R_k \leq \hat{R}_k + 1.96 \sqrt{\hat{V}(\hat{R}_k)}$$

Y la $\hat{V}(\hat{R}_k)$ está definida como se muestra en la siguiente ecuación (Velasco *et al.*, 2004):

$$\hat{V}(\hat{R}_k) = \left(\frac{1}{n_k(n_k - 1)\bar{a}^2} \right) \left(\sum_{i=1}^{n_k} y_{ik}^2 - 2\hat{R}_k \sum_{i=1}^{n_k} y_{ik} a_{ik} + \hat{R}_k^2 \sum_{i=1}^{n_k} a_{ik}^2 \right)$$

Donde:

\hat{R}_k , y_{ik} , a_{ik} y n_k se definieron previamente

Donde:

$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}$$

El proceso de estimación del estimador de razón se realizó por cada parcela definido. Por ejemplo, el tipo de uso del suelo (manejo forestal, conservación) y por edad de abandono de la selva.

Para incluir los individuos del área entre las parcelas de 400 y 1000 m², el estimador de razón se calculó para las siguientes categorías diamétricas:

$$2.5 \text{ cm} \leq dn < 7.5 \text{ cm}$$

$$7.5 \text{ cm} \leq dn < 20 \text{ cm}$$

$$dn \geq 20 \text{ cm}$$

El procedimiento de cálculo se realizó generando un Script a partir del lenguaje de programación estadístico R (Carrillo *et al.* 2014).

Estimación de carbono en la biomasa aérea menor

Para obtener la biomasa en cada parcela de 1 m² (dn ≤ 2.5 cm), se sumó el peso seco por forma de vida de las parcelas de 1 m² relacionadas a cada parcela de 400 m². El peso total por parcela se dividió entre 1000 para convertirlo a kilogramos.

La biomasa total en kilogramos se multiplicó por la fracción de carbono 0.47, y así se obtuvo el almacén de carbono en las parcelas de 1 m² (IPCC 2006). También se pueden utilizar fracciones de carbono obtenidas en estudios reportados para la zona de influencia del sitio de monitoreo.

Biomasa menor

Para los datos de carbono en la biomasa aérea menor a 2.5 cm de diámetro, a nivel de paisaje, se consideró a las parcelas de 1 m² como parte de las parcelas de 400 m² (la parcela más cercana), distribuida bajo un criterio sistemático, por lo que también se usó el estimador de razón para obtener el carbono en la biomasa menor a nivel de paisaje.

Cabe mencionar que en este caso el área total de muestreo a nivel de parcela de 400 m² es menor en comparación a la del arbolado, por lo que se ajustó el estimador considerando el área de 4 m², por parcela de 400 m². Para obtener el almacén total de carbono de la biomasa menor a 2.5 cm, sólo se ponderó el estimador de razón de la biomasa cosechada por el área del estrato de interés: área foresta o área de conservación ejidal.

Cambio en el contenido de carbono en la biomasa aérea

Para la estimación de los cambios en el reservorio de carbono, fue necesario contar con datos de reservorios de carbono en la biomasa aérea en dos tiempos. Para ello, se aseguró que el diseño de muestreo en ambos tiempos sea el mismo y que el seguimiento sea a nivel de individuo. En la estimación del segundo tiempo, se incluyó la aportación a la biomasa de los árboles del repoblado.

Una vez estimado el carbono en la biomasa aérea en ambos tiempos de medición, se procede a estimar el cambio en el carbono a nivel de parcelas, y a esta variable de cambio

se aplica el estimador de razón, para obtener el cambio de carbono en la biomasa aérea por unidad de superficie.

La estimación de los cambios totales de biomasa a nivel condición de manejo: área de conservación y manejo forestal o a nivel SMIC, se obtuvo ponderando el estimador de razón por el área correspondiente a cada condición de manejo.



CAPÍTULO V. MADERA MUERTA

Se considera como madera muerta a los árboles muertos en pie, tocones y MLC (IPCC 2006). Los árboles muertos en pie y tocones representan un componente básico en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas forestales, puesto que proveen de hábitat y refugio a diferentes organismos; constituyen un elemento fundamental para el buen funcionamiento del ecosistema, siempre y cuando no se sobrepase el umbral que favorezca la aparición de plagas y el potencial de incendios (Díaz *et al.* 2013).

El MLC son las piezas de madera que están sobre el piso forestal y hasta una altura de dos metros, desprendidas de su fuente original y con menos de 45° de inclinación (Waddell 2002, Morfín *et al.* 2012, CONAFOR 2012). Este componente no incluye árboles muertos en pie, tocones en pie, follaje muerto o cortezas separadas (Wadell 2002).

Los ecosistemas forestales tropicales se caracterizan por almacenar una gran cantidad de MLC de diferentes tamaños (Harmon *et al.* 1995). Debido a la alta dinámica de descomposición y propiedades físico-químicas, el MLC se ha caracterizado como un sumidero de nutrimentos y carbono en un periodo de corto y mediano plazo (Brown *et al.* 1996, McFee y Stone 1996, Chamber *et al.* 2000, Clark *et al.* 2002, Waddell 2002).

El estudio de la madera muerta en los bosques tropicales es aún escaso, a pesar de cumplir diversas funciones ecológicas dentro del ecosistema y su importancia en el ciclo global del carbono (Harmon *et al.* 1995, Eaton y Lawrence 2006, Morfín *et al.* 2012). Aún más, porque el SMIC-Quintana Roo se encuentra en una región que es afectada constantemente por el viento de huracanes, por lo que la dinámica de los bosques en esta zona se basa en gran medida de los procesos de descomposición del MLC.

A. Diseño de muestreo en campo

El diseño de muestreo sistemático y estratificado por conglomerado se utilizó para la medición de árboles muertos en pie y tocones con diámetros ≥ 2.5 cm. Sin embargo, la toma de datos se realizó únicamente en parcelas 80 y 400 m² de los 32 conglomerados (Figura 14). Para el muestreo de MLC fue necesario establecer transectos en forma de “+” con rumbo noreste, sur y noroeste en 16 conglomerados. Con respecto al muestreo del MLC, se

agrupó en categorías de medición: finos, con diámetros de 0.5 a 2.49 cm, medianos de 2.5 a 7.49 cm y gruesos con diámetros de 2.5 a 7.49 cm (Figura 15).

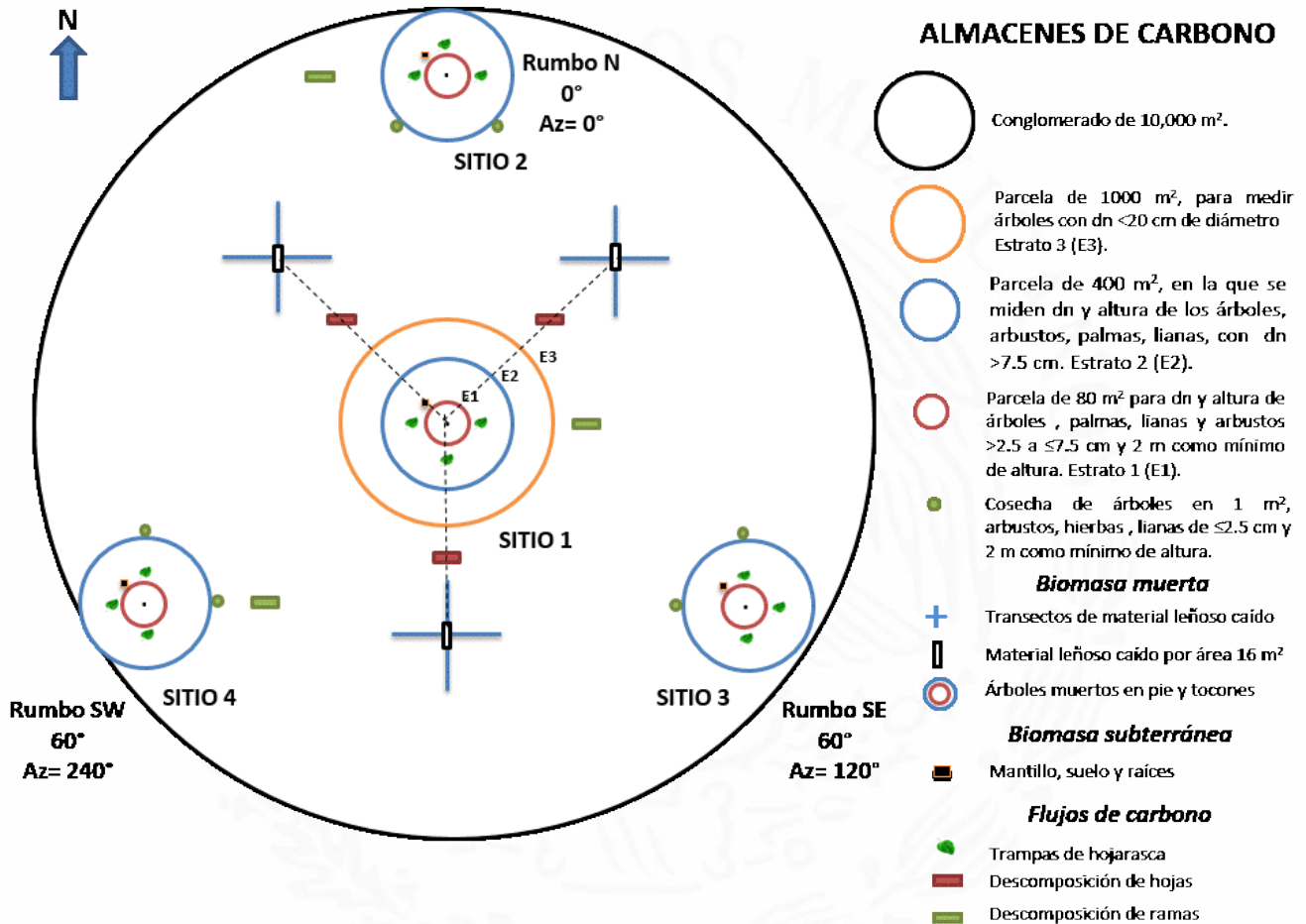


Figura 15. Diseño de muestreo para árboles muertos en pie, tocones y MLC

La clasificación del MLC comprende medidas similares con las establecidas en el INFyS para el muestreo del mismo material. Esto hace posible una comparación y escalamiento de la información del contenido de carbono en estos reservorios y la cantidad de material combustible que puede ser analizada para el diseño de estrategias de manejo del fuego en México. Para estimar la biomasa de los árboles muertos en pie y tocones, y el MLC, primeramente se procesó el MLC en laboratorio para obtener el volumen de las piezas mediante el método de desplazamiento de agua (ASTM No. D143-94, 2007) y posteriormente

se calculó la gravedad específica relacionando el peso seco de las piezas entre el volumen (modificado de Valencia y Vargas1997).

Para estimar la biomasa aérea de los árboles muertos en pie, se procedió a calcular el volumen con el uso de ecuaciones de volumen de fuste limpio generadas para especies tropicales en el municipio de Felipe Carrillo Puerto en el Inventario Nacional Forestal de 1969. Posteriormente, el volumen se multiplicó por la gravedad específica de la madera que fue determinada a partir de MLC en laboratorio. Con respecto a la biomasa de los tocones, éstas se calcularon el volumen con la fórmula del cilindro, aunque con este cálculo se subestimó la biomasa en un pequeño porcentaje, seguidamente el volumen del tocón se multiplicó con la gravedad específica de la madera. En los siguientes párrafos se explican con mayor detalle los procedimientos de colecta de información y calculó de la biomasa de árboles muertos, tocones y MLC en SMIC.

Árboles muertos en pie

En cada parcela de 400 m², se registraron los individuos muertos en pie de acuerdo al dn, los cuales fueron clasificados según su estado de descomposición (Walker *et al.* 2009):

- Clase 1. Árboles con ramas y ramillas que se parecen a un árbol vivo (excepto por la ausencia de hojas; Figura 15). Para confirmar esta condición, se hicieron cortes tangenciales para observar si no hay señales de humedad. Otra alternativa fue apoyarse en la experiencia de colaboradores locales, ya que ellos saben si un árbol con apariencia de muerto está vivo o no.
- Clase 2. Árboles que van desde los que presentan ramas grandes y pequeñas hasta los que sólo tienen tronco (Figura 16).



Clase 1



Clase 2

Figura 16. Clasificación de árboles muertos en pie. Fotos: Gonzalo Sánchez Santos

Para los individuos que corresponden a la clase 1 y 2, el dn se midió considerando el mismo criterio que para los árboles vivos. Se registra la altura total para ambas clases de árboles (Figura 17).

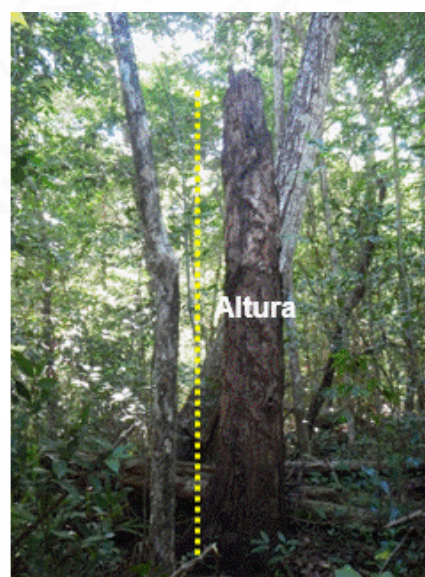
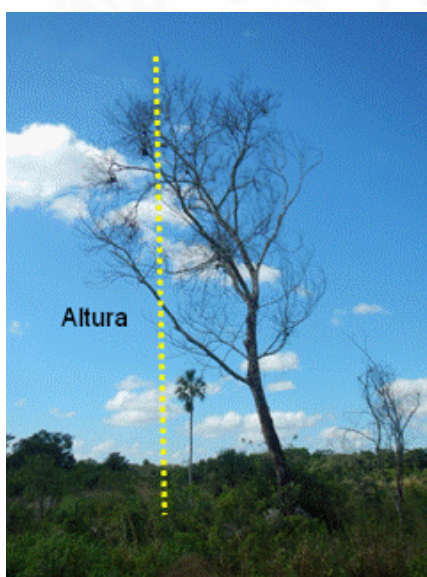


Figura 17. Diagrama en el que se indica hasta dónde considerar la altura en algunas condiciones de árboles muertos en pie.

Tocones

El INFyS en su manual de campo (CONAFOR 2012), define como tocón al trozo de tallo que queda de un árbol debido a perturbaciones naturales o al aprovechamiento, con altura menor a 1.30 m.

En las parcelas de 80, 400 y 1000 m², se registró la altura y el diámetro de la parte media de los tocones correspondientes a cada sitio y se clasificaron según su estado de descomposición.

Material leñoso caído

El MLC se evaluó en 16 de los 32 conglomerados, estos se seleccionaron manteniendo el orden sistemático y la proporción entre la superficie del área forestal y de conservación. De este modo, en el área forestal se eligieron seis conglomerados (2, 4, 6, 8, 12 y 14) y 10 en el área bajo conservación (10, 16, 18, 22, 24, 25, 26, 27, 29 y 31) (Figura 18). Con esta distribución también se abarcó espacialmente las diferentes edades y tipos de vegetación dominantes dentro del SMIC.

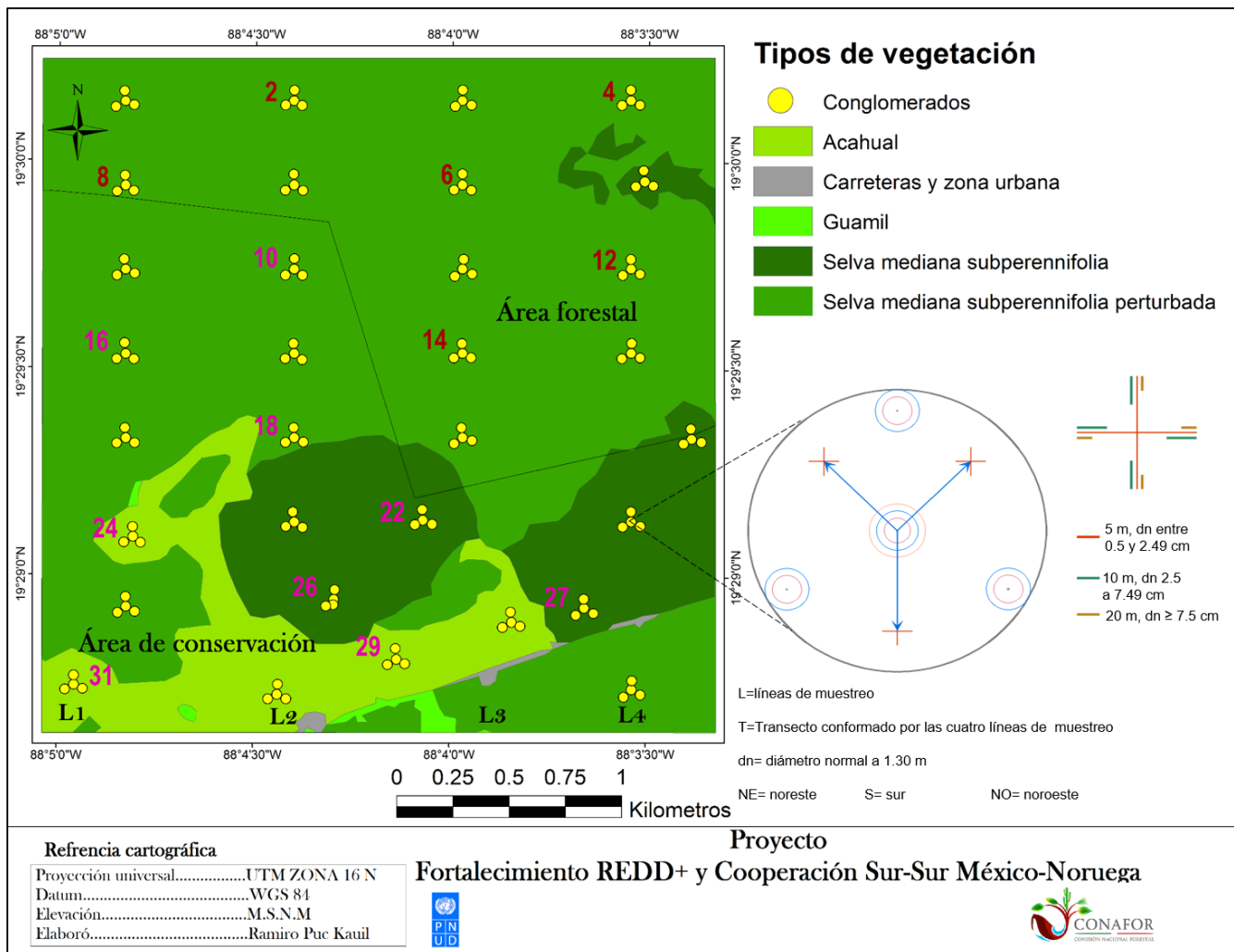


Figura 18. Conglomerados en los que se realizó el muestreo de MLC con transectos del método de líneas de intersección planar

Para el muestreo del MLC se usó el método de líneas de intersección planar o en forma de “+” (Figura 19). En cada conglomerado se establecieron tres grupos de líneas en forma de “+”; cada una de ellas consistió de dos líneas de 20 m de largo. El punto central de la “+” se ubicó a 35 m del centro del conglomerado.

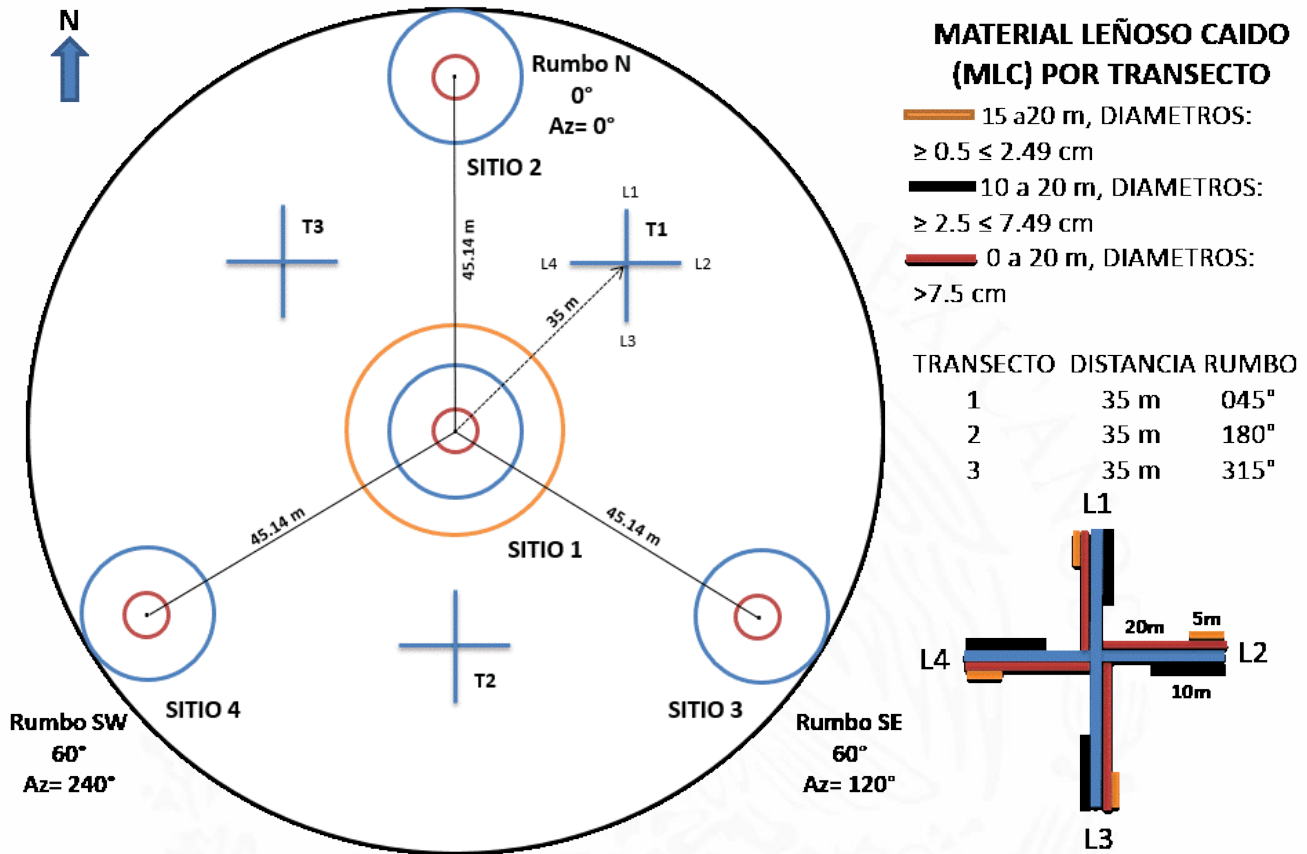


Figura 19. Diseño de muestreo para MLC por transecto con el método de líneas de intersección planar

El MLC se clasificó en tres categorías diamétricas (Cuadro 5) similar a la propuesta para el muestreo de MLC del INFyS, y consideradas en estudios para la caracterización de materiales combustibles (Brown 1974, Vera 1980, Rentería-Anima *et al.* 2005, Sikkink y Keane 2008, CONAFOR 2012). Para el muestreo del MLC se marcaron tres distancias en cada línea de 20 metros que integran los transectos (Figura 19). Por ejemplo, el MLC ≥ 0.5 dn ≤ 2.49 cm se registró a partir de los 15 a 20 m de cada línea, el MLC ≥ 2.5 dn ≤ 7.49 fue muestreada de los 10 a 20 m de cada línea, mientras que MLC con diámetros > 7.5 cm se midieron en todo lo largo de los 20 m de las líneas.

En cada línea de 20 m se marcaron tres distancias para evaluar las tres categorías de diámetro del MLC (Cuadro 5) y en la Figura 19 se observa la longitud muestreada con base a la categoría diamétrica del MLC.

Cuadro 5. Clasificación del MLC en el SMIC-Quintana Roo y en el INFyS

Red Mex-SMIC		INFyS	
Clase diamétrica	Diámetro (cm)	Clase diamétrica	Diámetro (cm)
Finos	De 0.5 a 2.49	Regulares	De 0.06 a 2.5
Medianos	De 2.5 a 7.49	Medianos	De 2.6 a 7.6
Gruesos	≥7.5	Mayor	≥ 7.6

La longitud de cada línea, según la categoría diamétrica del MLC, se determinó a partir de la información del porcentaje del error de muestreo obtenido de los datos de muestreo del MLC en el SMIC-Campeche en el año de 2013.

El MLC grueso se clasificó en cinco clases según su estado de descomposición (Wadell 2002). En el Cuadro 6 se presentan las características de las ramas de cada categoría respecto a su integridad estructural, textura y color de la madera, y condición de las ramas.

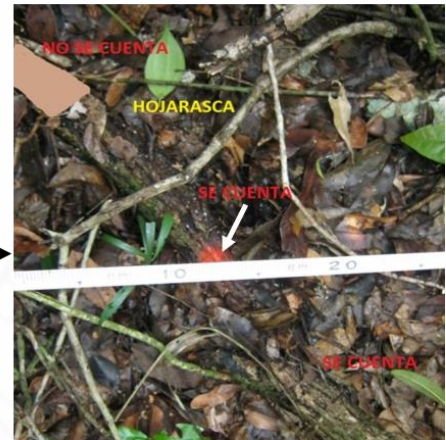
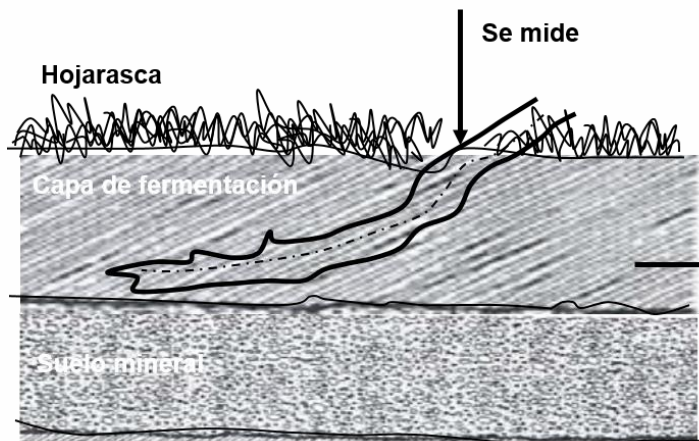
Cuadro 6. Clases de descomposición del MLC, de acuerdo a los criterios del INFyS y literatura. Para el MLC grueso se consideraron las clases de descomposición de Wadell (2002)

Clase de descomposición	Integridad estructural	Textura de la madera	Color de la madera	Condición de ramas y ramitas
1	Dura	Intacta, no putrefacta	Color original	Ramas grandes y finas presentes, sujetas al tronco y tiene corteza
2	Duramen duro; albura en algún grado de putrefacción.	La mayor parte intacta, albura parcial	Color original	Hay ramas presentes, pero las ramas finas son pocas y la corteza se empieza a caer
3	Duramen duro; el tronco soporta su propio peso	Secciones grandes de la albura pueden separarse con la mano	Café rojizo o color original	La base de las ramas grandes no puede separarse
4	Duramen podrido, el tronco no soporta su peso, pero mantiene su forma	Suave, pequeñas piezas en bloque. Con una punta metálica se puede separar el duramen	Rojo-café o café claro	La base de las ramas grandes pueden separarse fácilmente
5	No tiene integridad estructural, no mantiene su forma	Suave, la madera se hace polvo cuando está seca	Rojo-café a café oscuro	La estructura de las ramas está completamente putrefacta

Criterios para la colecta de MLC

La cuantificación y medición del MLC se realizó con base en los criterios establecidos por Brown (1974) para las piezas intersectadas en las líneas de muestreo:

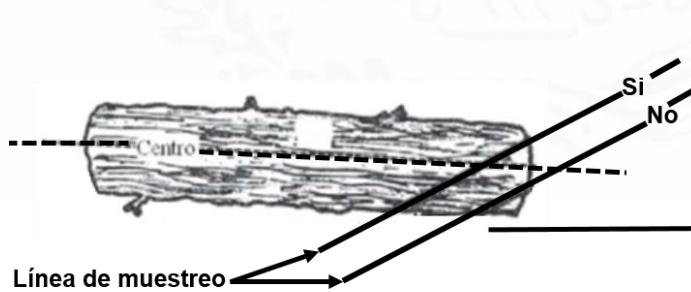
1. Se contabilizan todas las piezas separadas de su fuente original. Pero no se consideran las hojas, corteza, frutos, pastos y hierbas.
2. Las ramas gruesas y delgadas, así como las ramillas ubicadas sobre el piso forestal y dentro de la capa de hojarasca se cuentan. No se consideran las piezas cuando su eje central se encuentran en la capa de fermentación, aun cuando son intersectadas por la línea de muestreo.



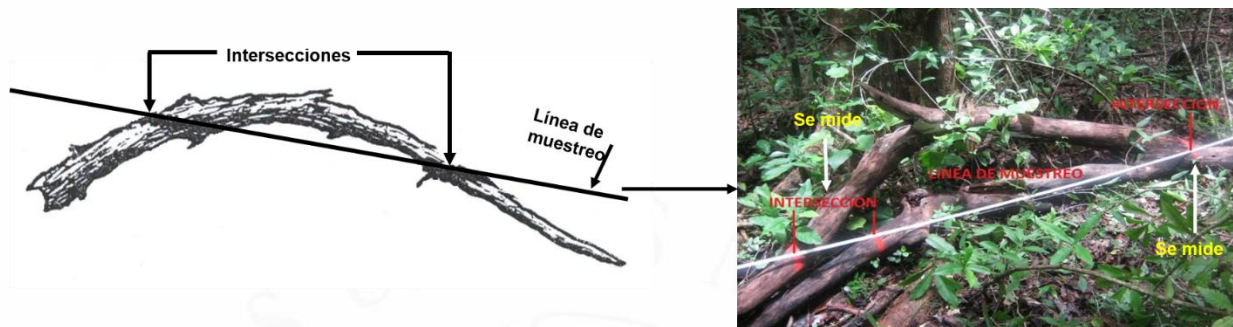
3. Se consideran las piezas ubicadas al final de la línea de muestreo y cuando su eje central es intersectado. Para este estudio, se midieron las piezas que fueron intersectadas en su eje central a ciertas distancias a lo largo de los 20 m.



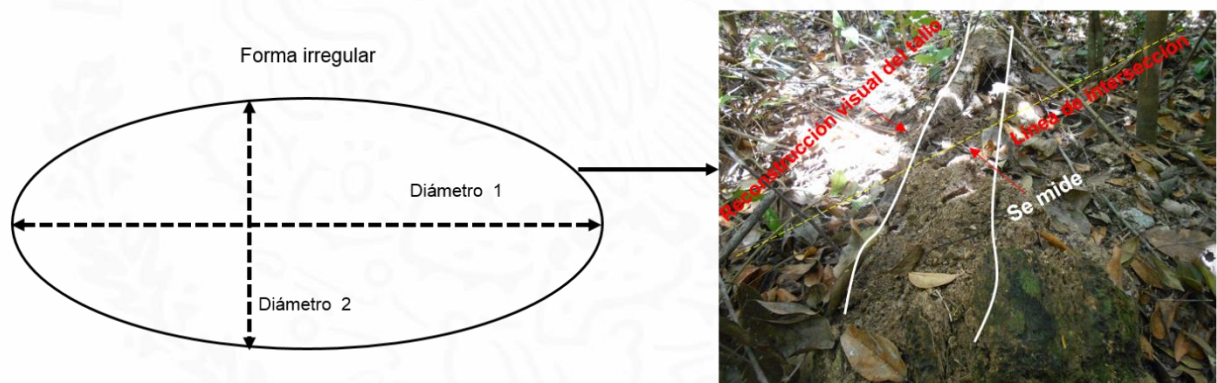
4. No se miden las piezas cuando su eje central coincide exactamente con la línea de muestreo (Mc Rae *et al.* 1979).



5. Cuando las piezas son de forma curva y están intersectada dos veces por la línea, se mide en cada intersección.



6. Se miden individualmente todos los tocones y raíces separados del piso forestal.
7. Se consideran las piezas altamente desintegradas y sin una estructura original. Para ello, se construye visualmente la forma original de la pieza (cilíndrica) y se registra el diámetro promedio para tallos irregulares, como lo señalan Marshall y colaboradores (2000).



Procedimiento de medición del MLC

El muestreo en todos los segmentos inició en el punto de intersección de las dos líneas de la “+” y hasta concluir los 20 m de longitud (Figura 17):

- MLC grueso. A lo largo de los 20 m se midieron las piezas pertenecientes a esta clase diamétrica; por cada pieza se tomó el diámetro (con cinta diamétrica, mod.283d/5m) y se le asignó una clase de descomposición (Cuadro 5).
- MLC mediano. Las piezas de esta clase diamétrica se registraron de 10 metros, del metro 10 al 20. Se registró el diámetro tomado con un medidor de categoría diamétrica (Vera, 1989; Figura 20)

- MLC fino. Estas piezas solo se registraron en cinco metros, del metro 15 al 20. Para este caso también se registró el diámetro usando un medidor de categoría diamétrica, y para las piezas muy pequeñas se tomó con un calibrador digital Vernier® graduado en milímetros.

Para las tres clases diamétricas, y en la medida de lo posible, se identificó el nombre común y/o la especie a la que pertenece la pieza, y se tomó la pendiente de cada línea, utilizando el Vertex IV (Brown 1974, Waddell 2012).

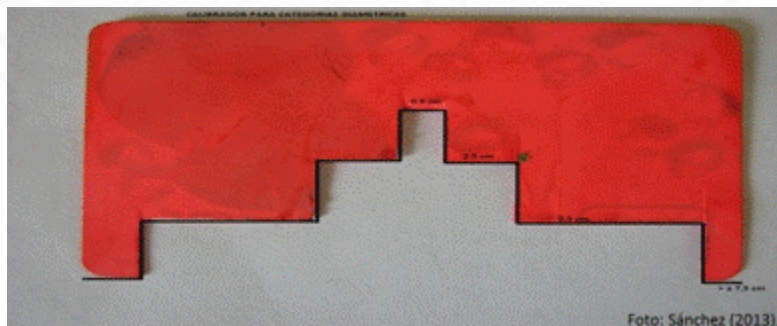


Figura 20. Calibrador de diámetro utilizado para medir el MLC mediano y fino

De las piezas de MLC grueso que presentaron forma irregular, se registró el diámetro promedio a partir de dos mediciones del diámetro (Figura 21). Además, se registró el diámetro de aquellas piezas intersectadas más de dos veces y hasta tres por la misma línea de muestreo (criterio número cinco) tal como lo indican Marshall y colaboradores (2000).

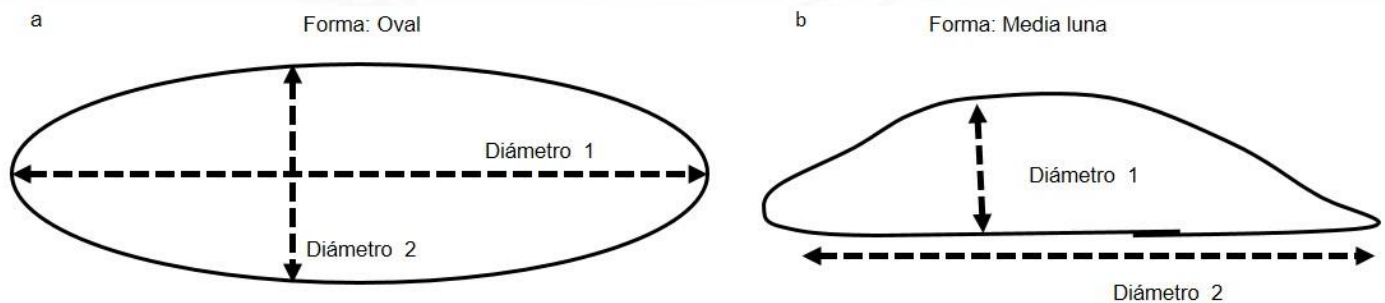


Figura 21. Medición del diámetro en piezas de MLC con forma (a) geométrica ovalada y (b) media luna (Marshall et al. 2000)

Para las tres categorías de MLC se obtuvieron al menos tres muestras para hacer la determinación de la gravedad específica. Las muestras se tomaron fuera de las “+” pero al

interior del conglomerado. Cada muestra se etiquetó de acuerdo a su ubicación y clase diamétrica y se llevó al laboratorio.

Una vez en el laboratorio se procedió a obtener el peso seco de cada pieza, dejándolas secar por cinco días (120 horas) en una estufa de circulación forzada eléctrica Binder® gmbh. El tiempo de secado asignado a las muestras, se determinó previamente con una submuestra del MLC grueso llevado al laboratorio. El peso seco se obtuvo usando una balanza digital Radwag® wlc10/a2 con capacidad de 10 kg \pm 0.1 g de precisión.

Una vez determinado el peso seco (P_s) de las piezas, se calculó su volumen mediante el método de desplazamiento de agua (ASTM No. D143-94, 2007). El proceso consistió en forrar cada pieza con vitafilm flexible (película de plástico de polietileno y polipropileno), para evitar la entrada de agua en los poros de la madera. Enseguida se introdujeron en un recipiente con agua, con peso conocido, evitando tener contacto con las paredes y el fondo del recipiente tal como lo indica la norma ASTM No. D143-94 (2007). El peso del agua desplazada correspondió al volumen de la muestra (V_m), suponiendo que la densidad del agua es igual a 1g/cm³. Con la relación del peso seco y el volumen de las muestras se calculó la gravedad específica (g/cm³) por pieza como: $Ge = PS / Vm$ (modificado de Valencia y Vargas 1997).

Posterior al cálculo de la gravedad específica, se procedió triturar y moler las muestras de MLC grueso, en sus diferentes grados de descomposición. El trabajo se realizó con herramientas de uso industrial, casero y de carpintería. El material molido se colocó en bolsas de plástico de diferentes medidas. Previo al envío de las muestras molidas para su análisis en laboratorio, éstas se clasificaron y ordenaron por el por conglomerado, diámetro, largo, peso fresco, tipo de MLC (F, M, G), tipo de putrefacción propuestas por Wadell (2002), etiquetado, secado en horno, peso seco, cubierta con vitafilm, inmersión en agua (gravedad específica), molido por tipo de MLC, cernido, pesado, embolsado, y etiquetado.

Se enviaron al laboratorio entre 5 a 20 gr para determinar la concentración de carbono, mediante el método de combustión seca con un analizador de carbono total TOC Shimadzu 5050 ATM (Schimadzu Co. 1997).

B. Estimación del carbono en la madera muerta

Control de la calidad de los datos

La información de campo y laboratorio se capturó en hoja de cálculo Excel 2013. La información fue revisada a partir de la construcción de gráficos de distribución de datos para detectar datos atípicos e inconsistencias entre los datos de campo y laboratorio. Después de esta revisión los datos se transfirieron a tablas en Access para mejor manejo de los mismos.

Árboles muertos en pie

Para estimar la biomasa en árboles muertos en pie, se calculó previamente el volumen a partir de la aplicación de ecuaciones de volumen (Cuadro 7) para fuste limpio generadas en el municipio de Felipe Carrillo Puerto durante el Inventario Nacional Forestal de 1969 coordinada por el entonces Subsecretaría Forestal y de Fauna, S. A. G.

Para convertir los datos de volumen a biomasa, se multiplicó el volumen por la gravedad específica ($Ge = PS / Vm$) de los árboles muertos en pie o del MLC, expresada en $kg\ m^{-3}$. Si no se cuenta con datos de gravedad específica se puede usar la densidad de la madera muerta.

Cuadro 7. Ecuaciones alométricas para estimar volumen de fuste limpio en árboles muertos en pie

Especie	Ecuación alométrica
<i>Metopium brownei</i> (Jacq.) Urban L. & N	$= \left((0.003) + (1.24116 * (dn/100)^2) + (0.49685 * h * (dn/100)^2) \right)$
<i>Lysiloma latisiliquum</i> (L.) Benth. B.	$= \left(\frac{(0.14422) - (0.83177 * (dn/100)) - (0.00374 * h) + (1.98286 * (dn/100)^2) + (0.55483 * h * (dn/100)^2)}{1} \right)$
<i>Manilkara zapota</i> (L.) Van Royen	$= (0.00183) + (0.91016 * (dn/100)^2) + (0.5674 * h * (dn/100)^2)$
<i>Pseudobombax ellipticum</i> (Kunth). Dugand.	$= (0.11165) + (0.53739 * h * (dn)^2)$
<i>Caesalpinia platyloba</i> S. Watson	$= (-0.07971) + (0.7255 * (dn)) + (0.49214 * h * (dn)^2)$
<i>Brosimum alicastrum</i> Swartz B.	$= (-0.03959) + (1.80609 * (dn)^2) + (0.5104 * h * (dn)^2)$
<i>Caesalpinia gaumeri</i> Greenm.	$= (-0.13168) + (0.91008 * (dn)) + (0.44823 * h * (dn)^2)$
<i>Piscidia piscipula</i> (L.) Sarg. B.	$= (-0.00316) + (1.47032 * (dn)^2) + (0.46477 * h * (dn)^2)$
<i>Swartzia cubensis</i> (Britton & Wils.) Standl. C.	$= (0.5505) - (0.0117 * h) + (0.73277 * h * (dn)^2)$
<i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg. B.	$= (0.0488) + (0.867 * (dn)^2) - (0.08936 * h * (dn)) + (0.75038 * h * (dn)^2)$
<i>Swietenia macrophylla</i> King	$= (0.05779) + (2.01932 * (dn/100)^2) + (0.39884 * h * (d/100)^2)$
Otras especies	$= (0.03657) + (3.23819 * (dn/100)^2) + (0.30048 * h * (dn/100)^2)$

Tocones

En el caso de los tocones se aplicó la fórmula del cilindro para calcular el volumen antes de estimar su biomasa:

$$V_t = \Pi r^2 h$$

Donde:

V_t = Volumen del tocón (m^3)

r = Radio del tocón (m)

h = Altura del tocón (m)

Para transformar a biomasa, el volumen se multiplicó por la gravedad específica expresada en $kg\ m^{-3}$.

El valor de biomasa se multiplicó por un factor de carbono tomado del IPCC, para obtener el carbono en árboles muertos en pie y tocones.

Material leñoso caído

La estimación de la biomasa en el MLC se hizo a nivel de conglomerado. La cual, se estimó mediante la ecuación de Van Wagner (1982):

$$B = (k)(GE)\sum(D_q(c)/l)$$

Donde

B = Biomasa del MLC ($t\ ha^{-1}$)

k = Constante equivalente a 1.234, deriva de la densidad del agua y de factores de conversión para obtener la biomasa del MLC en $t\ ha^{-1}$

D_q = Diámetro cuadrático, que es el diámetro interceptado elevado al cuadrado

GE = Gravedad específica o densidad específica de la madera calculada sobre peso seco ($(g\ cm^{-3})$)

c = Factor de corrección por la pendiente en una base horizontal, se calcula con la siguiente expresión:

$$c = \sqrt{1 + \left(\frac{pendiente(\%)}{100}\right)^2}$$

l = Longitud del transecto (m)

Si en campo se registra la frecuencia de piezas finas o medianas por línea, la estimación de biomasa puede realizarse con la siguiente expresión:

$$B = (k)(GE)(D_q)(f)(c)/l$$

B = Biomasa del MLC ($t\ ha^{-1}$)

k = Constante equivalente a 1.234, deriva de la densidad del agua y de factores de conversión para obtener la biomasa del MLC en $t\ ha^{-1}$

D_q = Diámetro cuadrático, que es el diámetro interceptado elevado al cuadrado

GE = Gravedad específica o densidad específica de la madera calculada sobre peso seco ($(g\ cm^{-3})$)

f = Es el número de piezas para MLC fino o mediano encontradas en el transecto

c = Factor de corrección por la pendiente en una base horizontal, se calcula con la siguiente expresión:

$$c = \sqrt{1 + \left(\frac{pendiente(\%)}{100} \right)^2}$$

l = Longitud del transecto (m)

El valor de biomasa se multiplica por la concentración de carbono derivada de los datos de laboratorio, para obtener el contenido de carbono en el MLC.

Madera muerta

Árboles muertos en pie

Una vez estimado el contenido de carbono en los árboles muertos en pie a nivel de parcelas, se procedió a obtener las densidades de carbono a nivel de paisaje usando los ER de manera análoga a lo mostrado en la biomasa aérea. Esto se debe a que tanto los árboles muertos en pie fueron medidos en las mismas superficies de muestreo que el arbolado vivo.

El almacén total de carbono en árboles muertos en pie se obtuvo multiplicando el respectivo ER por las áreas, a nivel de estrato o SMIC, según el nivel de análisis.

Tocones

La estimación del carbono a nivel paisaje para tocones se siguió el mismo procedimiento para árboles muertos en pie, debido a que la información registrada de los tocones se obtuvo en las mismas parcelas.

Material leñoso caído

Para estimar el total de carbono en el MLC a nivel de paisaje, fue necesario ponderar el promedio del carbono en el MLC por el área de análisis (estrato o SMIC según corresponda). El promedio de MLC es posible obtenerlo a partir de los conglomerados donde se estimó. La incertidumbre del promedio de MLC se obtuvo a partir de:

$$U_{\overline{MLC}} = \frac{1.96(Sd_{MLC_CGL} / \sqrt{n})}{\overline{MLC}}$$

Dónde:

$U_{\overline{MLC}}$ = Incertidumbre del promedio del carbono en el MLC

Sd_{MLC_CGL} = Desviación estándar del carbono en el MLC de los conglomerados

n = Número de conglomerados

\overline{MLC} = Promedio del carbono en el MLC a nivel de estrato (área forestal o área de conservación)/SMIC

CAPÍTULO VI. COMPONENTES SUBTERRÁNEOS

En este documento se consideran como componentes subterráneos al mantillo, suelo y las raíces, mientras que el IPCC (2006) las clasifica ligeramente diferente comparado con este trabajo (Cuadro 8). Además, en este capítulo se describe el procedimiento de muestreo y análisis del mantillo, suelo y raíces.

Cuadro 8. Clasificación propuesta por el IPCC (2006) para estimar el carbono en componentes subterráneos

	Viva	Muerta
Área	Biomasa (Tallos, ramas, hojas de vegetación leñosa y no leñosa)	Madera y hojarasca (mantillo): partículas de 2 a 5 mm.
Subterránea	Biomasa (raíces finas y gruesas, fauna)	Carbono del suelo (inorgánico e inorgánico, y el carbón vegetal)

El sistema suelo-vegetación son elementos claves en el incremento o reducción de las emisiones y concentraciones de CO₂ debido a la velocidad de almacenamiento y procesos de degradación de tallos, ramas, ramillas, mantillo, entre otros materiales orgánicos. (Acosta-Mireles *et al.* 2009). Estos componentes son un indicador clave de la calidad del sistema suelo-vegetación para evaluar la productividad y funcionamiento del ecosistema, son determinantes en las actividades biológicas por microorganismos, y además mejoran la dinámica y biodisponibilidad de nutrimentos para las plantas (FAO 2001, IPCC 2006, Julca-Otiniano *et al.* 2006, Martínez *et al.* 2008).

El mantillo, es uno de los componentes claves para conocer el funcionamiento y productividad del bosque. Este componente representa un reservorio importante de carbono en el suelo (Vogt *et al.* 1987, Pérez-Suárez *et al.* 2014) por su papel en la transferencia de

materia y energía de los componentes aéreos al suelo (Olson 1963, Vitousek 1982, Coleman *et al.* 2004).

La acumulación del mantillo sobre el suelo depende de las tasas de producción de cada sitio y de las tasas de mineralización o descomposición, la cual es regulado en gran medida por el clima y el tipo de sustrato (Arnaldos *et al.* 2004, Aguilar-Arias *et al.* 2012)

El mantillo comprende generalmente residuos orgánicos como hojas, ramas, frutos, corteza, material leñoso con diámetro <10 cm en diferentes estados de descomposición que se encuentran acumulados sobre el suelo mineral u orgánico, e incluye las capas de detritus, fúmica y húmica (Caldato *et al.* 2010, Aguilar-Arias *et al.* 2012).

La materia orgánica del suelo es un componente subterráneo clave para entender su papel en el aumento o en la reducción de las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera (Dixon *et al.* 1994, Houghton 2001, FAO 2001, Zinn *et al.* 2005, Pan *et al.* 2011).

Siguiendo los lineamientos del IPCC (2006), se considera como carbono en la materia orgánica del suelo todo aquel carbono presente en los suelos minerales incluyendo raíces finas vivas y muertas que no se pueden distinguir de manera empírica de la parte mineral

Se estima que el suelo puede almacenar aproximadamente 69.8 % del carbono orgánico de la biosfera, con un valor cercano a 1,500 Pg (1 Pg=10¹⁵ g) a 1 m de profundidad (Schlesinger 1990, Gifford 1994, Kern 1994, Swift 2001). El suelo puede actuar como fuente o reservorio de carbono, dependiendo del uso y manejo, el clima, la textura y la topografía, (Lal 1997, Zinn *et al.* 2005).

Las raíces son los componentes subterráneos más importantes en el ecosistema vegetal, debido a que desempeñan múltiples funciones. Por ejemplo, contribuyen al crecimiento, desarrollo, y soporte de las plantas por su funcionalidad en la absorción de agua y nutrientes, además es la vía para la transferencia de carbono hacia el suelo (Nadelhoffer y Raich 1992, Vogt *et al.* 1996, Gill y Jackson 2000, Návar-Cháidez y Jurado-Ybarra 2009, Gutiérrez-Soto 2014). También, desempeñan funciones particulares de acuerdo a su tamaño y características morfológicas, características que varían según la especie y las condiciones del sitio (Nadelhoffer y Raich 1992).

Las raíces se clasifican por lo general en raíces finas que oscilan de < 2 mm a ≤ 5 mm de diámetro y raíces gruesas de > 5 a ≤ 10 mm de grosor (Nadelhoffer y Raich 1992, Álvarez-Sánchez y Naranjo-García 2003, Pavón 2005).

Las raíces finas son las más estudiadas por su alta dinámica de cambio, tanto en su crecimiento y mortalidad. Cumplen funciones como la absorción de agua, son almacenes y fuentes importantes de nutrientes, controlan la tasa del proceso de fotosíntesis e influyen fuertemente en la respiración autótrofa (MacDiken 1997, Guerra *et al.* 2005, Pavón 2005, Ramírez y Moreno 2008, Wang *et al.* 2012).

Las raíces finas, representan entre el 10 y 60 % de la productividad primaria neta, según el ecosistema, por lo que representan un almacén de carbono importante (McClaugherty *et al.* 1982, Dixon *et al.* 1994, Pregitzer *et al.* 1995, Vogt *et al.* 1996, Gower *et al.* 1997, Chen *et al.* 2002).

A pesar de la importancia que juega la biomasa radical en el funcionamiento de los ecosistemas, se carece de información detallada sobre ésta (Dixon *et al.* 1994, Vogt *et al.* 1996, Vogt *et al.* 1998) y de los otros componentes subterráneos. Entre las razones, es dificultad del muestreo que implica, los costos y el tiempo asociado. Considerando las implicaciones que resulta la evaluación de la biomasa subterránea, en el SMIC-Quintana Roo se desarrolló una metodología de muestre para evaluar en conjunto los componentes mantillo, suelo y raíces.

A. Diseño de muestreo en campo

Con el objetivo de estimar la cantidad de carbono presente en los tres componentes subterráneos (mantillo, materia orgánica del suelo y raíces), se realizó un diseño de muestreo sistemático de puntos de 30×30 cm² ubicados a 5.64 m a partir del centro de las parcelas de 400 m² con rumbo noroeste a 315° en cada conglomerado (Figura 22).

Los puntos de muestreo se ubicaron de manera estratégica para evitar la alteración o modificación de los ensayos previamente fueron establecidos para evaluar la descomposición de hojarasca y ramas.

El diseño de muestreo para el mantillo, materia orgánica y raíces permitió abarcar todos los conglomerados y espacialmente toda la superficie que corresponde al SMIC y con base a ello, obtener información cuantitativa que permita asociar la variabilidad de los componentes

anteriores y las existencias del carbono dentro del SMIC-FCP. De manera particular, las raíces se separaron en dos clases diamétricas, <0.5 cm y ≥ 0.5 cm, con el fin de proveer de información al modelo CBM-CFS3. Si bien, en los puntos de muestreo se consideraron todas las raíces que se encontraron, pero es importante resaltar que el tamaño de las unidades de muestreo fue pequeño para cuantificar las raíces gruesas.

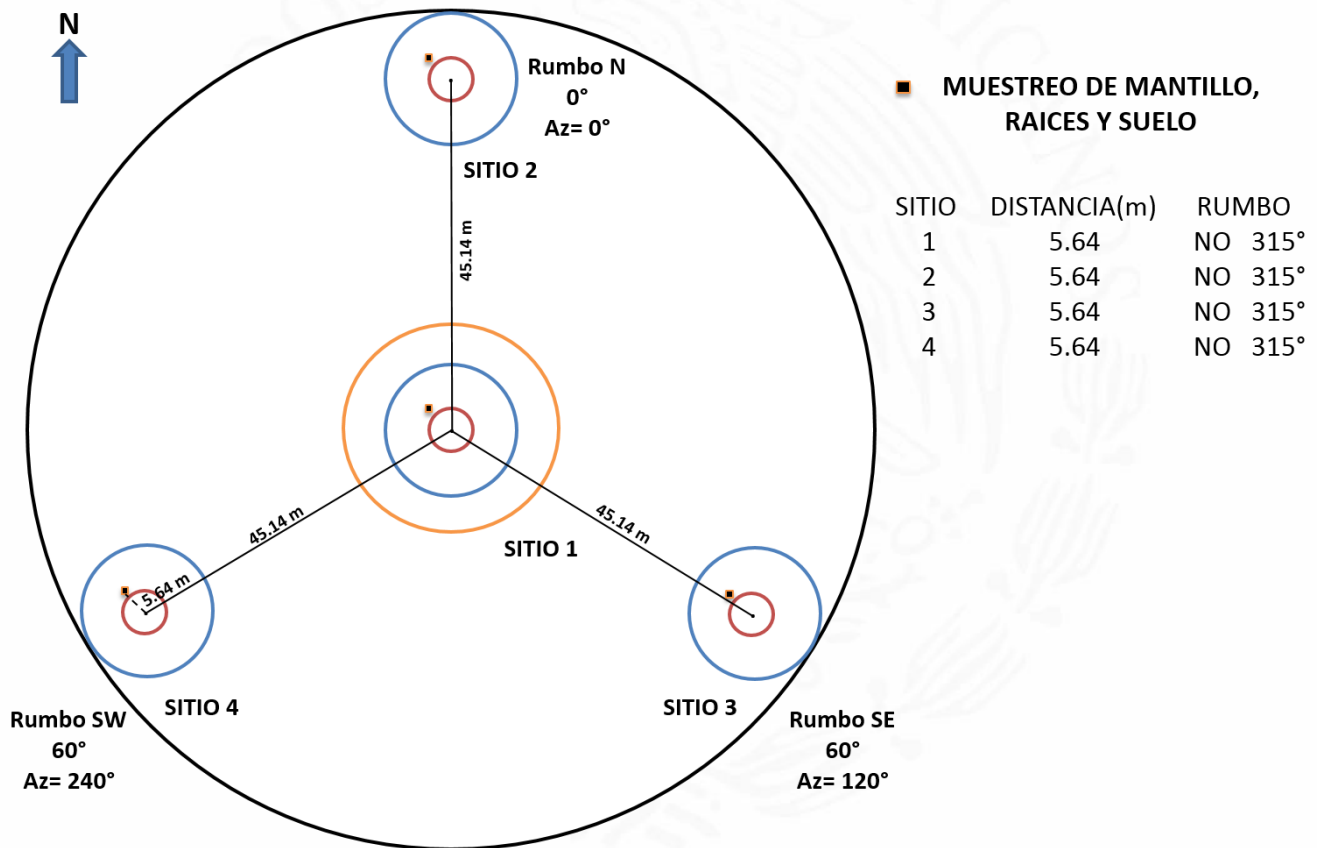


Figura 222. Ubicación de los puntos de muestreo para los componentes subterráneos: mantillo, suelo y raíces

Durante el trabajo de campo se colectó y registro información de mantillo en sus tres capas tal como lo clasifica Burton y Pregitzer (2008). El muestro de la materia orgánica del suelo consistió en coleccionar y registrar información de suelo en diferentes profundidades en los mismos puntos en donde se realizó la toma de datos de mantillo. Durante la extracción del suelo, se logró separar otros componentes subterráneos con la ayuda de un matiz de 12,7 mm de abertura. Entre los que destaca raíces finas y gruesas, mismas que utilizaron para

determinar su aporte como biomasa subterránea. Los componentes anteriores, se registraron su peso fresco y fueron clasificados para evitar traslape de información.

En laboratorio se obtuvo el peso seco constante de todos los componentes. En las muestras de suelo se separó nuevamente raíces finas que en campo no se logró separar. El mantillo y las raíces se trituraron y se molieron con equipos de uso casero. Posteriormente, se tomaron muestras de una determinada cantidad de suelo y de la molienda de mantillo y raíces para determinar el contenido de carbono mediante el método de combustión seca con un analizador de carbono orgánico total (TOC Shimadzu 5050 ATM) (Schimadzu Co. 1997). En los siguientes párrafos se describen con mayor detalle los procedimientos de muestreo en campo y el procesamiento en laboratorio de los componentes subterráneos.

Mantillo

En los puntos de muestreo (Figura 23) se colocó un marco cuadrado de PVC (1" de grosor), de 30 x 30 cm (sup. 90 cm²), el cual se fijó con pequeñas estacas de madera. El centro del marco se colocó a 5.64 m del centro de la parcela de 80 m². Pevio a la colecta del mantillo, se midió la profundidad de este componente, para lo cual, el área del marco se dividió en cuatro cuadrantes, y al centro de cada uno de ellos se midió la profundidad de la capa con un flexómetro (Figura 23). El propósito de estas mediciones fue registrar la variación de la profundidad del mantillo.

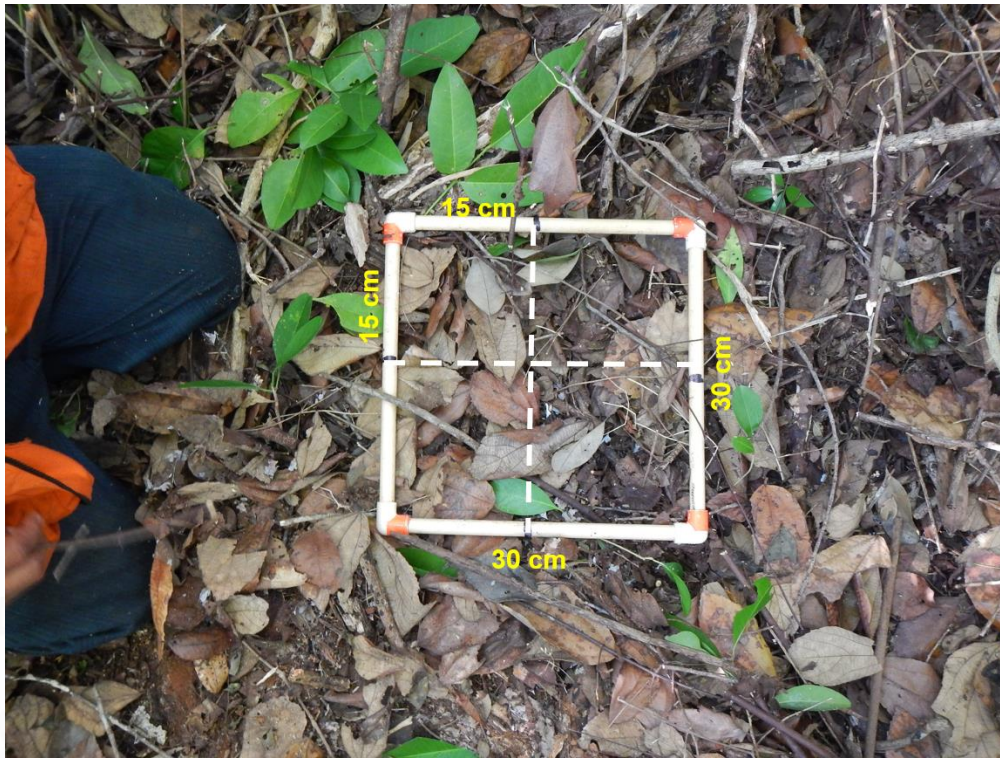


Figura 23. Medición de la profundidad del mantillo en los 4 cuadrantes del área de 30 x 30 cm

Posteriormente, en la superficie de 90 cm², se colectó todo el material que estaba dentro del área del marco; esto se hizo cortando con un cuchillo el perímetro del cuadro para separar el material que estaba afuera del área de muestreo.

En algunos sitios se pueden identificar más de una capa orgánica del suelo, lo cual depende de los factores climáticos, topografía, composición de especies, entre otros. De acuerdo con Burton y Pregitzer (2008), se pueden identificar tres capas:

- Capa L (horizonte Oi), compuesta por material orgánico poco descompuesto, en esta capa se identifica claramente los componentes vegetales.
- Capa F (horizonte Oe), mantillo parcialmente descompuesto con estructuras vegetales que aún pueden reconocerse.
- Capa H (horizonte Oa), materia orgánica en estado de descomposición muy avanzado, y la identificación del origen de dicho material resulta imposible.

La información sobre el contenido de carbono en el mantillo no es un dato común, ya que normalmente el enfoque de las investigaciones ha estado relacionado con el contenido de

nutrimentos, y no siempre se tienen datos de la superficie muestreada y el peso seco del material. Estos dos datos junto con las concentraciones de carbono del mantillo son los que se requieren para las estimaciones del contenido de carbono en el mantillo.

En el SMIC-Quintana Roo sólo se identificó y colectó material de la capa L y H. Las muestras se depositaron en bolsas de plástico debidamente etiquetadas con información sobre el número de conglomerado, número de sitio, profundidad de la capa orgánica, tipo de capa orgánica (ho si es hojarasca, capa l y f si es capa de fermentación y h como materia orgánica con alto grado de descomposición) y fecha de colecta (Figura 24). Durante el muestreo, también se separaron las ramas pequeñas <0.5 cm del resto del material. Una vez concluida la colecta de las muestras, fueron trasladadas al laboratorio para su secado y procesamiento.



Figura 24. Colecta y embolsado de las capas orgánicas de mantillo

En laboratorio, las muestras correspondientes a las capas orgánicas se registró el peso húmedo con una balanza digital Radwag® wlc10/A2. Posteriormente, cada muestra se separó en dos componente; hojas y ramitas con diámetro <0.5 cm. Cada componente se depositó en bolsas de papel con información del número de conglomerado, número de sitio, tipo de capa orgánica y fecha de colecta (e.g. SMIC-QROO, cgl4, s1, ho, 10-05-2014). Inmediatamente, las hojas se colocaron en una estufa de circulación forzada eléctrica BINDER® GmbIt a 70 °C de temperatura durante 24 horas. El tiempo de secado para las muestras de mantillo, se

estimó previamente con un ensayo de material vegetal colectado dentro de la superficie de los conglomerados. En la época de lluvias, el material se secó primero a temperatura ambiente, y después se colocó en la estufa durante 24 horas.

Después del secado se registró el peso seco. Posteriormente, con las muestras secas se prepararon muestras compuestas a nivel de conglomerado y por tipo de capa. Las muestras compuestas se molieron y fueron depositadas en bolsas de plástico estrictamente rotuladas. Finalmente se tomaron muestras de 10 g por conglomerado y se enviaron al Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental del Colegio de Postgraduados “Campus Montecillo” del Estado de México para determinar la concentración de carbono mediante el método de combustión seca con un analizador de carbono orgánico total (TOC Shimadzu 5050 ATM) (Schimadzu Co. 1997).

Materia orgánica del suelo

Una vez tomadas las muestras de mantillo, se limpió cuidadosamente la superficie del área de 30 x 30 cm y se aseguró el marco de PVC, para evitar que se moviera al momento de tomar las muestras de suelo.

La colecta de muestras de suelo se estableció a diferentes profundidades de acuerdo al número de las parcelas 80 m² por sitio (1, 2, 3 y 4). En el sitio 1 de cada conglomerado, se tomaron muestras a profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 y de 30 a 50 cm. Mientras que en los sitios 2, 3 y 4 se tomó solo una capa, de 0 a 30 cm de profundidad. Este muestreo complementario se realizó para poder tener una representación espacial (con el muestreo de 0-30 cm en las 4 parcelas de 40 m²), pero también para obtener información de la distribución vertical del carbono en el suelo (sitio 1).

De acuerdo a los sitios (1,2, 3 o 4) se colectaron las muestras por cada profundidad. Las profundidades del suelo, se realizaron con la ayuda de palas, cucharas, barretas y tijeras. El material que se extrajo se separó en sus diferentes componentes (raíces, piedras y otros componentes orgánicos e inorgánicos) con un tamiz de 12.7 mm de abertura (Figura 25). Este se hizo sobre una lona o bolsa gruesa de plástico para evitar la pérdida de material. Seguidamente, cada componente se registró su peso total en húmedo utilizando básculas

romanas de 12, 25 y 50 kg de capacidad. Las muestras pequeñas se llevaron al laboratorio para obtener el peso en una balanza con mayor precisión.



Figura 25. Representación del proceso para la toma de muestra del suelo

Después de extraer todo el material de cada profundidad, se estimó el volumen del hueco (Figura 26). Para ello, se utilizó perlita, bolsas de plástico y recipientes de 1 y 0.5 litro de capacidad. El procedimiento consistió en colocar una bolsa hasta cubrir por completo el hueco, se depositó perlita hasta llenar el hueco a la profundidad correspondiente. Finalmente, con la cantidad recipientes utilizados con perlita, se calculó el volumen total del hueco. El procedimiento se repitió para cada profundidad, teniendo cuidado de marcar el sitio a partir del cual se había medido la profundidad anterior. Esta información se requirió para determinar la densidad aparente del suelo.



Figura 26. Determinación del volumen del hueco con perlita

Todo el suelo extraído y libre de los otros componentes separados, se mezcló cuidadosamente para homogeneizarlo. Seguidamente, se tomó una submuestra de aproximadamente 2.5 kg (Figura 27) y se registró su peso en húmedo. En laboratorio, la submuestra se utilizó para hacer el ajuste por humedad. El material se colocó en bolsas de plásticos con la información que permitiera identificar su procedencia (SMIC, cgl, capa y fecha de colecta). Cuando la cantidad de suelo era menor a 2.5 kg, se llevó al laboratorio todo el material. Los componentes raíz, carbón, piedras y otros materiales, se enviaron en su totalidad al laboratorio.



Figura 27. Muestras de suelo tomadas a diferente profundidad, en un punto de muestreo Posterior a la extracción del suelo, en cada profundidad (0-10, 10-20, 20-30, 30 a 50 y de 0-30) se tomó la profundidad real (Figura 28) a la cual se cavó, esto para representar con mayor precisión la profundidad real del muestreo, ya que en muchos casos no se alcanzó la profundidad establecida, debido a los afloramientos de rocas que caracterizan el suelo de la Península de Yucatán.



Figura 28. Registro de la profundidad máxima en cada punto de muestreo

Para ello se dividió el área en 4 cuadrantes y se tomó la profundidad del hueco al centro de cada cuadrante. Después de haber tomado las muestras correspondientes a cada punto de muestreo, se registró la profundidad máxima, introduciendo una varilla de fierro en forma de “T”, de 1 m de largo y ½” de grosor en el centro del área de muestreo (Figura 29). La información, sirvió para saber cuánto más de suelo había en ese punto.

De las muestras de suelo enviadas al laboratorio (al menos 2.5 kg) se utilizaron de 20 a 30 g para determinar el porcentaje de humedad, las muestras se colocaron en bolsas de papel y se secaron a temperatura ambiente (aproximadamente por una semana). Después se colocaron en recipientes de vidrio identificados con la información de su procedencia, inmediatamente se colocaron la estufa de circulación forzada a una temperatura de 105°C, por 24 horas (hasta peso constante). Una vez concluido el tiempo de secado se registró el peso seco de cada muestra. Para calcular el porcentaje de humedad (% H) se aplicó la siguiente formula (Walker 2010):

$$\% H = \frac{\text{peso humedo} - \text{peso seco}}{\text{peso humedo}} (100)$$

Con este dato se hizo el ajuste de peso seco a la cantidad total de suelo libre de otros componentes que se obtuvo en el campo.

Por ejemplo, si se obtuvo un peso fresco de suelo en campo de 5 kg y la muestra tiene 32% de humedad, al hacer la corrección de peso por la humedad, se tiene un peso seco total de suelo de 3.4 kg.

Después de extraer la muestra para humedad, se procedió a secar el suelo restante a temperatura ambiente por cinco días. Durante este tiempo, fue necesario remover el suelo y se desbarataban los agregados con el fin de facilitar el secado. Una vez secada la muestra, se procedió a separar el suelo utilizando un tamiz de malla número 10 (abertura de 2 mm). Se separaron las raíces finas y otros componentes como piedras, conchas, carbón, y otros componentes (Figura 29) que luego fueron secados y pesados para ajustar el peso original de la muestra.



Figura 29. Separación de la submuestra de suelo en componentes, suelo mineral, raíces gruesas y finas

Una vez concluido el proceso de separación de los componentes, se tomaron aproximadamente 250 gramos de suelo para determinar el pH, textura y carbono. Las muestras fueron debidamente clasificadas y etiquetadas con la siguiente información: SMIC, conglomerado, sitio, tipo de material, capa, peso y fecha (ejemplo, SMIC-QROO, cgl1, s1, 0-10 cm, 250 g, 03-03-2015).

Biomasa subterránea: raíces

La extracción y separación de raíces se realizó conforme se extraía el suelo, por lo que las profundidades de muestreo también representan las profundidades del suelo. Por ejemplo, en los sitios 1 de cada conglomerado las muestras se tomaron a cuatro profundidades (i.e. 0-10, 10-20, 20-30 y de 30 a 50 cm), mientras que en los sitios 2, 3 y 4 fue de 0-30 cm. Las raíces gruesas se separaron del suelo mineral usando un tamiz de 12.7 mm de abertura; las raíces finas que pasaron a través del tamiz fueron separadas de la submuestra de suelo que se llevó al laboratorio.

En el laboratorio, las submuestras de suelo se secaron, posteriormente se tamizó con mucha precaución utilizando un tamiz de 2 mm de abertura. Las raíces que no fue posible separarlo con el tamiz, se limpiaron con agua para eliminar otros residuos y después se escurrieron para eliminar el exceso de agua. Finalmente, las raíces se separaron en dos clases, las <0.5 cm y ≥ 0.5 cm; se colocaron en bolsas de papel debidamente etiquetadas y se secaron a 70°C durante 24 horas para obtener el peso seco.

Aquellas raíces gruesas que fueron separadas en el campo, se enjuagaron con agua, luego se eliminó el exceso de agua a temperatura ambiente (aproximadamente tres días). Para obtener su peso seco constante, se colocaron en la estufa a 70°C durante 24 horas. De igual manera, las raíces finas se separaron por diámetro (i.e. <0.5 cm y ≥ 0.5 cm) y se siguió el mismo procedimiento anterior hasta obtener su peso seco.

Después de haber registrado el peso seco de las muestras, se agruparon a nivel de conglomerado y se molieron en una licuadora industrial. Las raíces gruesas se trituraron previamente con la ayuda de tijeras industriales, para facilitar la molienda con la licuadora. Se tomó una submuestra de las raíces molidas, de aproximadamente 10 g para la determinación de la concentración de carbono (método de combustión seca).

B. Estimación del carbono en los componentes subterráneos

Mantillo

La información recabada en los formatos de campo y laboratorio se capturó en hojas de cálculo Excel; en este formato se hizo la revisión de los datos para identificar incongruencias o datos atípicos. Una vez cotejada la información, los datos se transfirieron en bases de datos Access para su análisis estadístico y consulta.

La revisión consistió en comprobar que los datos de peso total o fresco fueran mayores a los de las submuestras o pesos secos y que los datos de volumen no fueran mayor al volumen "ideal" del hueco. Verificar que las unidades fueran las correctas y todos los datos de una variable estuvieran en las mismas unidades. Los datos de peso de suelo y peso de las piedras fueran de acuerdo al tamaño del hueco (comparando con los datos máximos y mínimos), y que la profundidad no fuera mayor a la establecida. Cuando se identificaron

algunos datos “extraños”, se cotejaron con los formatos de campo y se corrigieron. Con esta misma lógica se revisaron los datos de mantillo, suelo y raíces.

Para todos los componentes subterráneos se calculó el contenido de carbono a nivel de registro (componente) relacionado al área de muestreo que en este caso fue de 0.09 m².

Mantillo. El contenido de carbono en el mantillo se calculó multiplicando el peso seco total del material colectado en el área de muestreo por la concentración de carbono. Por ejemplo, si se tuvo un peso seco total de 59 g y la concentración de carbono fue de 34%, la muestra de mantillo tiene un total de 20.06 g C en 0.09 m² (59*34*0.01).

Materia orgánica del suelo

El contenido de carbono en el suelo, a nivel de registro, se calculó de manera directa, multiplicando el peso seco total del suelo mineral (habiéndole hecho el ajuste por humedad y restado las piedras pequeñas, raíces y conchas que tenía en suelo) por la concentración de carbono en el suelo. Cabe mencionar que hay otra manera de calcular el contenido de carbono y este es usando el dato de densidad aparente (*DA*): peso seco del suelo/volumen del hueco. Para ello se multiplica de *DA* (gcm^{-3}) por la concentración de carbono (%) y por la profundidad del muestreo (cm); en algunos casos también se multiplica por el contenido de piedras, pero en el ejercicio que se realizó en el SMIC-Quintana Roo no fue necesario, ya que en el dato de *DA* se considera el suelo ya sin considerar las piedras.

Raíces

Para calcular el contenido de carbono en las raíces, por registro, se procedió de la misma forma que en el caso del mantillo, multiplicando el peso de la muestra por la concentración de carbono. Debido a que los componentes subterráneos fueron muestreados en un área de referencia (0.09 m²), la estimación a nivel de paisaje o SMIC se realizó con el enfoque de estimadores de razón (ver sección de biomasa aérea).

En la estimación del carbono en el suelo, se consideraron como “cero” aquellos puntos de muestreo en los cuales había capas de piedra, roca, etc. Los afloramientos de roca caliza, es característico en los suelos de la península de Yucatán. Esto se observó en determinadas superficies dentro del SMIC.

CAPÍTULO VII. FLUJOS DEL CARBONO FORESTAL

El flujo de carbono originado a partir de los cambios y procesos de desintegración de los componentes orgánicos del bosque es importante en el ciclo global de carbono por varias razones. Primero, la evaluación de componentes como las hojas, ramas, ramillas, frutos corteza, y otros materiales orgánicos permiten determinar si los bosques funcionan como reservorio o fuente de carbono (Goya *et al.* 2003, Houghton 2010). Con base a lo anterior se puede conocer las anuales de productividad del bosque, la dinámica de cambio del carbono, reducir los niveles de incertidumbres asociadas a las estimaciones de cambios en el contenido del carbono y de esta manera diseñar estrategias que faciliten la mitigación del incremento de los gases de efecto invernadero a través del manejo sustentable de los bosques (Smith *et al.* 2000, IPCC 2006, Houghton 2010).

El IPCC (2006) establece en sus lineamientos caracterizar y evaluar los flujos de carbono a través de la biomasa aérea y subterránea, mantillo, MLC sobre el suelo y materia orgánica del suelo. Lo anterior, en el presente documento se evalúa los flujos de carbono a partir de la caída de hojarasca y por descomposición de hojas y material leñoso. Por lo cual, se describen previamente la importancia de los tres componentes anteriores en la dinámica del carbono en bosques naturales.

La hojarasca son todos los residuos orgánicos de la parte aérea de las plantas (i.e. hojas, ramas < 2 cm de grosor, frutos, semillas, inflorescencias y misceláneos) que caen al piso forestal (Proctor *et al.* 1983, González *et al.* 2008). La caída de hojarasca, es utilizada como una medida para determinar la productividad primaria neta (PPN), cuando una comunidad vegetal se encuentra en un estado dinámico estable (Prause *et al.* 2003, Gartner y Cardon 2004, Vargas-Parra y Varela 2007) y es un indicador de la cantidad de transferencia de carbono al suelo (Granados y Corner 2004, Gutiérrez *et al.* 2012).

Este proceso de transferencia de carbono al suelo está relacionado con la fenología de la vegetación, y está regulado por factores biológicos, climáticos, topografía, calidad de sitio, composición de especies, densidad y edad de abandono del bosque (Hernández *et al.* 1992). La transferencia de materia y energía entre los diferentes componentes del bosque es esencial para su mantenimiento y la descomposición de la materia orgánica es uno de los

procesos que permite esta transferencia (Aber y Melillo 1991). La descomposición de la hojarasca ofrece muchos beneficios que contribuyen al buen funcionamiento del ecosistema, como la regulación del ciclo de nutrientes como el carbono y la fertilidad edáfica (Del Valle-Arango 2003, Xu *et al.* 2004, Anderson 2005, Prescott 2005, Wang *et al.* 2008).

A pesar de la importancia ecológica y económica que representan los bosques tropicales, no existen muchos estudios sobre la tasa descomposición de hojarasca para entender los procesos dinámicos de la transferencia de carbono al suelo y otros nutrimentos esenciales para el mantenimiento de las plantas. Lo cual limita entender los flujos de carbono entre el sistema vegetal-suelo.

La caída y presencia de ramas y otros componentes orgánicos provenientes de los árboles sobre el piso forestal es importancia como hábitat de diversas especies de fauna, protección para la supervivencia de plántulas y como reservorio de nutrientes y carbono a mediano y largo plazo (Abbott *et al.* 1982).

En particular, la descomposición de ramas vivas es influenciada en gran medida por factores climáticos (temperatura y humedad), por las propiedades del suelo (dureza, textura, entre otros), la variedad y cantidad de organismos descomponedores, así como la calidad del material vegetal (Swift *et al.* 1979, Lavelle *et al.* 1993, Coûteaux *et al.* 1995, Aerts 1997, Hättenschwiler *et al.* 2005, Tuomi *et al.* 2009). Es también influenciada por la incidencia directa de los rayos ultravioletas del sol al piso forestal, la posición de las ramas sobre la hojarasca, su tamaño y dureza (Khalid y Anderson 2000, Khalid y Zakaria 2000, Lim y Zaharah 2000).

La evaluación de la tasa de descomposición de materiales orgánicos como las ramas en especies forestales tropicales, es escasa. La falta de información limita el diseño de estrategias y prácticas silvícolas para el uso sostenible y conservación de los bosques tropicales (Goya *et al.* 2003). Al considerar la importancia de la descomposición de las ramas y su papel en el flujo del carbono, así como de otros componentes orgánicos del bosque, en este apartado se describe una propuesta metodológica para la evaluación de la tasa de descomposición de ramas vivas, material foliar y la producción de hojarasca en el SMIC-Quintana Roo.

Producción de hojarasca

A. Diseño de muestreo

La metodología utilizada para la cuantificación de la producción de hojarasca se basó en colocar trampas de hojarasca, las cuales fueron muestreadas mensualmente; este es una metodología común para estimar la productividad primaria neta (Vitousek *et al.* 1994, Berg y Laskowski 2005, González *et al.* 2008, Quinto *et al.* 2009, Rocha-Loredo *et al.* 2009).

El número de trampas por conglomerado se determinó a partir de datos históricos del SMIC-Yucatán, el cual se encuentra en un área conservada de selva mediana caducifolia. Los datos del tamaño del número de trampas (n) para el SMIC-Quintana Roo permitieron encontrar un balance entre “n” óptimo y los costos para el trabajo de campo.

Para elaborar las trampas de hojarasca se utilizaron los siguientes materiales: poliducto de 3/4” de grosor (resistente y flexible), conectores de PVC de 3/4” de grosor (para unir el poliducto), varillas de acero de 1/2” de 1.20 m de largo para la base de las trampas, y tela de malla fina con orificios de 1.0 mm para evitar la pérdida del material fino, la entrada de folíolos de hierbas y herbáceas, y facilitar la salida del agua de lluvia (Ramírez-Correa *et al.* 2007). El área de las trampas fue de 1 m², colocadas a 1.0 m sobre la superficie del suelo (Figura 30).



Figura 30. Ejemplo de diseño de una canasta para la colecta de hojarasca

Se usaron dos enfoques para el establecimiento de trampas de hojarasca: 1) en 16 conglomerados se colocaron 4 trampas por conglomerado, es decir 1 trampa por sitio (Figura 31) y 2) en los otros 16 conglomerados se establecieron 12 trampas por conglomerado, 3 trampas por sitio (Figura 32).

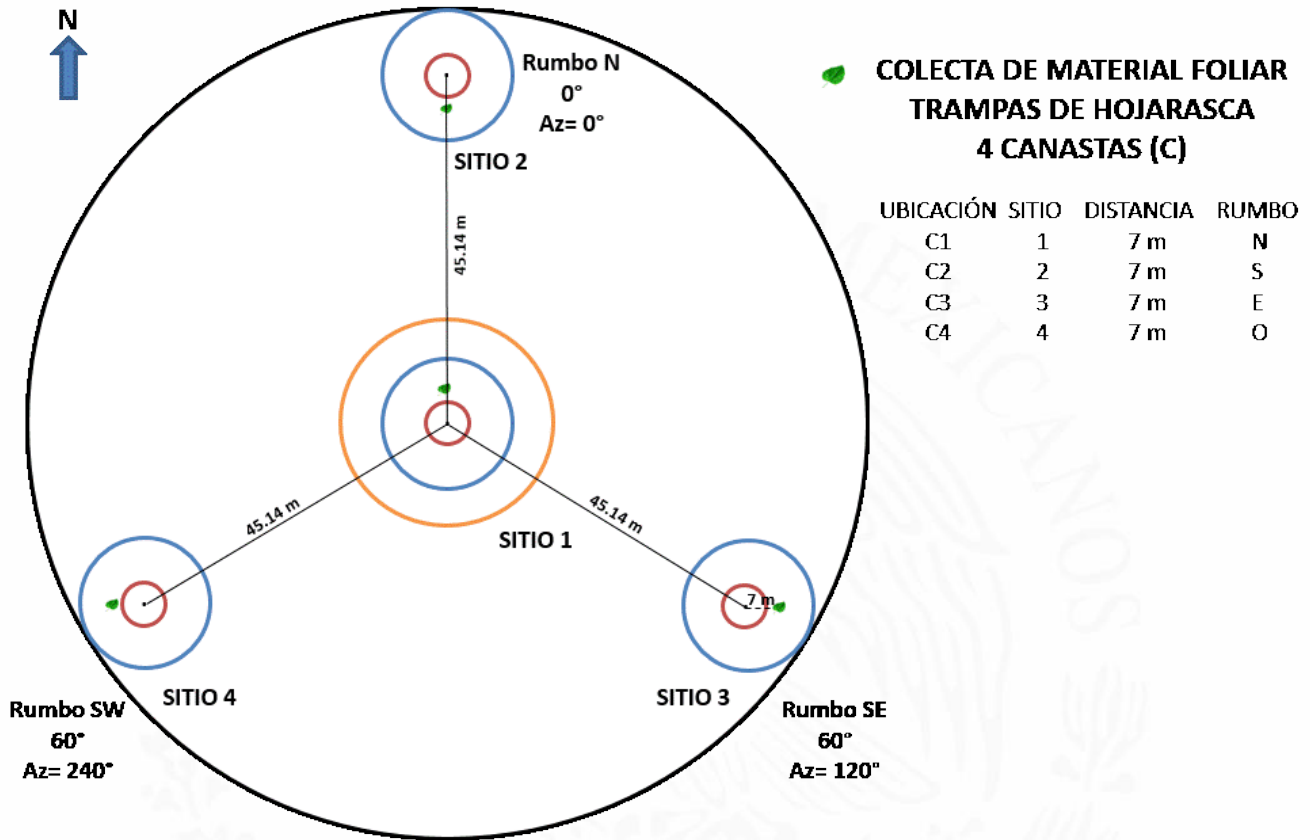


Figura 31. Distribución y ubicación trampas para la colecta de hojarasca con cuatro canastas

En los conglomerados con 4 trampas se siguieron los siguientes criterios para el establecimiento: a una distancia de 7 m partir del centro de cada parcela de 80 m² se colocó una canasta y la primera canasta se ubicó en dirección norte, el segundo en dirección sur, tercero hacia el este y el cuarto al oeste tal como se observa en la figura 31.

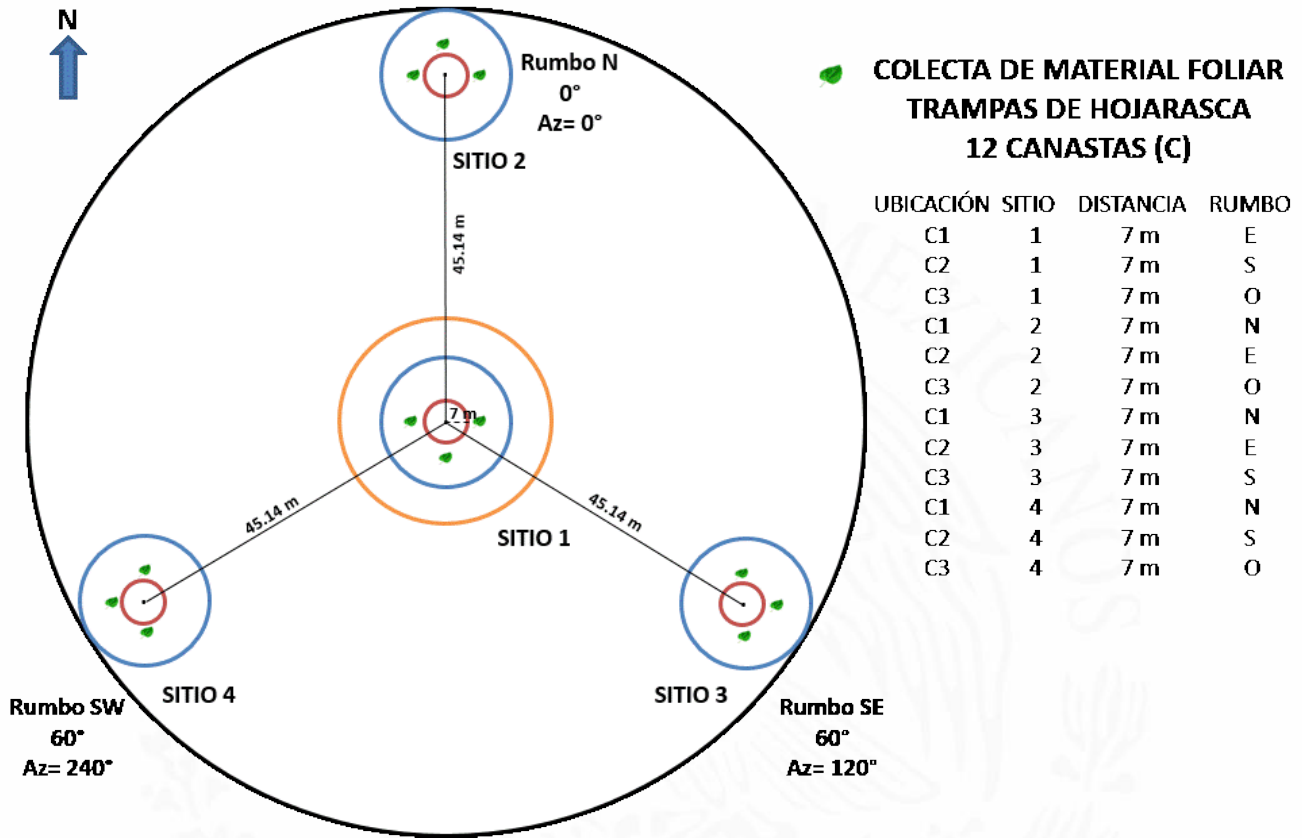


Figura 32. Distribución y ubicación trampas para la colecta de hojarasca con 12 canastas

La distribución de las trampas en los conglomerados con 12 canasta, consistió en colocar 3 trampas por parcela de 80 m² y la distribuyeron es la siguiente; en el sitio 1 las trampas se colocaron hacia el sur, este y oeste; en el sitio 2 hacia el este, norte y oeste; en el sitio 3 en el norte, este y sur; y finalmente las canasta del sitio 4 se ubicaron hacia el norte, sur, oeste (Figura 32).

En los 32 conglomerados se colocaron un total de 256 canastas. En el área de conservación ejidal se colocaron 148 y en el área forestal 108 canastas (Cuadro 9).

Cuadro 9. Número de trampas de hojarasca por conglomerado y por condición de manejo

No. conglomerado	Estrato	No. trampas	No. conglomerado	Estrato	No. trampas
1	Forestal	4	17	Conservación	4
2	Forestal	12	18	Conservación	12
3	Forestal	4	19	Forestal	4
4	Forestal	12	20	Forestal	12
5	Forestal	4	21	Conservación	4
6	Forestal	12	22	Conservación	12
7	Forestal	4	23	Conservación	4
8	Forestal	12	24	Conservación	12
9	Conservación	4	25	Conservación	4
10	Conservación	12	26	Conservación	12
11	Forestal	4	27	Conservación	12
12	Forestal	12	28	Conservación	4
13	Forestal	4	29	Conservación	12
14	Forestal	12	30	Conservación	4
15	Conservación	4	31	Conservación	12
16	Conservación	12	32	Conservación	4

Colecta de hojarasca

La colecta de hojarasca que incluye desde hojas, frutos, ramillas, corteza y misceláneos se realizó por conglomerado, agrupándolos en cuatro líneas de colecta. La línea número uno estuvo integrada por los conglomerados 1, 8, 9, 16, 17, 24, 25 y 31; los conglomerados 2, 7, 10, 15, 18, 23, 26 y 30 correspondieron a la línea dos, y la línea tres estuvo integrada por los conglomerados 3, 6, 11, 14, 19, 22 y 29; la línea cuatro fue representada por los conglomerados 4, 5, 12, 13, 20, 21, 27, 28 y 32. La colecta del material en las trampas se realizó mensualmente durante un año. La primera colecta se realizó durante el mes de marzo de 2014 y se concluyó el 16 de febrero de 2015.

El material correspondiente a cada trampa por colecta, se depositó en bolsas de plástico de 25 x 35 cm con capacidad de 1 kg (Figura 33). Las bolsas fueron debidamente etiquetadas

con la siguiente información: conglomerado, número de trampa, dirección de la trampa, número de sitio y fecha de colecta.

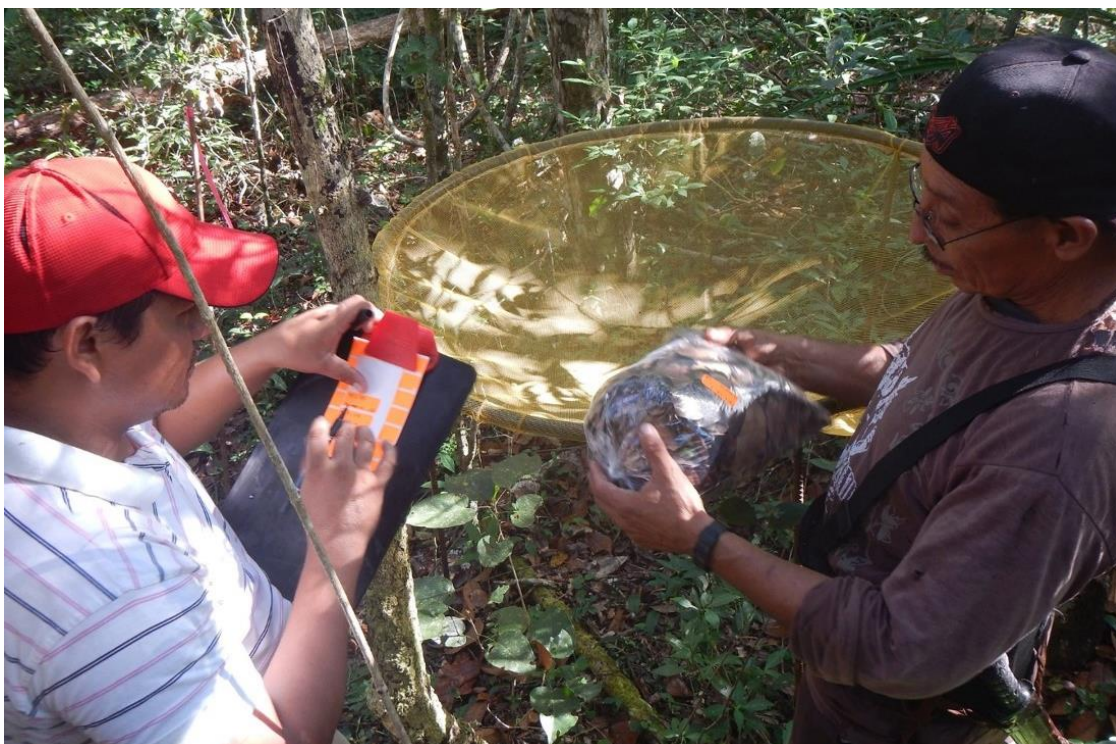


Figura 33. Etiquetado de las bolsas de hojarasca por trampa de hojarasca

Se realizó un control de las etiquetas de las bolsas en un formato de papel para evitar confusión o traslape de información. Es importante mencionar, que las ramas con diámetro >5 cm no fueron consideradas en las colectas.

El material colectado en las trampas de hojarasca se llevó al laboratorio para su procesamiento. De cada trampa se registró el peso fresco total, se secaron y posteriormente se separó en los siguientes componentes: hojas, flores, frutos, semillas, ramillas ≤ 0.5 cm de grosor, corteza y misceláneos (Figura 34).



Figura 34. Representación de los distintos pasos del procesamiento de la hojarasca en laboratorio. Cada componente se depositó en bolsas de papel y se puso a secar en la estufa de circulación forzada a 70 °C de temperatura, por 24 horas. Finalmente, se registró el peso seco de cada componente y se capturó en los formatos de laboratorio previamente elaborados.

B. Estimación del contenido de carbono vía hojarasca

Control de calidad de los datos

Previo a la estimación del carbono en la hojarasca, se realizó un control de la información de campo y laboratorio en la hoja de cálculo Excel y fue revisada para identificar inconsistencia en la información. Básicamente se revisaron los pesos por componente con relación a los pesos frescos totales, y cuando se identificaron datos “extraños”, se revisaron con los formatos de campo y las características de los sitios.

Al igual que las estimaciones de los reservorios de carbono, la producción de hojarasca se realizó referente a un área, por lo que nuevamente se utilizó el enfoque de estimadores de razón para dicha estimación.

En primer lugar se agrupó el peso seco total por parcela de 80 m², conglomerado y el mes de colecta (i.e. para el conglomerado 10, sitio 1, colecta 10; 10-1-10 = 92.8 g). Para lo cual, se obtuvieron las siguientes variables:

y_i = a la suma del peso seco por colecta y la parcela de 80 m² expresada en toneladas

a_i = a la suma de la superficie de las trampas por parcela de 80 m² expresada en hectáreas.

El siguiente paso fue obtener la suma del peso seco (y_i) y de la superficie (a_i) por colecta (del mes 1 al 12). Después se obtuvo el estimador de razón (suma de y_i entre la suma de a_i), por colecta. La incertidumbre de la densidad de carbono por mes se calculó de la siguiente manera:

$$U = \frac{1.96 * Sd(Eri)}{Eri * 100}$$

Donde:

U = Incertidumbre en porcentaje

$Sd(Eri)$ = Desviación estándar de la densidad de carbono (t ha⁻¹), por mes

Eri = Densidad de carbono de la producción de hojarasca por mes

La densidad de carbono anual para el SMIC, es la suma de los Eri mensuales. La incertidumbre del estimador de razón anual se calculó:

$$U_{anual} = \sqrt{(Eri1 * U1)^2 \dots (Eri(n) * U(n) / Eri^*)}$$

Donde

U_{anual} = Incertidumbre de la densidad de carbono anual

$Eri_{1..n}$ = Densidad de carbono en el mes n

$E_{1..n}$ = Incertidumbre para la densidad del mes n

Eri = Valor absoluto de la densidad de carbono en el mes n

Descomposición de la fracción foliar

A. Diseño de muestreo en campo

Método de bolsas de malla

Uno de los métodos más utilizados para evaluar la descomposición de la materia orgánica, es el de la bolsa de malla, que consiste en cuantificar la pérdida de peso del material en un periodo (Anderson e Ingram 1989). Este método fue el que se siguió para obtener la tasa de descomposición de las hojas y la transferencia de carbono al suelo con ensayos de descomposición de material foliar.

Se establecieron 16 ensayos distribuidos sistemáticamente en el SMIC, en donde se colocaron 8 ensayos tanto en el área de manejo forestal y en el de conservación ejidal (Figura 35).

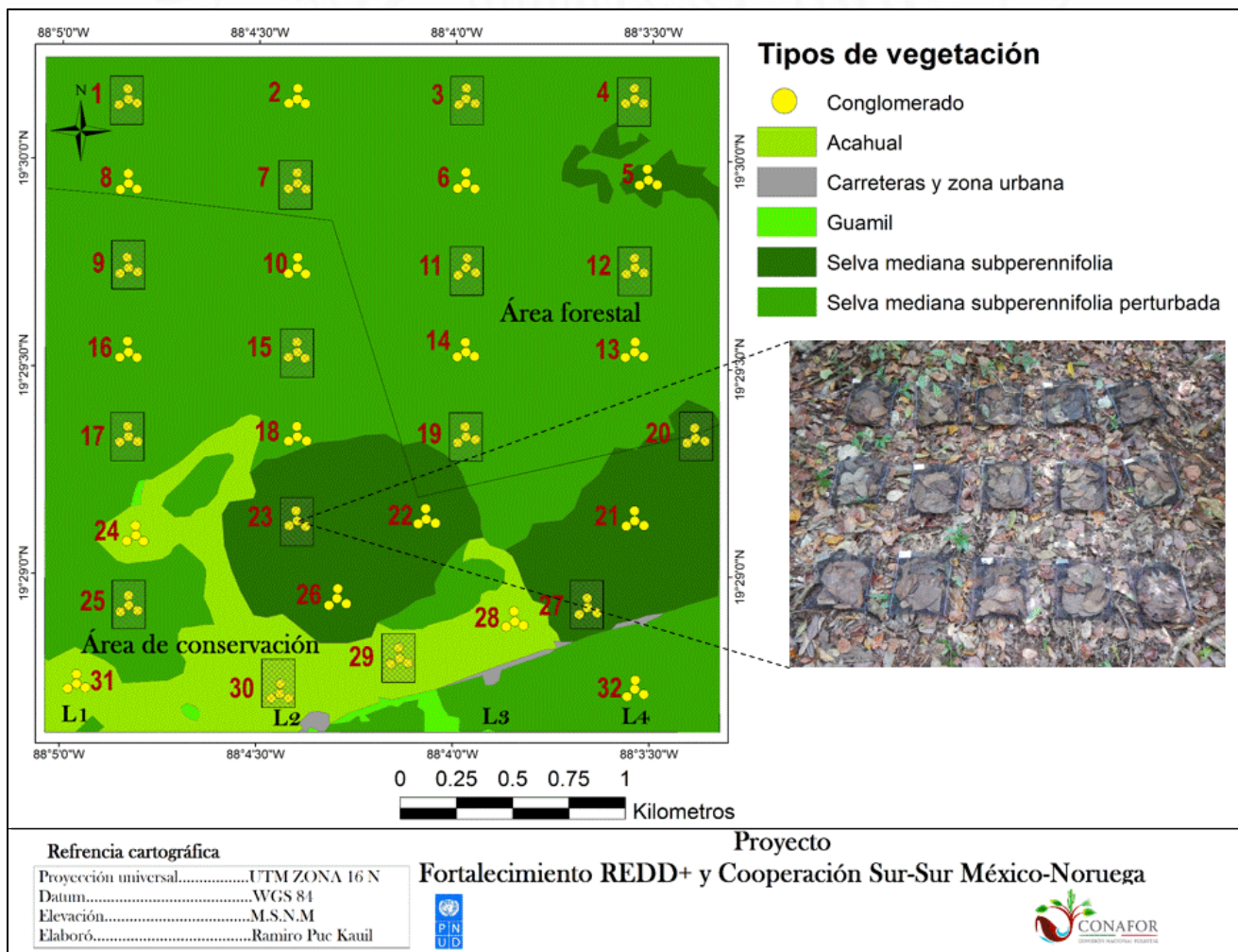


Figura 35. Distribución de los conglomerados en los cuales se colocaron los ensayos de descomposición foliar

El criterio de selección de los conglomerados tuvo que ver con la necesidad de caracterizar el proceso de descomposición de hojas a nivel de paisaje. Además, se combinaron los ensayos de descomposición de hojas con los demás procesos realizados en campo (biomasa aérea, suelo, producción de hojas) con el interés de entender los procesos de intercambio de carbono que se lleva al interior del bosque.

En cada conglomerado elegido para los ensayos se colectó 2 kg de hojas recién caídas, presentes en el piso forestal, dentro del área del conglomerado, pero fuera de las parcelas de 400 m² durante el mes de marzo de 2014. Este material fue puesto a secar a temperatura ambiente y a la sombra por aproximadamente 3 días. Posteriormente, las hojas se revolvieron para homogeneizar la muestra, y de ahí se tomaron conjuntos de 20 g para depositarlos en las bolsas previamente elaboradas con tela mosquitera de nylon de 20 x 20 cm y 3 mm de apertura de malla (Figura 36).

Cada bolsa fue identificada con una etiqueta de aluminio con la siguiente información: SMIC, número de conglomerado, lote y bolsa. Se elaboraron en total 45 bolsas para cada conglomerado.



Figura 36 Proceso de pesaje, llenado, etiquetado de bolsas y el proceso de descomposición foliar en campo

En cada conglomerado se colocaron tres lotes de bolsas, cada uno conformado por 15 bolsas (Figura 37). El primero se ubicó en dirección noreste y azimut 45° , el segundo en dirección sur y azimut 80° y el tercero en dirección noreste a 315° de azimut. El centro de cada lote se localizó a 20 m del centro del conglomerado.

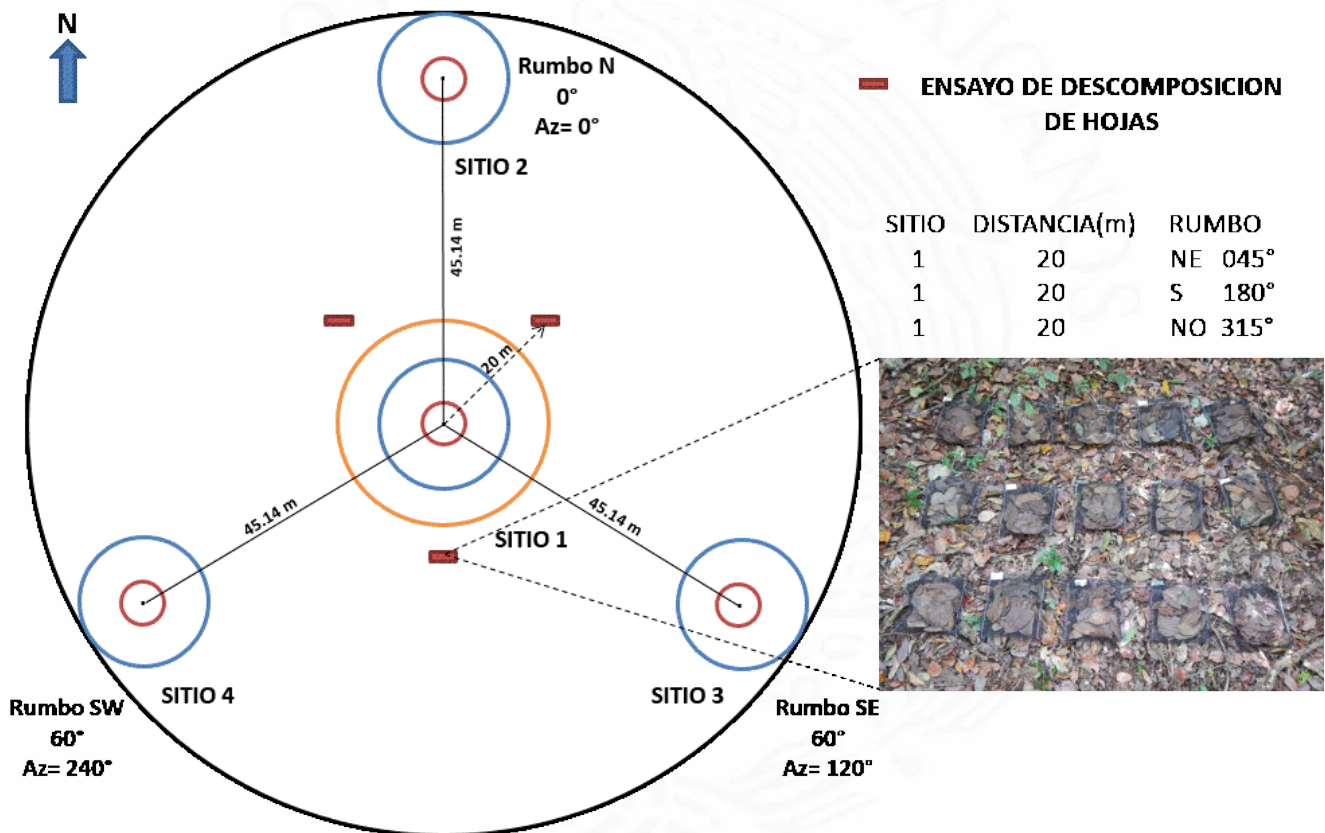


Figura 37. Ubicación de los ensayos de descomposición foliar

Las bolsas fueron colocadas en marzo de 2014 sobre el piso forestal y se procuró no perturbar la capa de hojarasca. Así mismo, el área en donde se colocaron las bolsas se delimitó con cuerdas de color visible para ubicarla fácilmente entre la vegetación del sotobosque.

La colecta de las bolsas se realizó mensualmente. Inició en el mes de abril de 2014 y concluyó en marzo de 2015. En cada lote, se eligió una bolsa de manera aleatoria.

Seguidamente, se colocaban en bolsas de plástico etiquetadas y se trasladaban al laboratorio para su procesamiento.

Durante la fase laboratorio cada bolsa fue sometida a limpieza para eliminar otros materiales orgánicos diferentes al material foliar bajo estudio. Posteriormente, se colocó en bolsas de papel y se secaron en la estufa de circulación forzada a 70 °C durante 24 horas hasta obtener su peso seco constante. Después del secado, el material se molió y se colocó en bolsas de plástico para su posterior análisis de concentración de carbono. Este procedimiento se realizó para el material de cada colecta.

Es importante mencionar que antes de llevar las bolsas en el campo, se tomó una submuestra representativa de material por conglomerado, con la finalidad de obtener las condiciones iniciales del material. Estas muestras se secaron, pesaron y molieron para determinar los valores iniciales de peso seco y concentración de carbono; a estas muestras se les denominó “tiempo cero”.

B. Estimación de la tasa de descomposición de las hojas

Control de calidad de los datos

Previo al cálculo de la tasa de descomposición foliar, se procedió a una revisión de los datos registrados en laboratorio. Para lo cual, los datos de peso inicial y la pérdida de peso del material foliar, se registraron una hoja de cálculo de Excel, en donde se revisaron con filtros para identificar cualquier valor anómalo y se elaboraron gráficos de dispersión de datos para observar posibles datos atípicos.

El cálculo de la pérdida de peso de cada muestra en descomposición, se obtuvo con la siguiente formula:

$$Pr = Pt - Pi_{ajustado}$$

Donde:

Pr = Peso remanente del material foliar (g)

Pt = Peso en el tiempo (el peso de cada colecta)

Pi_{ajustado} = Peso inicial ajustado del material foliar

$$Pi_{ajustado} = pi - pi(\%humedad) * 100$$

Donde:

P_i = Peso inicial del material foliar (20 g)

$$\%humedad = \frac{\text{Peso de material foliar secado en el horno (50g)}}{\text{Peso seco de material foliar después de 24 horas}} (100)$$

Descomposición de material leñoso

A. Diseño de muestreo en campo

Para el establecimiento de los ensayos de descomposición de ramas, se seleccionaron 16 conglomerados (Figura 38), con el objetivo de tener una representación a nivel de paisaje. Estos conglomerados son distintos a los que se usaron para el establecimiento de los ensayos de descomposición del material foliar.

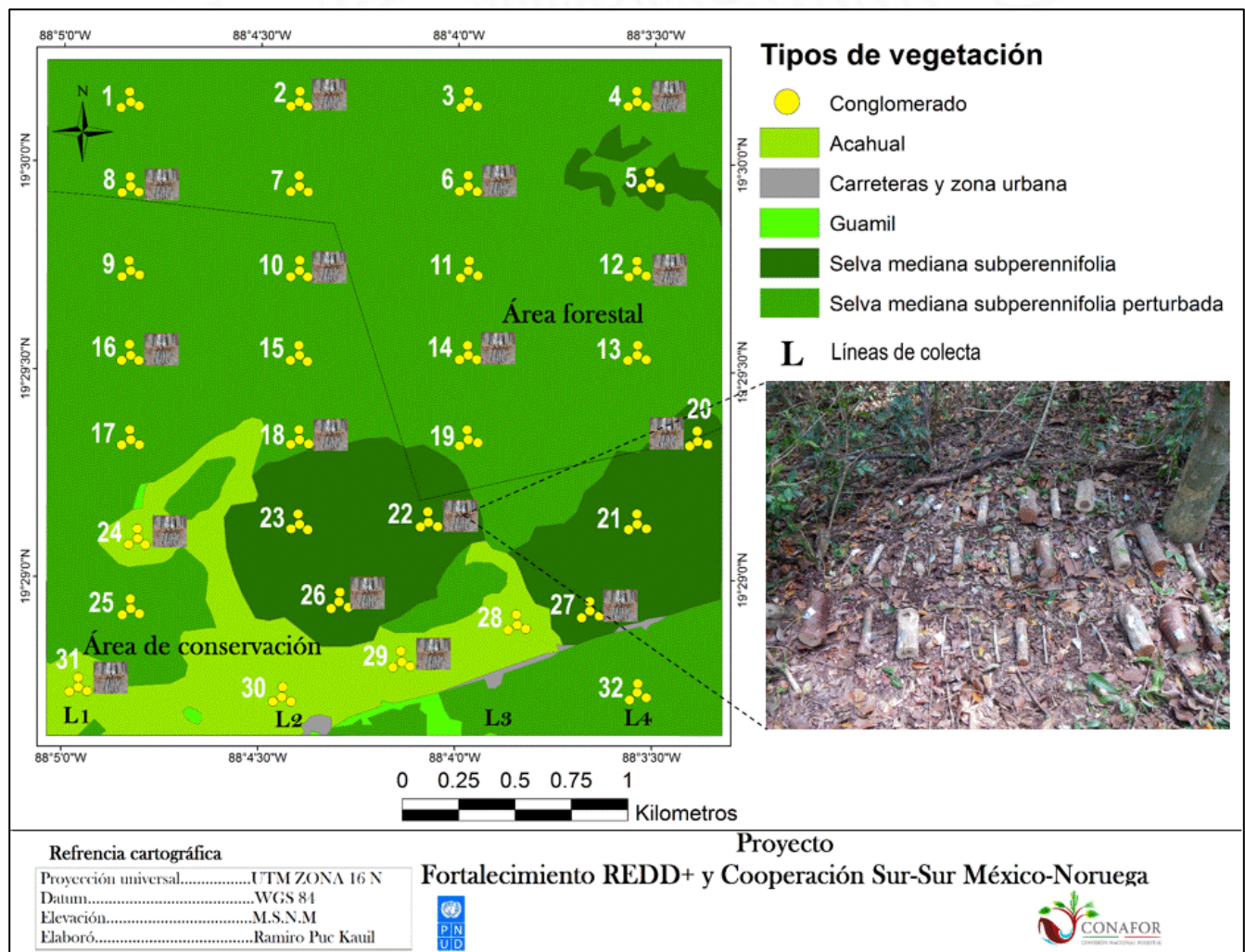


Figura 38. Distribución de los 16 conglomerados con ensayos de descomposición para ramas finas, medianas y gruesas

En los experimentos que se han hecho para conocer la tasa de descomposición de ramas se ha utilizado el MLC del que se conoce el tiempo de incorporación al suelo (Harmon *et al.* 1995, Herman *et al.* 2008, Kyung *et al.* 2011).

En el caso del SMIC-Quintana Roo, no se encontró disponibilidad de MLC del que se conociera el tiempo desde que cayó al suelo. Por tanto, se cosecharon ramas directamente de los árboles vivos, correspondientes a las especies estructuralmente representativas, es decir, especies con mayor Índice de Importancia Relativa (IVIR). Con base al inventario de cada conglomerado del año 2013 se calculó el IVIR de las especies. El IVIR jerarquiza la dominancia e importancia ecológica de cada especie dentro de una comunidad vegetal en el plano horizontal (Mostacedo y Fredericksen 2000). Para calcular el IVIR de las especies arbóreas, se aplicó la siguiente fórmula (Curtis y McIntosh 1951):

$$\text{IVIR (\%)} = \frac{(\text{Dominancia relativa (área basal relativa)} + \text{Densidad relativa} + \text{Frecuencia relativa})}{3}$$

En el Cuadro 10 se muestran las especies con mayor IVIR de los 16 conglomerados elegidos para establecer el ensayo de descomposición de ramas. Las especies con mayor dominancia estructural en el SMIC fue *Gymnanthes lucida*, *Bursera simaruba* y *Manilkara zapota*, respectivamente.

Cuadro 10. Especies arbóreas con mayor IVIR estructural en los 16 conglomerados para los ensayos de descomposición de ramas

No. conglomerado	Edad (años)	Especie	IVIR (%)
2	>30	<i>Gymnanthes lucida</i>	59
		<i>Bursera simaruba</i>	53
		<i>Pseudobombax ellipticum</i>	53
4	>30	<i>Pseudobombax ellipticum</i>	50
		<i>Alseis yucatanensis</i>	49
		<i>Gymnanthes lucida</i>	46
6	>30	<i>Gymnanthes lucida</i>	51
		<i>Bursera simaruba</i>	48
		<i>Caesalpinia gaumeri</i>	44
8	>30	<i>Gymnanthes lucida</i>	70
		<i>Manilkara zapota</i>	49

No. conglomerado	Edad (años)	Especie	IVIR (%)
		<i>Pouteria reticulata</i>	48
10	>30	<i>Gymnanthes lucida</i>	68
		<i>Pseudobombax ellipticum</i>	53
		<i>Manilkara zapota</i>	65
12		<i>Pouteria reticulata</i>	46
		<i>Pseudobombax ellipticum</i>	45
		<i>Bursera simaruba</i>	53
14	20-30	<i>Gymnanthes lucida</i>	77
		<i>Bursera simaruba</i>	45
		<i>Thouinia paucidentata</i>	44
16	6-20	<i>Gymnanthes lucida</i>	52
		<i>Bursera simaruba</i>	50
		<i>Caesalpinia gaumeri</i>	50
18	>30	<i>Gymnanthes lucida</i>	77
		<i>Pseudobombax ellipticum</i>	54
		<i>Manilkara zapota</i>	43
20	>30	<i>Gymnanthes lucida</i>	66
		<i>Manilkara zapota</i>	51
		<i>Brosimum alicastrum</i>	44
22	>30	<i>Gymnanthes lucida</i>	61
		<i>Pseudobombax ellipticum</i>	46
		<i>Metopium brownei</i>	45
24	20-30	<i>Bursera simaruba</i>	54
		<i>Vitex gaumeri</i>	49
		<i>Croton glabellus</i>	45
26	30	<i>Gymnanthes lucida</i>	70
		<i>Manilkara zapota</i>	61
		<i>Alseis yucatanensis</i>	50
27	6-20	<i>Manilkara zapota</i>	65
		<i>Pouteria reticulata</i>	64
		<i>Gymnanthes lucida</i>	52
29	6-20	<i>Vitex gaumeri</i>	61
		<i>Piscidia piscipula</i>	58
		<i>Lysiloma latisiliquum</i>	46
31	6-20	<i>Bursera simaruba</i>	58
		<i>Lysiloma latisiliquum</i>	46
		<i>Caesalpinia gaumeri</i>	40

La información del IVIR permitió seleccionar las tres especies con mayor importancia estructural de cada conglomerado para evaluar la tasa de descomposición de ramas. Las categorías diamétricas que se consideraron, fueron las mismas del material leñoso caído:

ramas finas de 0.5 a 2.5 cm de diámetro; medianas de 2.5 a 7.5 cm y las ramas gruesas con diámetros de 7.5 a 10 cm.

Para la cosecha de ramas se ubicaron previamente aquellas especies que fueron más importantes por cada conglomerado. Esto se realizó dentro de los conglomerados pero fuera de las parcelas de medición dasométrica. La cosecha de ramas en sus tres categorías se logró con ayuda de equipos de poda, herramientas de campo y personal de apoyo de campo. En total se colectaron 39 piezas de ramas de 30 cm de largo por cada especie, que corresponden a 18 ramas finas, 12 medianas y 9 ramas gruesas (Figura 39).



Figura 39. Colecta, agrupación y numeración de ramas vivas por categoría diamétrica

Las ramas se enumeraron de acuerdo a la categoría de diámetro, esto es, las ramas finas del 1 al 18, las medianas del 1 al 12, y las ramas gruesas del 1 al 9. En cada categoría se adicionó el número de conglomerado. Al mismo tiempo, se registró el peso fresco de las ramas. Toda la información de campo (nombre de la especie, número de rama, categoría diamétrica, longitud de la rama, peso fresco, fecha de colecta) se registró en formatos de campo para la colecta de ramas vivas (ver anexos).

En laboratorio, a cada rama de 30 cm se le cortaron dos rodajas de 5 cm de grosor (de cada extremo); las ramas de 20 cm de largo y las rodajas se pesaron y se les colocó una etiqueta

de aluminio con la siguiente información: número de conglomerado, número de rama, número de pieza, categoría diamétrica (fino, mediano o grueso) (Figura 40).



Figura 40. Ramas vivas y rodajas por categoría diamétrica de las tres especies con mayor importancia estructural (IVIR)

Las ramas de 20 cm se secaron a la sombra durante cinco días, de esta manera no se altera la composición química de la rama para no influir en el proceso de descomposición. Las dos rodajas de 5 cm se secaron al horno a peso constante, con el propósito de inferir el peso seco inicial (peso cero) de la rama de 20 cm y para caracterizar la concentración inicial de carbono.

Para distribuir los ensayos de descomposición se eligieron los sitios 1, 2 y 4 de cada conglomerado (Figura 41) y cada uno representó un lote de ramas. Los lotes se colocaron a 20 m de del centro de cada sitio. Cada rama se le colocó una etiqueta de aluminio como identificador.

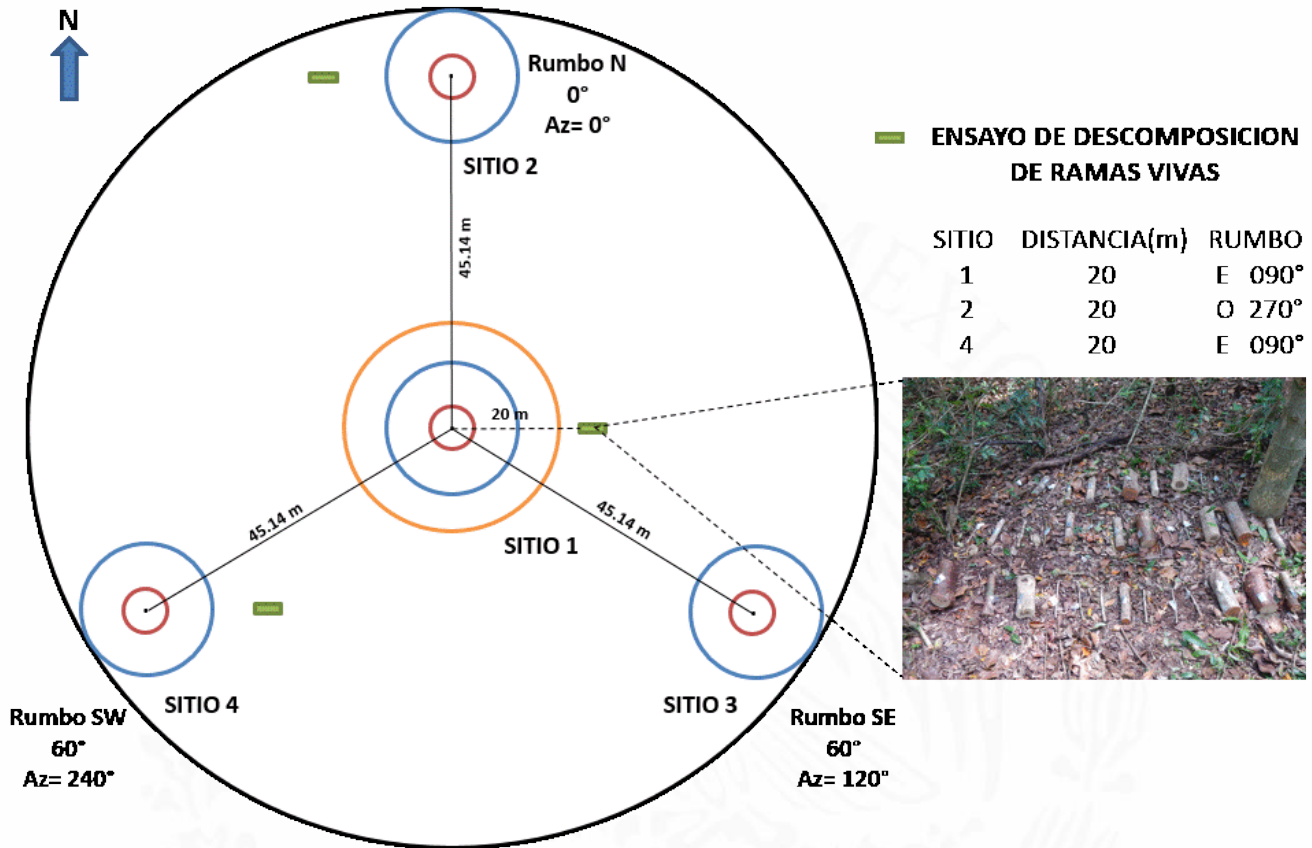


Figura 41. Ubicación de cuadros para la distribución de ramas vivas finas, medianos y gruesos

En cada lote, las ramas de distribuyeron de manera aleatoria y por cada ensayo o cuadro se establecieron tres repeticiones de ramas por especie, categoría diamétrica (finas, medianas y gruesas) y frecuencia de colecta (cada 2 meses las finas, las ramas medianas cada 3 meses y cada 6 meses las ramas gruesas). Es decir, se colocaron por sitio 18 ramas finas, 12 medianas y 9 gruesas (tres repeticiones por cada categoría de rama. Siendo un total 54 ramas finas, 36 medianas y 27 gruesas por conglomerado representada por tres especies). En el Cuadro 11 se muestra un ejemplo del número de ramas por lote, del conglomerado número dos.

Cuadro 11. Número de ramas por conglomerado, especie y clase diamétrica, para los tres lotes del conglomerado dos

No. conglomerado	Sitio	Lote	Especie	Clase diamétrica			Total
				Finas	Medianas	Gruesas	
2	1	1	<i>Gymnanthes lucida</i>	6	4	3	13
			<i>Drypetes lateriflora</i>	6	4	3	13
			<i>Bursera simaruba</i>	6	4	3	13
2	2	2	<i>Gymnanthes lucida</i>	6	4	3	13
			<i>Drypetes lateriflora</i>	6	4	3	13
			<i>Bursera simaruba</i>	6	4	3	13
2	4	3	<i>Gymnanthes lucida</i>	6	4	3	13
			<i>Drypetes lateriflora</i>	6	4	3	13
			<i>Bursera simaruba</i>	6	4	3	13
Total				54	36	27	117

El establecimiento de los lotes de descomposición de ramas inició el 29 de marzo del 2014. La primera colecta se realizó en el mes de mayo del mismo año (colecta de ramas finas) y concluyó en el mes de marzo de 2015. Para una mejor eficiencia durante la colecta de los ensayos, se agruparon los conglomerados en cuatro líneas tal como se observa en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Fecha de colecta por tipo de rama.

Fechas de colecta	No. colecta	Clase diamétrica	Líneas
29 Mayo de 2014	1	Finas	Línea 1 y 2
30 Mayo de 2014	1	Finas	Línea 3 y 4
29 de julio de 2014	2	Finas	Línea 1 y 2
30 de julio de 2014	2	Finas	Línea 3 y 4
29 de Septiembre de 2014	3	Finas	Línea 1 y 2
30 de Septiembre de 2014	3	Finas	Línea 3 y 4
29 de Noviembre de 2014	4	Finas	Línea 1 y 2
30 de Noviembre de 2014	4	Finas	Línea 3 y 4
29 de Enero de 2015	5	Finas	Línea 1 y 2
30 de Enero de 2015	5	Finas	Línea 3 y 4
29 de Marzo de 2015	6	Finas	Línea 1 y 2
30 de Marzo de 2015	6	Finas	Línea 3 y 4
29 Junio de 2014	1	Medianas	Línea 1 y 2
30 Junio de 2014	1	Medianas	Línea 3 y 4

Fechas de colecta	No. colecta	Clase diamétrica	Líneas
29 de Septiembre de 2014	2	Medianas	Línea 1 y 2
30 de Septiembre de 2014	2	Medianas	Línea 3 y 4
29 de Diciembre de 2014	3	Medianas	Línea 1 y 2
30 de Diciembre de 2014	3	Medianas	Línea 3 y 4
29 de Marzo de 2015	4	Medianas	Línea 1 y 2
30 de Marzo de 2015	4	Medianas	Línea 3 y 4
29 de Septiembre de 2014	1	Gruesas	Línea 1 y 2
30 de Septiembre de 2014	1	Gruesas	Línea 3 y 4
29 de Marzo de 2015	2	Gruesas	Línea 1 y 2
30 de Marzo de 2015	2	Gruesas	Línea 3 y 4

En cada lote, se realizó la colecta eligiendo una rama de cada especie de acuerdo a la clase diamétrica. Es decir, en cada conglomerado se colectaron tres ramas por especie y clase diamétrica. Las ramas se depositaron en bolsas de plástico debidamente etiquetadas con el número del conglomerado, sitio y fecha de colecta. Inmediatamente, se enviaron al laboratorio para su procesamiento.

En laboratorio, las ramas se limpiaron para eliminar otras partículas adheridas a las piezas como hojas, musgos, suelo mineral, entre otros. Posteriormente, se marcaron con etiquetas de papel adheribles con la misma información contenida en las placas de aluminio. Enseguida, se pusieron a secar en la estufa de circulación forzada a de 70 °C de temperatura (Muñoz *et al.* 2005).

Las ramas finas alcanzaron el peso seco constante a las 24 horas, las medianas a las 60 horas y las gruesas a las 120 horas. Se registró el peso seco de todas las ramas en formatos previamente elaboradas para cada tipo de rama.

Las rodajas de 5 cm que se cortaron inicialmente a cada rama, se pesaron (peso fresco) y se colocaron en bolsas de papel para el secado a 70 °C hasta peso constante. Con el peso seco se pudo corregir el peso seco inicial de la rama de 20 cm que se colocó en el campo. El tiempo requerido para lograr el peso seco constante de las rodajas finas fue de 24 horas, 36 horas para las medianas y con un tiempo de 72 horas las gruesas.

Después de obtener el peso seco de cada rodaja de 5 cm, se obtuvo el volumen por inmersión de la siguiente manera: 1) se forró la rodaja con vitafilm flexible para evitar la

entrada o el contacto del agua con las rodajas, 2) en un recipiente con agua y de peso conocido, se introdujo la rodaja evitando el contacto con las paredes del recipiente, y 3) enseguida se registró el peso del agua desplazada en gramos.

Con el peso del agua desplazada, se obtuvo el volumen de las rodajas (V_{cm^3}), suponiendo que la densidad del agua es igual a $1g/cm^3$. La gravedad específica se obtuvo dividiendo el peso seco/volumen. En la base de datos de laboratorio se relacionó la pieza de 20 cm que se llevó a campo con las dos piezas que se quedaron en laboratorio para su procesamiento.

El peso inicial de la pieza de 20 cm se obtuvo con el promedio de la fracción seca (peso seco/peso fresco) de las piezas de 5 cm por el peso fresco de la pieza de 20 cm. Con la ayuda de herramientas de uso industrial (licuadora y molino), casero (elaborado por el equipo de laboratorio del SMIC) y de carpintería, se procedió a triturar y moler cada una de las ramas y rodajas (Figura 42).



Figura 42. Proceso de trituración, molienda y de ramas derivadas de los ensayos de descomposición

El resultado de la molienda por pieza se almacenó en bolsas de plástico de diferentes medidas perfectamente cerradas con grapas de acero inoxidable y estrictamente clasificadas (Figura 40). De la molienda se tomaron submuestras de 10 g para enviarlos al laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental del Colegio de Postgraduados “Campus Montecillo” Estado de México para determinar la concentración de carbono. El material sobrante de la trituración, se almacenó en bolsas de papel, las cuales se rotularon con la información particular de cada material de origen y se conservaron para futuras investigaciones.

B) Estimación de la tasa de descomposición del material leñoso

La información de campo y laboratorio se ordenó y clasificó en hojas de cálculo en Excel. La información fue verificada bajo ciertas reglas de manejo de datos. Por ejemplo el IVIR, se ordenó de acuerdo a las especies con mayor importancia estructural y por conglomerado. Una vez concluida la verificación de la información en hojas de cálculo Excel, éstas se transfirieron en bases de datos Access.

Aquí falta describir los pasos del cálculo de carbono de ramas a nivel paisaje (la información lo tiene David)

CAPITULO VIII. DINÁMICA DEL CARBONO EN EL SMIC QUINTANA ROO

Retos

Siguientes pasos

LITERATURA CITADA

- Abbot, D.T. and D.A. Crossley Jr. 1982. Woody litter decomposition following clear-cutting. *Ecology* 63(1):35-42.
- Aber, J.D. and J.M. Melillo. 1991. *Terrestrial ecosystems*. Saunders College Publishing, USA. 429 pp.
- Acosta-Mireles, M., F. Carrillo-Anzures y M. Díaz L. 2009. Determinación del Carbonato total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Terra Latinoamericana* 27(2):105-114.
- Aerts, R. 1997. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter composition in terrestrial ecosystems; a triangular relationship. *Oikos* 79:439-449.
- Aguilar-Arias, H., E. Ortiz-Malavassi, B. Vilchez-Alvarado, et al. 2012. Biomasa sobre el suelo y carbono orgánico en el suelo en cuatro estadios de sucesión de bosques en la Península de Osa, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 9(22):2215-2505.
- Álvarez-Sánchez, J. 2001. Descomposición y ciclo de nutrientes en Ecosistemas terrestres de México. *Acta Zoológica de México* 1:11-27.
- Álvarez-Sánchez, J. y E. Naranjo-García (coords.). 2003. *Ecología del suelo en la selva tropical húmeda de México*. Instituto de Ecología, A. C./Instituto de Biología/Facultad de Ciencias, UNAM. Xalapa, México. 70-71 pp.
- ASTM. American Society for Testing and Materials. 2007. *Standar methods of small clear specimens of timber*. D143-94.
- Anderson, C. 2005. Litter decomposition in the forest ecosystem-influence of trace elements, nutrients and climate. *The ESS Bulletin* 3:4-17.
- Anderson, J.M y J.S.I. Ingram. 1989. *Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods*. CAB International, Wallingford, Inglaterra.
- Andrade, C.H.J., A. Segura M., P.L.M. Forero. 2014. *Desarrollo de modelos alométricos para volumen de madera, biomasa y carbono en especies leñosas perennes: conceptos básicos, métodos y procedimientos*. Editorial Ibagué: Universidad del Tolima, 2014.
- Arana, R.I.O. 2003. *Métodos de muestreo*. Tesis Profesional Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Edo. de México. 179 p.
- Argüelles, L.A. 1991. *Plan de manejo forestal para el bosque tropical de la empresa ejidal Noh-Bec*. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. México. 79 p.

- Argüelles, L.A.S. 2005. *Diagnóstico y programas de desarrollo del ejido Felipe Carrillo Puerto, Corredor Sian ka'an-Calakmul*. CBM-M. Proyecto Corredor Biológico Meosamericano-México. 41 p.
- Arnaldos, J., X. Navalón, E. Pastor, et al. Zárate. 2004. *Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales*. Madrid, ES, Ediciones Mundi-Prensa. 414p.
- Arriaga, L., J.M. Espinoza, C. Aguilar, et al. (coords). 2008. *Regiones prioritarias de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad*. México.
- Asociación civil U'yool'che A. C. 2005. Estudio de ordenamiento territorial del ejido Felipe Carrillo Puerto. Quintana Roo, México. 66 p.
- Barrera, A., A. Gómez-Pompa y C. Vázquez-Yanes. 1977. El manejo de las selvas por los Mayas: sus implicaciones silvícolas y agrícolas. *Biótica* 2(2):47-61.
- Basuki, M.T., P.E. Van Laake, A. K. Skidmore, et al. 2009. Allometric equation for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. *Forest Ecology and Management* 257:1684-1694.
- Berg and C. McClaugherty. 2008. *Plant litter: decomposition, humus formation, carbon sequestration*. 2° ed. Berlín (Alemania), Springer-Verlag. 338 p.
- Birdsey, R., K. Pregitzer and A. Lucier. 2006. Forest carbon management in the United States: 1600-2100. *Journal of Environmental Quality* 35:1416-1469.
- Brown, J.K. 1974. *Handbook for inventorying downed woody material*. USADA Forest Service. General Technical Report INT-16. Utah, USA. 24 P.
- Brown, S. 1997. *Estimating biomass and biomass change of tropical forest. A primer*. FAO. Forestry paper, No. 134. Rome, Italy. 55 p.
- Brown, S. and A. Lugo. 1982. The storage and production of organic matter in Tropical Forest and their role in the Global Carbon Cycle. *Biotropica* 14(3):161-187.
- Brown, S., J. Mo., J.K. McPherson, et al. 1996. Decomposition of woody debris in western Australian forests. *Canadian journal of Forest Research* 26:954-966.
- Burton, A.J. y K.S. Pregitzer. 2008. Measuring forest floor, mineral soil, and root carbon stocks. C.M. Hoover (eds.). *Field Measurements for Forest carbon Monitoring*. Springer, Nueva York, pp. 129-142.
- Cairns, A.M., I. Olmsted, J. Granados, et al. 2003. Composition and aboveground tree biomass of a dry semi-evergreen forest on Mexico's Yucatan Peninsula. *Forest Ecology and Management* 186:125-132.

- Caldato, S.L., P.A. Floss y E.C. Serafini F. 2010. Producción y descomposición de hojarasca en la selva ombrófila mixta en el sur de Brasil. *BOSQUES* 31(1):3-8.
- Carillo, O., C. Wayson, M. Olguín, *et al.* 2014. Protocolo de control de calidad de los datos dasométricos, en los sitios de monitoreo intensivo de carbono. *Reporte. Proyecto fortalecimiento REDD+ y cooperación sur sur. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). Programa de Las Naciones Unidas para el Desarrollo.* 11 p.
- Castellanos-Barliza, J. y J. D. León P. 2011. Descomposición de hojarasca y liberación de nutrientes en plantaciones de *Acacia mangium* (Mimosaceae) establecidas en suelos degradados de Colombia. *Revista Biológica Tropical* 59(1):113-128.
- Chambers, J. Q., N. Higuchi, J.P. Schimel, *et al.* 2000. Decomposition and carbon cycling of dead trees in tropical forests of the central Amazon. *Oecologia* 122:380-388.
- Chave, J., R. Condit, S. Aguilar, *et al.* 2004. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society Biological* 359:409-420.
- Chazdon, R.L., S.G. Letcher, M. Van Breugel, *et al.* 2007. Rates of changes in tree communities of secondary Neotropical forests following major disturbances. *Philosophical Transactions of the Royal Society Biological* 362:273-289.
- Chen, W., J.M. Chen, D.T. Price, *et al.* 2002. Effects of stand age on net primary productivity of boreal black spruce forest in Ontario, Canada. *Canadian Journal of Forest Research* 32(5):833-842.
- Clark, D.B., D.A. Clark, S. Brown, *et al.* 2002. Stocks and flows of coarse woody debris across a tropical rain forest nutrient and topography gradient. *Forest Ecology and Management* 164:237-248.
- Coleman, D.C., D.A. Crossley Jr. and P.F. Hendrix. 2004. *Fundamentals of soil ecology.* Second Edition. Elsevier Academic Press, San Diego. 386 pp.
- Colmero, L.C., J.A. Palma y A. Ferreira. 1990. *Medio ambiente y desarrollo en Quintana Roo. Grupo Ecologista del Mayab GEMA/CANTE, A. C.* 73 p.
- Comiskey, J., F. Dallmeier and S. Mistry. 1999. Protocolo de muestreo de vegetación para la selva Maya. A. Carr and A. C. de Stoll. (Eds). *Monitoreo biológico en la selva Maya.* US Man and the Biosphere, Tropical Ecosystem Directorate y Wildlife Conservation Society, Guatemal. pp. 18-27.
- CONABIO. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 2006. Capital natural y bienestar social. México.

- CONAFOR. Comisión Nacional Forestal. 2012. Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Manual de procedimientos para el muestreo de campo. Re- muestreo 2012.
- CONANP. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2012. Informe de Rendición de cuentas de la administración pública 2006-2012. Primera etapa. Mexico. 126 p.
- Condit, R. 1995. Research in large, long-term tropical forest plots. *Trends in Ecology & Evolution* 10(1):18-22.
- Corral-Rivas, J.J., B. Vargas-Larreta, C. Wehenkel, *et al.* 2008. Guía metodológica para el establecimiento de sitios de investigación forestal y de suelos en el estado de Durango. *XIX Semana Nacional de la Investigación Científica*. Universidad Juárez del estado de Durango. México. pp. 625-631.
- Coûteaux, M-M., P. Bottner and B. Berg. 1995. Litter decomposition, climate and litter quality. *TREE* 10(2):63-66.
- Curtis, T.J., and R.P. McIntosh. 1951. An upland forest continuum in the prairie-forest border region of Wisconsin. *Ecology* 32:476-496.
- De Jong, B., C. Anaya, O. Maser, *et al.* 2010. Greenhouse gas emission between 1993 and 2002 from land-use change and forestry in Mexico. *Forest Ecology and Management* 260(10):1689-1701.
- Del Valle-Arango, A.J.I. 2003. Descomposición de la hojarasca fina en bosques pantanosos del pacífico colombiano. *INTERCIENCIA* 28(3): 148-153.
- Dimitris, Z. 2008. Predicting mean aboveground forest biomass and its associated variance. *Forest Ecology and Management* 256:1400-1407.
- Dixon, R.K., S. Brown, R.A. Houghton, *et al.* 1994. Carbon pools and fluxes of global forest ecosystems. *Science* 263:185-190.
- Douterlungne, D., A.M. Herrera-Gorocica, B.G. Ferguson, *et al.* 2013. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono de cuatro especies leñosas neotropicales con potencial para la restauración. *Agrociencia* 47(4):385-397.
- Eaton, J.M. and D. Lawrence. 2006. Woody debris stocks and fluxes during succession in a dry tropical forest. *Forest Ecology and Management* 232:46-55.
- Enríquez, Q.M., B. Equihua E. y A.E. Martínez B. 1978. Abastecimiento en durmientes de madera para ferrocarriles de México. *IV Congreso Nacional Forestal, Oaxaca, México*.
- FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2001. Soil carbon sequestration for improved land management. World soil Resources reports No.96. Rome, Italia. 58 p.

- FAO-UNESCO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. 1990. Mapa mundial de Suelos. Leyenda Revisada. Roma, Italia. 99 p.
- Francis, J.K. 2000. Estimating biomass and carbon content of saplings in Puerto Rican secondary forests. *Caribbean Journal of Science* 36:346-350.
- Gartner, T.B. and Z.G. Cardon. 2004. Decomposition dynamics in mixed-species leaf litter. *OIKOS* 104:230-246.
- Gerwing, J.J. , A.S. Stefan, R.J. Burnham, *et al.* 2006. A Standard Protocol for Liana Censuses. *BIOTROPICA* 38:256–261.
- Gifford, R.M. 1994. The global carbon cycle; a viewpoint on the missing sink. *Australian Journal of Plant Physiology* 21(1):1-15.
- Gill, R.A. and R.B. Jackson. 2000. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist* 147:13-31.
- Gómez, C.C. 2010. *Instalación de parcelas permanentes de muestreo, PPM, en los bosques tropicales del Darién en Panamá (Comarca Embera-Wounaan)*. Panamá. 10 p.
- Gómez-Pompa A., y S. del Amo R. 1985. *Investigaciones Sobre la Regeneración de Selvas Altas en Veracruz, México*. Vol. II. Alhambra Mexicana, S.A de C.V. México, D.F. 421 p.
- González, R.H., I. Cantú S., R.G. Ramírez L., *et al.* 2008. Spatial and seasonal litterfall deposition in the Tamaulipan thorscrub, northeastern Mexico. *International Journal of Agriculture Environment and Biotechnology* 4:177-181.
- Gower, S.T., J.G. Vogel, J.M. Norman, *et al.* 1997. Carbon distribution and aboveground net primary production in aspen, jack pine, and black spruce stands in Saskatchewan and Manitoba, Canada. *Journal of Geophysical Research*. 102:29029-29041.
- Goya, J.F., C. Pérez, J.L. Frangi, *et al.* 2003. Impacto de la cosecha y destino de los residuos sobre la estabilidad del capital de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L. *Ecología Austral* 13:139-150.
- Granados, J. y C. Corner. 2004. Respuesta de las selvas tropicales al incremento de CO₂ en la atmósfera. *Revista Forestal Iberoamericana* 1(1):63-70.
- Groothousen, C. y C. Alvarado. 2000. *Las parcelas de muestreo permanente: bases para estudios de crecimiento y rendimiento en bosques de pino en Honduras*. AFE-COHDEFOR/ESNACIFOR/BID. Programa de manejo de los recursos naturales renovables de la Cuenca el Cajón. Siguatepeque, Honduras. 84 p.

- Guerra, J.C., J. Goyoso A., J. Schlatter V., *et al.* 2005. Análisis de la biomasa de raíces en diferentes tipos de bosques. Avances en la evaluación de *Pinus radiata* en Chile. *BOSQUE* 26(1):5-21.
- Gutiérrez, V.M.H., J. Méndez G., C.F. López, *et al.* 2012. Caída de hojarasca en plantaciones de *Pinus greggii* Engelm. y *Pinus cembroides* Zucc, en Coahuila, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35(2):123-133.
- Gutiérrez-Soto, M.V., J. Torres-Acuña, J.M. Araya-Alfaro. 2014. Uso de Winrhizo® en la cuantificación de las raíces y su aplicación en la palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Agronomía Mesoamericana* 25(1):181-188.
- Harmon, M.E., D.F. Whigham, J. Sexton, *et al.* 1995. Decomposition and mass of woody detritus in the dry tropical forests of the northeastern Yucatan Peninsula, Mexico. *BIOTROPICA* 27(3):305-316.
- Hättenschwiler S., A.V. Tiunov and S. Scheu. 2005. Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 36:191-218.
- Heartsill, T.S., F.N. Scatena, A.E. Lugo, *et al.* 2010. Changes in structure, composition, and nutrients during 15 years of hurricane-induced succession in a subtropical wet forest in Puerto Rico. *BIOTROPICA* 42(4):455-463.
- Hernández, I.M., I. Santa Regina y J.E. Gallardo. 1992. Dinámica de la descomposición de la hojarasca forestal en bosques de la cuenca del Duero (provincia de Zamora): Modelización de la pérdida de peso. *Arid Soil Research and Rehabilitation* 6:339-355.
- Hernández-Xolocotzi, E., L.M. Arias R. y L. Pool N. 1994. El sistema Agrícola de roza-tumba-quema en Yucatán y su capacidad de sostenimiento. *Agricultura indígena: pasado y presente*, (eds). T. Rojas R. CIESAS. México.
- Herrera, M.A.A. 2002. *Biomasa de la vegetación herbácea y leñosa pequeña y necromasa en el área de influencia de la Central Hidroeléctrica Porce II*. Tesis Profesional. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 30 p.
- Hollinger, D. 2008. *Defining a Landscape-Scale Monitoring Tier for the North American Carbon Program*. Hoover, C. (Eds.) *Field Measurements for Forest Carbon Monitoring*. Springer-NY, USA. pp 3-16.
- Houghton, R. A. 2001. Counting terrestrial sources and sinks of carbon. *Climate Change* 48:525-534.
- Houghton, R.A. 2005. Aboveground deforest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology* 11: 945-958.

- Houghton, R.A. 2010. How well do we know the flux of CO₂ from land-use change?. *Tellus* 62b:337-351.
- Hubbell, S.P. and R.B. Foster. 1986. Communes and rarity in a neotropical forest: implications for tropical tree conservation. M. Soule. (eds). *Conservation biology: the science of scarcity and diversity*. Sinauer, Sunderland. p:205-231.
- Hughes, F.R., J.B. Kauffman, and V.J. Jaramillo. 1999. Biomass, carbon, and nutrient dynamics of secondary forests in a humid tropical region of Mexico. *Ecology* 80: 1897-1907.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 2003. Anuario estadístico del estado de Quintana Roo. Edición 2003. Aguascalientes, Aguascalientes, México. 407 p.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Uses. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H. S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. y Tanabe K. (eds.) Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japón. Volume 4. Agriculture, Forestry and Other Land Use. Paustian, K., Ravindranath, N. H. and Van Amstel, A. (Coordinating lead authors).
- Jauregui, E. 1989. Los huracanes prefieren a México. *Información científica y tecnológica COACYT, México* 11(155):32-39.
- Jenkins, J.C., D.C. Chojnacky, L.S. Heath, *et al.* 2003. National-scale biomass estimators for Uninated States tree species. *Forest Science* 49(1):12-35.
- Julca-Otiniano, A., L. Meneses-Florián, R. Blas-Sevillano, *et al.* 2006. La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura. *IDESIA (Chile)* 24(1):49-61.
- Kanninen, M., D. Murdiyarso, F. Seymour, *et al.* 2007. *Do Trees Grow on Money? The Implications of Deforestation Research for Policies to Promote REDD*. Center for International Forestry Research (CIFOR), Bogor, Indonesia. 61 p.
- Kauffman, J.B., R.F. Hughes, and C. Heider. 2009. Carbon pool and biomass dynamics associated with deforestation, land use, and agriculture abandonment in the neotropics. *Ecological Applications* 19:1211-1222.
- Kavvadias, V.A., D. Alifragis, A. Tsiontsis, *et al.* 2001. Litterfall, litter accumulation and litter decomposition rates in four forest ecosystems in northern Greece. *Forest Ecology and Management* 144:113-127.
- Kern, J.S. 1994. Spatial patterns of soil organic carbon in the contiguous United States. *Soil Science Society of American Journal* 58:439-455.

- Ketterings, M., Q.R. Coe, M. van Noordwijk, *et al.* 2001. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management* 146:199-209.
- Khalid, H., Z.Z. Zakaria and J.M. Anderson. 2000. Nutrient cycling in an oil palm plantation: the effects of residue management practices during replanting on dry matter and nutrient uptake of young palms. *Journal of Oil Palm Research* 12(2):29-37.
- Khalid, H., Z.Z. Zin and J.M. Anderson. 2000. Decomposition processes and nutrient release patterns of oil palm residues. *Journal of Oil Palm Research* 12(1):46-63.
- Köhl, M., Magnussen y M. Marchetti. 2006. *Sampling methods, remote sensing and GIS multisource forest inventory*. Tropical Forestry, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, Germany. 376 p.
- Lal, R. 1997. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂-enrichment. *Soil & Tillage Research* 43:81-107.
- Lavelle, P., E. Blanchart, A. Martín, *et al.* 1993. A hierarchical model for decomposition in terrestrial ecosystems: application to soil of the humid tropics. *BIOTROPICA* 25(2):130-150.
- Lim, K.C. and A.R. Zaharah. 2000. Decomposition and N and K release by oil palm empty bunches applied under mature palms. *Journal of Oil Palm Research* 12(2):55-62.
- Locatelli, B. y Leonard S. 2001. Un método para medir el carbono almacenado en los bosques de Malleco (Chile). *Bois et forêts des tropiques*. 267(1):69-81
- Malhi, Y. and Grace. 2000. Tropical forest and atmospheric carbon dioxide. *Trends in Ecology & Evolution* 15:332-337.
- Martínez, E.H., J.P. Fuentes y E. Acevedo H. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal* 8(1):68-96.
- McClougherty, C.A., J.D. Aber and J.M. Melillo. 1982. The role of fine roots in the organic matter and Nitrogen budgets of two forested ecosystems. *Ecological Society of America* 63(5):1481-1490.
- McFee, W.W. and E.L. Stone. 1996. The persistence of decaying wood in the humus layers of northern forests. *American Society of Agronomy* 30(4):513-516.
- Miranda, F. y E. Hernández X. 1963. Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 28:29-179

- Morfín, R.J.E., E.J. Jardel P., E. Alvarado C., *et al.* 2012. *Caracterización y cuantificación de combustibles forestales*. Comisión Nacional Forestal-Universidad Nacional. Guadalajara, Jalisco, México. 111 p.
- Mostacedo, B.C., y T.S. Fredericksen. 2000. *Estado de regeneración de especies forestales importantes en Bolivia: Evaluación y recomendaciones*. Documento técnico número 88. Santa Cruz, Bolivia. 18 p.
- Moya, G.X. y B. Ku Yah. 2001. La milpa (kool) de los mayas yucatecos: cambiando para permanecer. *LEISA Revista de Agroecología* 16(3):17-19.
- Muñoz, C. R., J. Cancino C. y M. Espinosa B. 2005. Análisis de biomasa del suelo de un rodal adulto de *Pinus patula*. *BOSQUE* 26:33-44.
- Nadelhoffer, K.J. and J.M. Raich. 1992. Fine root production estimates and belowground carbon allocation in forest ecosystems. *Ecology* 73:1139-1147.
- Návar-Cháidez, J.J. and E. Jurado-Ybarra. 2009. Productividad foliar y radicular en ecosistemas forestales del noreste de México. *Revista Ciencia Forestal en México* 34(106):89-106.
- Olson, J.S. 1963. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology* 44:322-33.
- Orihuela-Belmonte, D.E., B.H.J. de Jong, J. Mendoza-Vega, *et al.* 2013. Carbon stocks and accumulation rates in tropical secondary forests at the scale of community, landscape and forest type. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 171:72-84.
- Pan, Y., R. A. Birdsey, J. Fang, *et al.* 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333:998-9933.
- Parresol, B.R. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *Forest Science* 45(4):573-593.
- Pavón, N.P. 2005. Biomass and root production of two plant life forms in a semiarid Mexican scrub: responses to soil nitrogen availability. *Canadian Journal of Botany* 83:1317-1321.
- Pérez, R.A. 1994. *The importance of long-term studies of tropical trees: Examples from BCI. Inside CTFS*. Summer 1994. Center for Tropical Forest Science, Smithsonian Institution, Washington, D.C.
- Phillips, O.L. 1996. Long-term environmental change in tropical forest: increasing tree turnover. *Environmental Conservation* 23(3):235-248.
- Phillips, O.L., Y. Malhi, N. Higuchi, *et al.* 1998b. Changes in the carbon balance of tropical forest: evidence from long-term plots. *Science* 282:439-442.

- Picard N., Saint-André L., Henry M. 2012. *Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurements to prediction*. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, and Centre de Cooperation Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Montpellier, 213 pp.
- Pozo, C. 2011. Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación, Tomo 2. El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR)/Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)/Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones (ppd). México, D. F.
- Prause, J., G.A. de Caram y P.N. Angeloni. 2003. Variación mensual en el aporte de hojas de cuatro especies forestales nativas del Parque Chaqueño Húmedo (Argentina). *Quebracho* 10:39-45.
- Pregitzer, K.S., D.R. Zak, P.S. Curtis, *et al.* 1995. Atmospheric CO₂, soil nitrogen and turnover of fine roots. *New Phytol.* 129:579-585.
- Pregitzer, S.K., and E.S. Euskirchen. 2004. Carbon cycling and storage in world forest: biome patterns related to forest age. *Global Change Biology* 10:2052-2077.
- Prescott, C.E. 2005. Do rates of litter decomposition tell us anything we really need to know?. *Forest Ecology and Management* 220(1-3):66-74.
- Proctor, J., J.M. Anderson, P. Chai, *et al.* 1983. Ecological studies in four contrasting lowland rain forests in Gunung Mulu National Park, Sarawak: I. Forest Environment, Structure and floristics. *The Journal of Ecology* 17(1):237-260.
- Prodan, M., R. Peters, F. Cox, *et al.* 1997. *Mensura forestal. Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible*. 1. IICA/BMZ/GTZ. Costa Rica.
- Quinto, H.M., R.R. Ibergüen, y Y.A. Ramos P. 2009. Mortalidad y reclutamiento de árboles en un bosque pluvial tropical de Chocó (Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* 6:4855-4868.
- Ramírez, A.A.P. y F.H. Moreno H. 2008. Respiración microbial y de raíces en suelos de bosques tropicales primarios y secundarios (Porce, Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín* 61(1):4381-4393.
- Ramírez-Correa, J.A., C.M. Zapata-Duque, J.D. León-López, *et al.* 2007. Caída de hojarasca y retorno de nutrientes en bosques montanos andinos de Piedras Blancas, Antioquia, Colombia. *INTERCIENCIA* 35(5):303-311.
- Rebollar, D.S., V. Santos J. y R.L. Sánchez A. 2002. Estrategias de recuperación de selvas en dos ejidos de Quintana Roo, México. *Madera y Bosques* 8(1):19-38.

- Rentería-Anima, J.B., E.J. Treviño-Garza, J. de J. Návar-Chaidez, *et al.* 2005. Caracterización de combustibles leñosos en el ejido Pueblo Nuevo, Durango. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 11(1):51-56.
- Rocha-Loredo, A.G., y N. Ramírez-Marcial. 2009. Producción y descomposición de hojarasca en diferentes condiciones sucesionales del bosque de pino-encino en Chiapas, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 84:1-12.
- Romahn, C., H. Ramírez y Treviño J. 1994. *Dendrometría*. Universidad Autónoma Chapingo. 354 p.
- Ruiz-Peinado, R., G. Montero and M. del Rio, 2012. Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species. *Forest Systems* 21(1):42-52.
- Sánchez-Sánchez, O. y G.A Isleb. 1999. Hurricane Gilbert and structural changes in a tropical forest. *Global Ecology and Biogeography* 8:29-38.
- Schimadzu Corporation. 1997. *TOC control software manual*. Japan. 33 p.
- Schlatter, J.E., V. Gerding y S. Calderón. 2006. Aporte de la hojarasca al ciclo biogeoquímico en plantaciones de *Eucalyptus nitens*, X Región, Chile. *BOSQUE* 27(2):115-125.
- Schlatter, J.E.V., R. Grez y V. Gerding. 2003. *Manual para el reconocimiento de suelos*. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 1148 p.
- Schlesinger, W.H. 1990. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. *Nature* 348:232-234.
- Schreuder, H.T., R. Ernst and H. Ramírez M. 2004. *Statistical techniques for sampling and monitoring natural resources*. Forest Service-USDA General Technical Report RMRS-GTR-126. USA.111 p.
- Smith, C. T., A. T. Lowe, M. F. Skinner, P. N. Beets, S. H. Schoenholz, and S. Fang. 2000. Response of radiata pine forests to residue management and fertilization across a fertility gradient in New Zealand. *Forest Ecology and Management* 138:203-223.
- Sikkink, P.G. and R.E. Keane. 2008. A comparison of five sampling techniques to estimate surface fuel loading in montane forests. *International Journal of Wildland Fire* 17:363-373.
- Singh, J.S. and S.R. Gupta. 1997. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *Botanical Review* 43(4):449-528.
- Swift, M.J., O.W. Heal and J.M. Anderson. 1979. *Decomposition in terrestrial ecosystems*. University of California Press. Berkeley, California.
- Swift, R.S. 2001. Sequestration of carbon by soil. *Soil Science* 166:858-871.

- Tuomi, M., T. Thum, H. Järvinen, *et al.* 2009. Leaf litter decomposition-estimates of global variability based on Yaso07 model. *Ecological Modelling* 220:3362-3371.
- U'yo'che. 2005. *Estudio de ordenamiento territorial del ejido Felipe Carrillo Puerto*. Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo. México. 95 p.
- Ugalde, A.L.A. 1981. *Conceptos básicos de dasimetría*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Programa de recursos naturales renovables. Turrialba, Costa Rica.
- Urquiza-Haas, T., P.M. Dolman, and C.A. Peres. 2007. Regional scale variation in forest structure and biomass in the Yucatan Peninsula, Mexico: effects of forest disturbance. *Forest Ecology and Management* 247:80-90.
- Valdez-Hernández, M. y G.A. Islebe. 2011. Tipos de Vegetación en Quintana Roo. C. Pozo. (Eds). *Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación*. El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones (PPD). México, D.F. p: 32-75.
- Valencia, S.M. y J. Vargas H. 1997. Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. *Madera y Bosques* 3(1):81-87.
- Vallejo, M.I.J., A.C. Londoño V., G. Galeano, *et al.* 2005. *Establecimiento de parcelas permanentes en bosques de Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (Serie: Métodos para estudios ecológicos a largo plazo; No. 1). Bogotá D.C., Colombia. 310 p.
- Van Wagner, C.E. 1982. Practical aspects of the line intersect method. *Information report PI-X-12. Petawawa national forestry institute*. Canadian Forest Service. Ontario, Canadá.
- Vargas-Parra, L. y A. Varela. 2007. Producción de hojarasca de un bosque de niebla en la reserva natural La Planada (Nariño, Colombia). *Universitas Scientiarum* 12(1):35-49.
- Vargas, R., M.F. Allen, and E.B. Allen. 2008. Biomass and carbon accumulation in a fire chronosequence of a seasonally dry tropical forest. *Global Change Biology* 14:109-124.
- Velasco, E.B., H. Ramírez Maldonado, F. Moreno S., *et al.* 2004. Estimadores de razón para el inventario nacional forestal de México. *Revista Ciencia Forestal en México* 28(94):23-43.
- Vera, G.F. 1980. *Presentación de la técnica de intersecciones planares en un caso de inventario de residuos forestales en el campo experimental Zoquiapan, México*. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.

- Vitousek, P. 1982. Nutrient cycling and nutrient use efficiency. *The American Naturalist* 119(4):553-572.
- Vitousek, P., D. Turner, W. Parton, *et al.* 1994. Litter decomposition on the Mauna Loa environmental matrix, Hawaii: patterns, mechanisms, and models. *Ecology* 72:418-429.
- Vitousek, P.M., D.R. Turner, W.J. Parton, *et al.* 1994. Litter Decomposition on the Mauna Loa environment matrix, Hawai'i: patterns, mechanisms, and models. *Ecology* 75(2):418-429.
- Vogt, K.A., D.J. Vogt y J. Bloomfield. 1998. Analysis of some direct and indirect methods for estimating root biomass and production of forests at an ecosystem level. *Plant and Soil* 200:71-89.
- Vogt, K.A., D.J. Vogt, E.E. Moore, *et al.* 1987. Conifer fine root and mycorrhizal root biomass in relation to stand age and site productivity in Douglas-fir forests. *Journal Ecology* 75:857-870.
- Vogt, K.A., D.J. Vogt, P.A. Palmiotto, *et al.* 1996. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. *Plant and Soil* 187:159-219.
- Wabo, E. 2002. *Estimador de Razón y regresión. Curso de biometría forestal-guía de clases.* Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de la Plata. Buenos Aires, Argentina. 3 p.
- Waddell, K.L. 2002. Sampling coarse Woody debris for multiple attributes in extensive resource inventories. *Ecological Indicators* 1(3):139-153.
- Walker, J.C.F. 2010. *Primary Wood processing principles and practice.* Springer. Países Bajos. 596 p.
- Walker, S.M., T.R.H. Pearson, N. Harris, *et al.* 2009. Procedimientos operativos estándar para la medición de carbón terrestre. Winrock International.
- Wang, C., S. Han, Y. Zhou, *et al.* 2012. Responses of fine roots and soil N availability to short-term Nitrogen fertilization in a broad-leaved Korean pine mixed forest in northeastern China. *PlosOne* 7:1-7.
- Wang, Q., S. Wang and Y. Huang. 2008. Comparison of litterfall, litter decomposition and nutrient return in a monoculture *Cunninghamia lanceolata* and mixed stand in southern China. *Forest Ecology and Management* 255(3-4):1210-1218.
- Xu, X., E. Hirata, T. Enoki, *et al.* 2004. Leaf litter decomposition and nutrient dynamics in a subtropical forest after typhoon disturbance. *Plant Ecology* 173(2):161-170.

Zianis, D., P. Muukkonen, R. Mäkipää, *et al.* 2005. *Biomass and stem volume equations for tree species in Europe*. Silva Fennica Monograph. No. 4. 63 p.

Zinn, Y.L., R. Lal and D.V.S. Resck. 2005. Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. *Soil and Tillage Research* 84(1):28-40.



ANEXOS

ANEXO 1. Procedimiento de control de calidad de datos dasométricos en el SMIC- Quintana Roo

El control de calidad de los datos dasométricos (CCDD) se realizó a nivel de especie, por ello, en primer lugar fue necesario identificar el conjunto de especies con un número de individuos suficiente para emplear métodos estadísticos automatizados, que permiten identificar de manera sencilla y rápida posibles errores en los valores dasométricos reportados a nivel de individuo dentro de cada especie (en el caso de no tener un número suficiente de individuos, la depuración se realiza de forma manual).

A continuación se muestra el detalle del procedimiento de CCDD:

Estadísticas descriptivas de los datos. Para cada especie, se identificaron las estadísticas descriptivas (media, mediana, desviación estándar, valor máximo y mínimo) de las variables: altura, diámetro normal y diámetro de copa.

Identificación de las especies sub-representadas y control de calidad manual. Se definió que una especie sub-representada es aquella que cuenta con un número menor a 10 individuos reportados en la base de datos. Este criterio se puede ajustar dependiendo del objetivo que se busca. Para este subconjunto de especies se desarrolló una base resumen que permitió analizar los datos de manera manual con criterios técnicos.

Identificación de las especies bien representadas y control de calidad automatizado. Se definió que una especie está bien representada cuando el número de individuos por especie es igual o mayor a 10. Para este subconjunto de especies, se desarrolló un control de calidad automatizado de las variables altura, diámetro normal, diámetro de copa, conforme a los siguientes criterios:

Se normalizaron las variables para cada especie:

Se transforma la variable z_i :

$$z_i = (x_i - \bar{x}) / s$$

Donde:

z_i = a un valor de una variable estandarizada

x_i = Una observación de la variable de interés

\bar{x} = Promedio de la variable de interés

s = Desviación estándar de la variable de interés

Se identificaron los valores atípicos con el criterio 3.5σ . Se creó una base en la que para cada variable se identificaron los individuos cuyo valor de “z” fue mayor a 3.5. Se tomó el criterio de 3.5 desviaciones estándar (σ), ya que las mediciones en campo son altamente controladas (e.g. cada uno de los árboles medidos en campo están etiquetados y se tiene la certidumbre de que los árboles que se medirán en un tiempo 2, son los mismos que en el tiempo 1).

Se obtuvieron las estadísticas descriptivas de las especies bien representadas excluyendo los valores atípicos (individuos cuyo valor de “z” fue mayor a 3.5).

Se obtuvieron las estadísticas descriptivas de los valores atípicos y se revisaron con criterio de experto. Para los datos de los SMIC, se dio énfasis a la revisión de las variables diámetro normal y altura, ya que son las variables más frecuentemente utilizadas para la estimación de la biomasa seca en ecuaciones alométricas.

Se propusieron métodos y criterios de corrección y exclusión de valores atípicos. En el caso de los SMICs, se revisaron los valores atípicos en escritorio con el conocimiento de los coordinadores de campo de las especies medidas. Posteriormente, con los datos depurados en la revisión en escritorio, se realizó una verificación en campo, aprovechando la remediación de los individuos del siguiente ciclo de colecta de datos.

ANEXO 2. Procedimiento de estimación de carbono en biomasa aérea en el SMIC- Quintana Roo

1. Tener la base de datos con el cálculo de la biomasa y carbono a nivel de individuo.
2. Separar los individuos que se encuentran bajo la condición 1 (vivos), ya que la base de datos también considera a los árboles muertos en pie y tocones.

Árboles vivos con dn de 2.5 a 7.5 cm

3. De los individuos vivos, elegir los árboles con diámetro menor a 7.5 cm.
4. Agrupar el contenido de carbono por individuo a nivel de cada sitio de 80 m², sumando el carbono de todos los individuos.
5. Asignar el estrato al que pertenece cada sitio de 80 m².
6. Revisar los datos y eliminar aquellos sitios que no tengan un valor de carbono en la biomasa de esta categoría diamétrica.
7. Agregar los datos a nivel de estrato a partir del cálculo del estimador de razón por hectárea, su varianza e incertidumbre. Para ello se considera que los individuos con dn de 2.5 a 7.5 cm se midieron en parcelas de 0.008 ha.
8. Contar el número de conglomerados y sitios de 80 m², por estrato.

Árboles vivos con dn de 7.5 a 20 cm

9. De la base de datos de individuos vivos, elegir aquellos con diámetro normal de entre 7.5 y 20 cm.
10. Agrupar el contenido de carbono por individuo a nivel de sitio de 400 m², sumando el carbono de todos los individuos.
11. Asignar el estrato al que pertenece cada sitio de 400 m².
12. Revisar los datos y eliminar aquellos sitios que no tengan un valor de carbono en la biomasa de esta categoría diamétrica.
13. Agregar los datos a nivel de estrato a partir del cálculo el estimador de razón por hectárea, su varianza e incertidumbre. Para ello considerar que los individuos con dn de 7.5 a 20 cm se midieron en parcelas de 0.04 ha.
14. Contar el número de conglomerados y sitios de 400 m², por estrato.

Árboles vivos con $dn > 20$ cm

15. De la base de datos de individuos vivos, elegir aquellos con diámetro normal mayor a 20 cm.
16. Agrupar el contenido de carbono por individuo a nivel de sitio de 400 y 1000 m² sumando el carbono de todos los individuos.
17. Asignar el estrato al que pertenece cada sitio periférico de 400 m². y el central de 1000 m²
18. Revisar los datos y eliminar aquellos sitios que no tengan un valor de carbono en la biomasa de esta categoría diamétrica.
19. Agregar los datos a nivel de estrato a partir del cálculo del estimador de razón por hectárea, su varianza e incertidumbre. Para ello considerar que los individuos con $dn > 20$ cm se midieron en parcelas de 0.04 ha y 0.1 ha, por lo que se debe asignar el área de manera diferencial.
20. Contar el número de conglomerados y sitios periféricos de 400 m². y el central de 1000 m², por estrato.

Biomasa < 2.5 cm de dn

21. Obtener el dato de carbono por superficie de muestreo.
22. Agregar los datos de carbono a nivel de sitio de 400 m².
23. Asignar un estrato a cada sitio de 400 m². Se consideró que el estrato de cada parcela de 1m² correspondía al del sitio de 400 m² más cercano.
24. Calcular el estimador de razón por hectárea, su varianza e incertidumbre. Para ello considerar que los individuos con $dn > 20$ cm se midieron en parcelas de 0.04 ha y 0.1 ha, por lo que se debe asignar el área de manera diferencial. Para ello se crean variables nuevas: el contenido de carbono al cuadrado, contenido de carbono por área, y el cuadrado del área de cada estrato.
25. Para hacer la estimación del contenido de carbono en la biomasa aérea, se agregan todos los datos (promedio de carbono, varianza e incertidumbre) de los cuatro componentes, por estrato.

26. Se suman todos los componentes para tener el contenido de carbono total en la biomasa aérea.
27. Se propaga la incertidumbre del almacén de carbono en la biomasa aérea a nivel de SMIC.



ANEXO 3. FORMATO DE CAMPO PARA LA COLECTA DE INFORMACIÓN DASOMÉTRICA DE ARBOLADO

FORMATO PARA SMIC INFORMACION DEL CONGLOMERADO

FECHA _____ NÚM. DE CONGLOMERADO _____

Estado _____ Municipio _____ Predio _____

Tipo de vegetación _____

Altitud _____ msnm. Pendiente _____ %
Responsable o tomador de datos _____

Fisiografía:

Valle 1 Terraza 2 Planicie 3 Barranca 4
Meseta 5 Ladera 6 Lomerío 7 Bajo 8

Exposición:

z 1 N 2 S 3 E 4 O 5 NE 6 SE 7 NO 8 SO 9

Número de sitio	Coordenadas UTM		Información Complementaria			Señal	
	X	Y	DATUM	No. WPT	Error de precisión	SI	NO
S1			WGS 84		_____m _____PDO P		
S2			WGS 84		_____m _____PDO P		
S3			WGS 84		_____m _____PDO P		
S4			WGS 84		_____m _____PDO P		

ANEXO 6. FORMATO DE REGISTRO DEL MLC

DATOS DEL CONGLOMERADO

Hoja 1/___

SMI: _____

NÚM. DE CONGLOMERADO: _____

FECHA: _____

ALTITUD: _____ msnm

Coordenadas UTM: () Coordenadas Geográficas: () ; Datum: WGS84 () Datum:
NAD27 ()

Transecto No. () X _____,
Y _____

Brigadista: _____

Capturista: _____

Lote o especie (1,2,3)