

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

CAPTACIÓN DE CARBONO EN PLANTACIONES DE PINO

por

**Juan Pablo GALLI
Stefano MASCHI**

**TESIS presentada como uno de los
requisitos para obtener el título de
Ingeniero Agrónomo**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2013**

Tesis aprobada por:

Director: -----

Ing. Agr. Guillermo Moras

Ing. Agr. Gustavo Daniluk

Ing. Agr. Rafael Escudero

Fecha: 29 de noviembre del 2013

Autor: -----

Juan Pablo Galli

Autor: -----

Stefano Maschi

AGRADECIMIENTOS

A las familias por el apoyo incondicional en todo momento.

A todos los integrantes de Fagro que nos apoyaron y tuvieron confianza en nosotros en todo momento, dedicando gran parte de su tiempo a cambio de nada; Gustavo, Guillermo, Carolina, Andres, Rafael, Fernando y Danila.

Especial agradecimiento también a toda la gente de Weyerhaeuser que nos dieron la oportunidad de hacer el trabajo en sus establecimientos, facilitándonos absolutamente todo lo que estuvo a su alcance. También al personal que nos acompañó en el campo todos los días, aportando gran ayuda. No lo hubiéramos logrado sin ellos.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISION BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1 CAMBIO CLIMÁTICO.....	3
2.2 PROTOCOLO DE KYOTO.....	7
2.2.1 <u>Mecanismo de desarrollo limpio (MDL)</u>	9
2.3 MERCADO DE CARBONO.....	12
2.3.1 <u>Mercado regulado</u>	13
2.3.2 <u>Mercado voluntario</u>	15
2.3.3 <u>Evolución, situación actual y perspectivas</u>	15
2.4. CICLO DE CARBONO.....	17
2.4.1 <u>Plantaciones forestales como sumideros de carbono</u>	20
2.5 ESTIMACIÓN DE VOLUMEN, BIOMASA, Y CAPTACIÓN DE CARBONO.....	21
2.5.1 <u>Estimación de volumen</u>	21
2.5.1.1 Desplazamiento de líquidos.....	21
2.5.1.2 Volumen aparente según los tipos dendrométricos.....	22
2.5.1.3 Volumen real de árboles enteros.....	22
2.5.2 <u>Estimación de biomasa</u>	25
2.5.2.1 <u>Métodos indirectos</u>	26
2.5.3 <u>Estimación de captación de carbono</u>	27
2.6 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA EN ESTUDIO.....	28
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	30
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	39
4.1 ANÁLISIS DEL MODELO 1.....	39
4.2 ANÁLISIS DEL MODELO 2.....	41
4.3 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN.....	44

5. <u>CONCLUSIONES</u>	46
6. <u>RESUMEN</u>	47
7. <u>SUMMARY</u>	48
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	49
9. <u>ANEXOS</u>	52

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Evolución del mercado de carbono 2005 – 2008.....	16
 Esquema No.	
1. Ciclo de actividades de un proyecto de MDL.....	11
2. Ciclo global del carbono.....	19
3. Resumen del procedimiento experimental.....	37
 Figura No.	
1. Suelos de prioridad forestal.....	29
2. Marcación del centro de la parcela.....	30
3. Determinación de la parcela circular.....	31
4. Numeración de árboles dentro de la parcela.....	31
5. Apeo de un árbol seleccionado.....	32
6. Medición de altura del árbol.....	33
7. Corte del fuste en trozas.....	33
8. Medición de diámetro inferior de trozas.....	33
9. Separación de hojas de las ramas.....	34
10. Pesado de trozas.....	35
11. Pesado de ramas y hojas.....	35
12. Toma de muestras de distintos componentes.....	36

Gráfica No.

1. Emisiones de GEI antropógenos.....	5
2. Escenarios de emisiones de GEI entre 2000 y 2100 (en ausencia de políticas climáticas adicionales), y proyección de las temperaturas en superficie.....	6
3. Cantidad predicha de calentamiento global evitado.....	7
4. Porcentaje de proyectos MDL por categoría.....	14
5. Q-Q plot modelo 1.....	40
6. Distribución de los residuos del modelo 1.....	40
7. Residuos versus predichos modelo 1.....	41
8. Q-Q plot modelo 2.....	42
9. Distribución de los residuos del modelo 2.....	43
10. Residuos versus predichos modelo 2.....	43

Tabla No.

1. Análisis de regresión lineal del modelo 1.....	39
2. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados modelo 1.....	39
3. Cuadro de análisis de varianza (SC tipo III) del modelo 1.....	39
4. Análisis de regresión lineal del modelo 2.....	41
5. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados modelo 2.....	41
6. Cuadro de análisis de varianza (SC tipo III) del modelo 2.....	42
7. Correlación de Pearson: coeficientes / probabilidades.....	44

8. Modelos de correlación seleccionados.....	45
--	----

1 INTRODUCCIÓN

La preocupación mundial generada por el calentamiento global a causa del cambio climático, ha incrementado considerablemente en las últimas décadas.

El cambio climático ha sido provocado principalmente por el aumento de concentraciones de CO₂ en la atmósfera, debido a las actividades humanas que afectan tanto su composición, como el balance de la radiación solar (Baethgen y Martino, 2000).

Las actividades que más han contribuido al cambio en la composición en la atmósfera son el incremento en la quema de combustibles fósiles, la deforestación, y la expansión de las áreas cultivadas (IPCC, 1996).

Para poder hacer frente a las inquietudes existentes, en 1988, la asamblea general de la ONU aprueba una resolución en la que se pedía “la protección del clima para las generaciones actuales y futuras de la humanidad”, propuesta por el gobierno de Malta. Fue así que, bajo los órganos rectores de la organización meteorológica mundial y del programa de las naciones unidas para el medio ambiente, se crea un nuevo organismo, el panel intergubernamental de cambio climático (IPCC), conformado por un grupo de científicos y expertos de todo el mundo, con el objetivo de analizar, actualizar información y asesorar a los gobiernos sobre el cambio climático (Álvarez, 2009).

Luego de confirmar en el primer informe realizado por el IPCC, en 1990, que la amenaza era real, se vio la necesidad de crear un foro internacional con el fin de poder generar acuerdos políticos entre las naciones sobre el cambio climático. Fue finalmente en marzo de 1992, que se crea el Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC), tras la aprobación unos meses antes de la asamblea general de la ONU, con el objetivo de proveer un marco de acción para la estabilización de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. La UNFCCC entra en vigor en 1994, y actualmente cuenta con 188 estados, los cuales se reúnen anualmente desde 1995 en las llamadas conferencias de las partes (COP) (Álvarez, 2009).

En 1997, se realiza la COP en Kioto, marcada y recordada por la aprobación del protocolo de Kioto. Dicho protocolo, compromete a los países catalogados como desarrollados (anexo I del protocolo de Kioto) a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, en al menos un 5% con respecto a las emisiones de 1990 en un período de compromiso desde 2008 hasta 2012 (ONU, 1998).

Según el protocolo, la absorción por sumideros de GEI que se relacionen con actividades de uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y selvicultura (forestación, reforestación y deforestación), podrán ser utilizadas a modo de cumplir los compromisos de reducción de emisiones. Además, el artículo 12 del protocolo, nombra y define un mecanismo de flexibilidad llamado mecanismo de desarrollo limpio (MDL), cuyo objetivo es ayudar a las partes no incluidas en el anexo I a lograr un desarrollo sostenible, y además, facilitar que las partes del anexo I cumplan sus compromisos cuantificados de limitación y reducción de emisiones.

A grandes rasgos entonces, las partes no incluidas en el anexo I del protocolo, se beneficiarán de las actividades de proyectos que tengan por resultado reducciones certificadas de las emisiones, y las partes incluidas en el anexo I podrán utilizar las reducciones certificadas de emisiones resultantes de esas actividades de proyectos, para contribuir al cumplimiento de una parte de sus compromisos cuantificados de limitación y reducción de las emisiones (ONU, 1998).

Es esta una de las principales causas por la cual toma vital importancia generar y lograr mecanismos que permitan estimar el carbono capturado por plantaciones forestales, de la manera más sencilla, rápida y confiable posible.

El objetivo de este estudio es estimar la captación de carbono de plantaciones forestales de pino, particularmente *Pinus taeda*, distribuidas en el norte del país, y poder vincularla mediante ecuaciones de regresión con parámetros de fácil medición, como ser diámetro a la altura del pecho (DAP), o altura total.

El estudio se organiza de tal manera de que se establezca un orden donde primariamente se sitúe la situación problema, es decir, el cambio climático, sus causas y consecuencias sobre las medidas mundiales a seguir. Posteriormente, se exponen las diversas formas que existen actualmente para calcular volumen, biomasa, captación de carbono, y como pueden relacionarse entre sí según diversos autores, para luego, finalmente, poder describir las metodologías llevadas a cabo en este estudio, analizar los resultados obtenidos, y las conclusiones que de éstos se desprendan.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 CAMBIO CLIMÁTICO

Una problemática muy estudiada y discutida a nivel mundial en los últimos años, es el cambio climático producto del calentamiento global, en teoría debido tanto a causas naturales (Crowley y North, 1988) como antropogénicas (Oreskes, 2004).

En 1988 la organización meteorológica mundial y el programa ambiental de naciones unidas estableció un grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático conocido como IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Desde 1990 el IPCC ha publicado informes de evaluación sobre el tema siendo el más actual el del año 2007.

En 1992 se reunieron los estados como sujetos originarios del derecho internacional en la conferencia sobre medio ambiente y desarrollo en Rio de Janeiro, y conscientes de la problemática del cambio climático y de sus posibles consecuencias a nivel mundial, se acordó el texto de la UNFCCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático), la cual entró en vigor el 21 de marzo de 1994.

Según el artículo 2 de la UNFCCC, el objetivo de la misma es *“lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencia antropógenas peligrosas en el sistema climático. Ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible.”* Mediante este objetivo se acordó que todas las partes del convenio ya sean industrializadas o en desarrollo adoptarían políticas y medidas para mitigar el cambio climático.

A partir del artículo 7 de la UNFCCC, se establece que el órgano superior de la misma será la COP (conferencia de las partes), teniendo entre otras responsabilidades la implantación de la propia convención y las decisiones que se adopten en ellas.

Para el tratamiento del cambio climático y el concepto del desarrollo sostenible, la convención incorporó principios esenciales: el principio que define al cambio climático como una preocupación común de la humanidad, el principio de las

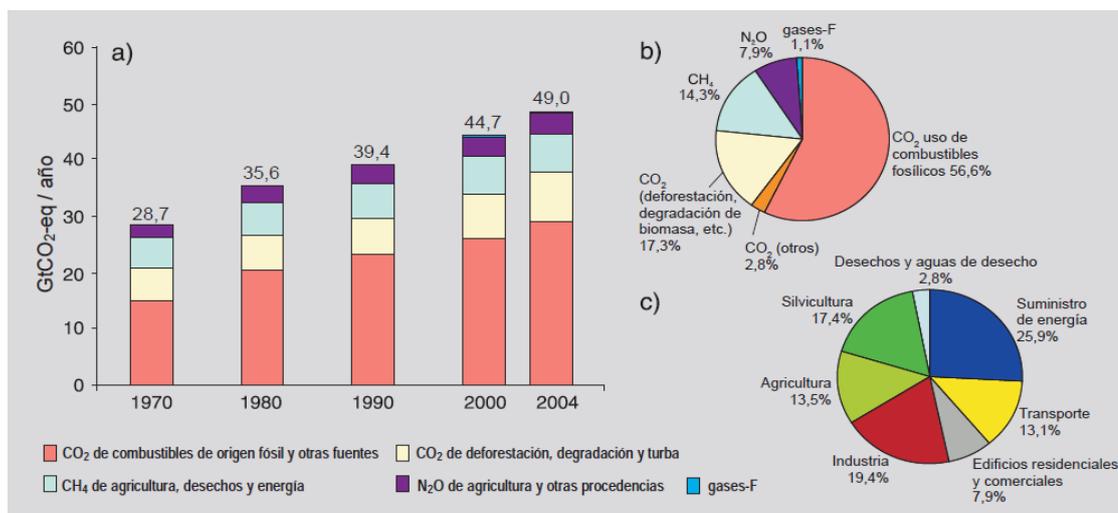
responsabilidades comunes pero diferenciadas de los países con diferentes niveles de desarrollo, el principio precautorio, y el principio de la equidad en la asignación de cargas para mitigación y adaptación para la nueva situación.

La convención utiliza el término de cambio climático solo para referirse al cambio por causas humanas. Por otro lado, el IPCC utiliza el término cambio climático como un cambio en el estado del clima identificable que persiste durante un período de tiempo prolongado, como ser decenios o períodos más largos. Toma en cuenta cualquier cambio del clima a lo largo del tiempo, ya sea debido a la variabilidad natural o como consecuencia de la actividad humana.

La principal causa del cambio climático es el aumento en la concentración de ciertos gases en la atmósfera denominados GEI (gases de efecto invernadero), por su capacidad de retener la radiación infrarroja, destacándose el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), el ozono (O_3), los clorofluorocarbonos (CFC's) y el vapor de agua (Álvarez, 2009).

El llamado efecto invernadero es un proceso natural posible gracias a los GEI, los cuales retienen parte de la radiación infrarroja, reflejada por la tierra y la atmósfera, proporcionando calor al planeta. El problema aparece al aumentar las concentraciones de dichos gases por encima de lo adecuado, provocando una mayor retención de luz infrarroja y por lo tanto un aumento de temperatura.

Las concentraciones de los GEI han aumentado notoriamente por efecto de las actividades humanas desencadenadas por la revolución industrial, actualmente muy superiores a los valores preindustriales. La variación de la concentración de estos gases en la atmósfera altera el equilibrio energético del sistema, siendo el gas que más contribuye el CO_2 , debido a su alta concentración en la atmósfera y a las grandes cantidades que se emiten anualmente.



Gráfica No. 1. Emisiones de GEI antropógenos.

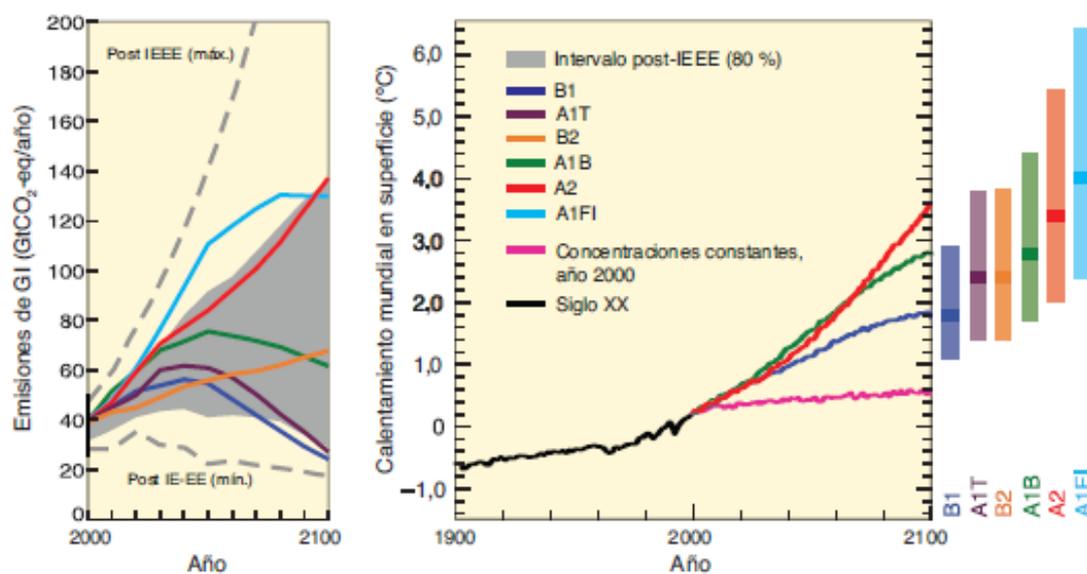
Fuente: IPCC (2007).

El CO₂ es el GEI antropógeno más importante y sus emisiones anuales aumentaron en torno a un 70% entre 1970 y 2004. Esto se debe principalmente al uso de combustibles fósiles, y en menor medida, al cambio de uso de la tierra. Observaciones en todo el mundo evidencian cambios en los climas regionales que afectan a los sistemas naturales debido principalmente a un aumento de temperatura. De mantenerse o ascender la tasa de emisiones de GEI, aumentaría el calentamiento global provocando numerosos cambios en el sistema climático en el siglo XXI, probablemente mayores a los del siglo XX (IPCC, 2007).

Las concentraciones de CO₂ y CH₄ en la atmósfera en el año 2005 excedieron considerablemente los valores naturales registrados de los últimos 650.000 años. Al aumento de concentración de CO₂ explicado en el párrafo anterior, se le suman las concentraciones de CH₄ y N₂O. Se estima que el aumento en las concentraciones de CH₄ se debe fundamentalmente a la agricultura y al uso de combustibles fósiles, mientras que el N₂O se debe principalmente a las actividades agrícolas (IPCC, 2007).

Los modelos de simulación para las pautas del calentamiento global y su variación contemplan las influencias de las actividades antropógenas. Los cambios de temperatura observados son a escala continental ya que aun no se ha podido simular y atribuir cambios a escalas inferiores (IPCC, 2007). Se estima que las emisiones mundiales de GEI seguirán aumentando en los próximos decenios. Por esta razón el IPCC generó un informe especial sobre escenarios de emisiones, el cual proyecta un aumento de las emisiones mundiales de GEI de entre 25 y 90% (CO₂-eq)

entre 2000 y 2030, suponiendo que los combustibles fósiles sigan siendo la principal fuente de energía. Debido a esto se prevé un aumento del calentamiento global para los próximos 100 años del orden 0.5°C con emisiones constantes, o hasta 4°C en el peor de los escenarios (IPCC, 2007).



Gráfica No. 2. Escenarios de emisiones de GEI entre 2000 y 2100 (en ausencia de políticas climáticas adicionales), y proyección de las temperaturas en superficie.

Fuente: IPCC (2007)

En la gráfica de la izquierda se representan 6 escenarios testimoniales de emisiones mundiales de GEI en ausencia de políticas climáticas. Las emisiones abarcan los gases CO_2 , CH_4 , N_2O y F (gases fluorados). Por otro lado a la derecha se representan mediante líneas continuas diversos promedios mundiales de calentamiento en superficie según distintos escenarios expresados como continuación de las simulaciones del siglo XX. Las barras indican la estimación óptima y el intervalo probable para cada escenario testimonial, en el período 2090-2099 (IPCC, 2007).

Las proyecciones indican un calentamiento de aproximadamente 0.2°C por decenio para los próximos 20 años para toda una serie de escenarios de emisiones IEEEE. De haberse mantenido constantes las concentraciones de todos los GEI en los niveles del 2000, habría de esperarse un posterior calentamiento de aproximadamente 0.1°C por decenio. A partir de ese punto, las proyecciones de temperatura son cada vez más dependientes de los escenarios de emisiones (IPCC, 2007).

desarrollados, catalogados como anexo II, los cuales deben prestar ayuda económica o tecnológica a países en desarrollo que formen parte de la convención de modo que puedan enfrentar los impactos del cambio climático. Asimismo, los países en vías de desarrollo aceptaron los objetivos y metas del protocolo teniendo en cuenta el principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas de la UNFCCC, por lo cual no asumieron obligaciones cuantitativas de reducción de emisiones.

Según el artículo 2 del protocolo de Kioto, los países parte del anexo I se comprometen a aplicar políticas y medidas de conformidad, como ser el fomento de la eficiencia energética, protección y mejora de los sumideros y depósitos de GEI, así como promover la investigación y desarrollo de formas nuevas de energía renovable ecológicamente razonables, de forma de reducir o limitar las emisiones de GEI. Con este fin, las partes procurarán intercambiar experiencia e información sobre tales políticas y medidas, en particular concibiendo las formas de mejorar su comparabilidad, transparencia y eficacia.

El protocolo de Kioto provee a los países partes ciertos mecanismos para ayudar a cumplir con los compromisos y reducir las emisiones de GEI, dichos mecanismos son: la aplicación conjunta (AC), el mecanismo de desarrollo limpio (MDL) y el comercio de emisiones.

La AC se describe en el artículo 6 del protocolo. Es un mecanismo que permite contabilizar a las partes del anexo I las unidades de reducción de emisiones obtenidas en proyectos realizados en partes del anexo I. Dichos proyectos tienen como objetivo la reducción de emisiones antropógenas o el incremento de la absorción de GEI (ONU, 1998).

El MDL (artículo 6) tiene el propósito de ayudar a los países en desarrollo a lograr un desarrollo sostenible y contribuir al objetivo del protocolo mediante la ejecución de proyectos de tecnologías limpias (generados por los países del anexo I), así como ayudar a los países del anexo I mediante la generación de Certificados de Reducción de Emisiones (CER's), los cuales pueden ser contabilizados por los países del anexo I (ONU, 1998).

Finalmente se encuentra el denominado comercio de emisiones (artículo 17), el cual permite la compra-venta de certificados de emisiones entre las partes del anexo I. Aquellos que reduzcan sus emisiones más de lo comprometido podrán vender certificados de emisiones de esos excedentes a los países que no hayan alcanzado su compromiso (ONU, 1998).

La reducción de emisiones presenta ciertos límites según los mecanismos de flexibilidad que se utilicen. Las unidades de reducción atribuidas al comercio de emisiones no tiene límites, mientras que para los MDL y AC no se puede superar el 2.5%. Además, las actividades de forestación y reforestación de los MDL no podrán superar el 1% de la cantidad atribuida.

El objetivo perseguido por las naciones unidas mediante estos mecanismos, es facilitar el cumplimiento de los compromisos de reducción y/o limitación a las partes del anexo I, y además, en el caso del MDL, lograr un desarrollo sostenible de los países no anexo I (países en desarrollo), mediante la transferencia de tecnologías limpias y eficientes.

En cuanto al aspecto ambiental, estos mecanismos se basan en el hecho de que el cambio climático es un problema de carácter global, por lo que es indistinto que el cumplimiento de las reducciones se den en uno u otro país, ya que el objetivo de la convención y del protocolo es reducir los niveles globales de GEI en la atmósfera (Serra, 2005).

El mecanismo que más importa en el caso de Uruguay, es el MDL, ya que es el único mecanismo en el que una de las partes involucradas es un país considerado en desarrollo. Por esta razón, se explica a continuación, algunos detalles fundamentales para el funcionamiento de este mecanismo.

2.2.1 Mecanismo de desarrollo limpio

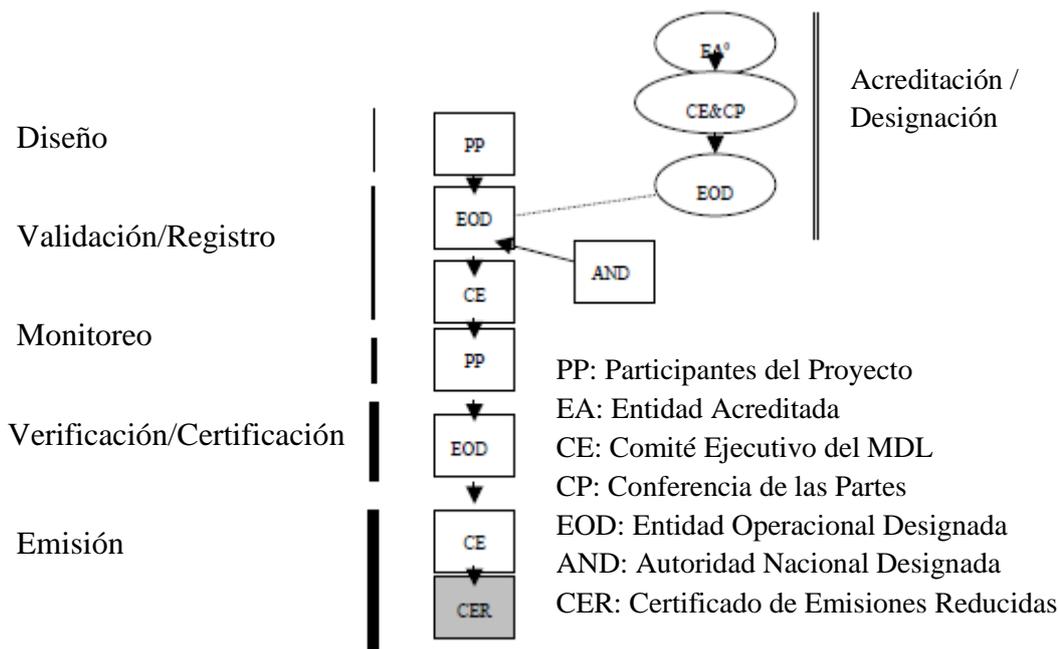
Desde el punto de vista de los países desarrollados, el MDL constituye la única forma de incluir a los países en desarrollo, mientras que para estos últimos, es el único mecanismo de flexibilidad que permite la obtención de financiamiento mediante proyectos provenientes de países desarrollados que reduzcan emisiones de GEI (Serra, 2005).

De esta manera, los países en desarrollo se verán beneficiados de las actividades de proyectos que tengan por resultado reducciones certificadas de las emisiones. Las partes incluidas en el anexo I podrán utilizar las reducciones certificadas de emisiones resultantes de estas actividades para contribuir al cumplimiento de una parte de sus compromisos cuantificados de limitación y reducción de emisiones.

El MDL es regido por un acuerdo político alcanzado en la COP-6 en Bonn, y por las normas aprobadas en la COP-7 en Marrakech, en el año 2001. En este

contexto se establecieron algunas modalidades y procedimientos generales para poder acceder al MDL:

- Inicio de los proyectos; se elegirán solo los proyectos que comiencen a partir del año 2000 y que sean presentados para su registro antes del 31 de diciembre del 2005.
- Desarrollo sustentable; los proyectos deben contribuir a conservación de la biodiversidad y al uso sustentable de los recursos naturales mediante el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sustentable del país anfitrión.
- Adicionalidad; la reducción de emisiones reales generadas por proyectos deberán ser medibles, de largo plazo y adicionales a las que hubieran ocurrido en la ausencia de proyecto.
- Certificación; una tercera parte independiente llamada entidad operacional (EO), deberá certificar la reducción de emisiones, y a su vez tendrá que ser acreditada por el comité ejecutivo (CE) del MDL.
- Las partes; los participantes del MDL lo harán en forma voluntaria, teniendo como requisito ser partes firmantes del protocolo de Kioto, y debiendo designar una autoridad nacional para el MDL.
- Períodos de créditos; el período en el cual el proyecto generará créditos podrá ser de 7 años con posibilidad de dos renovaciones, o de 10 años sin posibilidad de renovación. No queda claro aún si esta regla puede ser aplicada a proyectos forestales, ya que estos períodos solo corresponden a proyectos de energía.
- Actividades forestales de uso de la tierra y de cambio en el uso de la tierra (LULUCF); en el primer período de compromiso las únicas actividades incluidas en el MDL son la forestación y la reforestación.



Esquema No. 1. Ciclo de actividades de un Proyecto de MDL.

Fuente: Chidiak et al. (2003)

Primeramente, los participantes deben presentar ante la entidad operacional designada (EOD) el diseño del proyecto con la información requerida utilizando el documento del diseño de proyecto desarrollado por el comité ejecutivo (CE).

Posteriormente la EOD se encargara de la validación, evaluando la validez de la línea de base y el plan de monitoreo, y así presentar el proyecto ante el CE. Este último aceptará o no el proyecto, y en caso de hacerlo, el mismo podrá ser registrado.

Luego de comenzado el proyecto, los participantes del proyecto (PP) deberán monitorear las actividades de captura de GEI, según las metodologías propuestas en el proyecto. Se verificará a través de una EOD diferente, que las reducciones monitoreadas por los PP efectivamente tendrán lugar como resultado de las actividades del proyecto.

La misma EOD encargada de la verificación, será la encomendada de certificar el proyecto, dejando constancia por escrito que durante cierto período de tiempo, el proyecto, mediante sus actividades, logró reducir las emisiones antropogénicas de GEI.

Finalmente, el CE emitirá y distribuirá entre los PP los certificados de emisiones reducidas (CER's) correspondientes, según lo requerido.

2.3 MERCADO DE CARBONO

El mercado de carbono se puede definir como el comercio de unidades de reducciones de emisiones GEI entre países, gobiernos o empresas, de manera de cumplir con los compromisos adquiridos o exigencias impuestas (Serra, 2005). El mismo se ha fortalecido a partir de la entrada en vigor del protocolo de Kioto y con el inicio de operaciones del sistema del comercio de emisiones de la unión europea (Galarza, 2008).

El mercado de carbono se basa en el hecho de que los GEI se encuentran dispersos uniformemente por toda la atmósfera, y por lo tanto, mecanismos de reducción de emisiones serían viables en cualquier punto del planeta, no importando el lugar donde se emitan.

La captura de carbono se define en dólares por tonelada de carbono acumulado. En este contexto, se pueden divisar dos tipos de transacciones, el comercio de derechos de emisión, y las transacciones basadas en proyectos. En el primero, el comprador adquiere derechos de emisión creados y asignados por organismos reguladores pudiendo haber sido determinadas por la fijación de límites e intercambio de emisiones, por las unidades de las cantidades atribuidas (UCA's del protocolo de Kioto), o a través de los derechos de emisión del régimen del comercio de emisiones de la unión europea. En el segundo, el comprador adquiere certificados de reducción de emisiones (CER's), los cuales provienen necesariamente de un proyecto el cual produce reducciones cuantificables de GEI, en comparación a un escenario sin proyecto. Estas transacciones tienen como objetivo principal cumplir con los regímenes regulatorios, pero también existen otros, los cuales cumplen con objetivos de mitigación voluntaria (Serra, 2005).

Por ser Uruguay un país en desarrollo, puede participar únicamente en las transacciones basadas en proyectos mediante los CER's que se generan por medio de proyectos de MDL. Cada CER es definido de acuerdo al artículo 12 del protocolo de Kioto, como una tonelada métrica de dióxido de carbono equivalente. El CER puede ser considerado un derecho, un bien o un activo, aunque el título que lo representa no consigne un valor monetario (Galarza, 2008).

Cada tonelada de carbono debería tener un valor económico ligado a los costos marginales del cambio climático. Dicho valor resulta engorroso de estimar

debido a la gran cantidad de proyecciones y supuestos que se requiere. Diversos autores han estimado costos de entre 5 y 20 dólares por tonelada de carbono. Sin embargo, en la mayoría de los casos, el valor se ha establecido a través de los costos asociados al desarrollo de los proyectos (Álvarez, 2009).

Debido a esto, es posible que exista un amplio rango de valores por unidad de carbono capturado, por lo que probablemente se de algún tipo de discriminación entre proyectos, como puede ser el riesgo de los mismos, la reputación de los países, y la calidad en el monitoreo. En consecuencia, es importante que el país cuente con un marco legal institucional que permita identificar, planear, ejecutar y administrar proyectos de captura de carbono, y por encima de esto, sea capaz de tener un adecuado monitoreo y alta credibilidad en la calidad del servicio brindado (Álvarez, 2009).

En cuanto a la oferta, Asia es el que posee mayor cantidad de proyectos de reducción de emisiones (45% del total), seguido por Latinoamérica con un 35% del volumen total, destacándose Brasil y Chile. Como puede apreciarse, el mercado se concentra en unos pocos países, asimismo surgen algunos más recientes como ser China y México (Serra, 2005).

Existen dos tipos de mercado de carbono, los mercados regulados y los mercados voluntarios. El primero está regulado a través de la ONU, que tiene su origen en los mecanismos de flexibilidad que ofrece el protocolo de Kioto (Álvarez, 2009). Por otro lado, el mercado voluntario es el comercio de créditos que se produce sobre una base facultativa (FAO, 2010).

Ambos mercados difieren considerablemente en sus dimensiones, en 2008 por ejemplo, el mercado regulado comercializó 119.000 millones de dólares, mientras que en el voluntario, la comercialización fue de 704 millones de dólares (FAO, 2010).

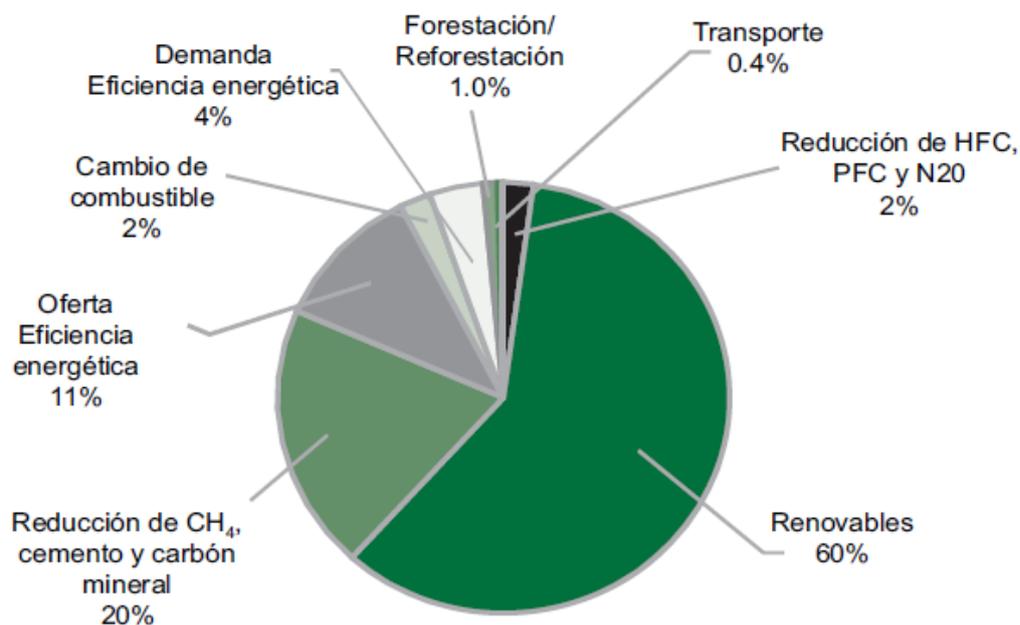
2.3.1 Mercado regulado

Este mercado está caracterizado por tener una importante regulación, contar con la seguridad y la ventaja de estar respaldado por la ONU, pero con la desventaja de tener mucha burocracia y lentitud para la aprobación final, y consecuentemente, muchos costos de transacción (Álvarez, 2009).

Según Álvarez (2009), FAO (2010), el MDL representa el mecanismo de flexibilidad más interesante en el mercado regulado. Esto se debe a que supone la

compra directa de proyectos de reducción de emisiones ejecutados por países en desarrollo.

Hoy en día existen en el entorno de 10 a 15 sectores sobre los cuales se han desarrollado metodologías para la elaboración de proyectos MDL, dentro de los cuales se pueden destacar el sector de industria, energía, agricultura, industrias químicas e industria manufactureras (Álvarez, 2009).



Gráfica No. 4. Porcentaje de proyectos MDL por categoría.

Fuente: FAO (2010)

Los proyectos de MDL de forestación y reforestación han sido muy restringidos, representando solo el 1% de los proyectos. En julio del 2009, tan solo había 6 proyectos registrados y 43 presentados para su validación (FAO, 2010).

Una posible razón de este fenómeno es que los países inversionistas, al comprar CER's tienden a minimizar los riesgos. Para esto deben tener la certeza de que los proyectos cumplirán con sus reducciones a tiempo con un alto grado de satisfacción garantizada. Los proyectos fuera del sector forestal cuentan con una infraestructura tecnológica comprobada, fácil medición de emisiones y un desarrollo más rápido, por lo que son más interesantes para atraer inversiones extranjeras que

los proyectos de captura de carbono mediante programas de forestación y reforestación (Álvarez, 2009).

2.3.2 Mercado voluntario

Estos mercados representan una posibilidad para aquellas demandas y ofertas de actividades que aún no han sido cubiertas por los esquemas obligatorios. En este contexto, los proyectos forestales han captado gran atención fundamentalmente por su gran variedad de beneficios sociales y ambientales que los hacen aptos para aquellas empresas (fundamentalmente capitales privados), y otros agentes como ONG's que buscan mejorar su perfil medio ambiental o representar un ejemplo (Álvarez, 2009).

Según Álvarez (2009), estos proyectos vienen liderando los mercados voluntarios de carbono desde el 2006, generando créditos con valores que oscilan entre 6.8 y 8.2 dólares por tonelada de carbono. Sin embargo dichos proyectos han sufrido un franco descenso en los últimos tres años, pasando del 36% en el 2006, al 11% en el 2008. Esta disminución podría atribuirse a las dificultades similares que se afrontan en los mercados regulados, entre ellos, contabilización imprecisa y dificultad de permanencia (FAO, 2010).

Según el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), citado por Álvarez (2009), este mercado es caracterizado por la falta de regulación, gran diversidad de opciones que lleva a generar confusión, oportunidades para el desarrollo de innovaciones, bajos costos de transacción, atención a otros beneficiarios fuera del protocolo de Kioto, ser rápidos y por ser pequeños proyectos de compensación.

Existe una gran cantidad de mercados voluntarios, entre ellos están el estándar voluntario de carbono (VCS), el estándar CBB (Climate Community and Biodiversity Alliance), estándar de oro, la bolsa climática de Chicago (CCX), la norma ISO 14064, carbono social, estándares CCB (Clima Comunidad y Biodiversidad), green E GHG y el VER+.

2.3.3 Evolución, situación actual, y perspectivas

A continuación se presenta la tabla 1, la cual refleja la evolución de los mercados de carbono en los últimos cuatro años, y su magnitud global en porcentaje total de volumen manejado.

Cuadro No. 1. Evolución del Mercado de Carbono 2005 – 2008.

	2005	2006	2007	2008
	Tasas de participación global			
Mercado de proyectos de inversión (MDL)				
Mecanismos regulados	24.91%	20.46%	20.89%	26.19%
MDL primario	22.25%	18.58%	11.60%	5.16%
MDL secundario	2.03%	1.42%	8.51%	20.80%
Implementación conjunta	0.63%	0.45%	0.78%	0.23%
Mercado voluntario y otros mecanismos	1.72%	0.47%	0.41%	0.31%
Sub Total	26.64%	20.93%	21.30%	26.50%
Mercado de derecho de inversiones (Voluntarios)				
Régimen de Comercio EU	72.78%	78.23%	78.23%	72.74%
Nueva Gales del Sur	0.54%	0.72%	0.35%	0.14%
Bolsa del Clima de Chicago	0.03%	0.12%	0.11%	0.24%
Régimen de Comercio UK	0.01%	0.00%	0.00%	0.36%
Sub Total	73.36%	79.70%	78.70%	73.50%
TOTAL	100%	100%	100%	100%

Fuente: Avilés (2008)

Los primeros proyectos de reducción de emisión de GEI, comenzaron a tener peso en los años 90, a través de compañías industriales y organizaciones ambientales sin fines de lucro que se asociaban para plantar y conservar bosques con el objetivo de compensar las emisiones antrópicas (Reali, 2010).

A partir de la creación del protocolo de Kioto, este tipo de transacciones de carbono forestal, pasaron a un segundo plano debido a las restricciones y complejidades generadas por el mismo. Por esta razón, el mercado de carbono voluntario ha quedado en una posición no del todo clara. Por un lado, algunos inversores opinan que los proyectos de mitigación forestal son medianamente seguros por involucrar la compra de tierra y en algunos casos inclusive, la producción de madera. Sin embargo, otros inversores prefieren mantenerse lejos de estas inversiones, ya que las consideran complejas por su metodología, formulación y aprobación (Reali, 2010).

Sin embargo, en los últimos años, se ha incrementado la credibilidad de dichos proyectos, debido a la evolución que se ha logrado en las técnicas sobre cómo medir y monitorear el carbono almacenado en las plantaciones, incluyéndose la biomasa e incluso el carbono orgánico del suelo y el mantillo. Esto generó un

aumento en la aceptación política, de forma tal, que en el 2007, se reconoció por primera vez la importancia que tendría realizar proyectos de evitación de deforestación y degradación de bosques (REDD) (Reali, 2010).

Hoy en día, según Reali (2010), figuran unos 226 proyectos forestales y agroforestales distribuidos en 40 países con el objetivo de mitigar el cambio climático. Los mismos han logrado capturar de la atmósfera un volumen total de 20,8 millones de toneladas de CO₂. A modo de ejemplo, el valor promedio de transacciones realizadas en 2008 por medio del CCX (Chicago Climate Exchange) fue de 4,07 dólares por tonelada de CO₂.

Los mercados de derechos de emisiones y de certificados de reducción de emisiones solo estarán protegidos por las naciones unidas hasta el año 2012, año en el cual culmina la vigencia del protocolo de Kioto. Esto genera preocupación, fundamentalmente en los inversionistas, ante la decisión de invertir en proyectos a largo plazo como son los de MDL. Sin embargo, debido a la confianza que existe en el desarrollo de este mercado, muchas entidades propusieron la extensión del protocolo, o la insaturación de un mercado general por al menos 10 años más (Avilés, 2008).

No obstante, se estima que el futuro del mercado de carbono, ya sea forestal o no, depende en mayor medida de las iniciativas privadas y locales, que de los acuerdos internacionales. También existe una esperanzadora propuesta llevada a cabo por el ministro de medio ambiente francés, la cual pretende establecer para 2011, un impuesto a las emisiones de GEI asociados a cualquier producto importado a la unión europea (UE). De concretarse esta idea, generaría un gran impacto en las exportaciones hacia la UE, el cual podría ser absorbido en gran parte mediante la compensación de emisiones mediante proyectos forestales, los cuales figuran como los más costo efectivos en reducción de emisiones (Reali, 2010).

2.4 CICLO DEL CARBONO

Aproximadamente el 50% del peso seco de cualquier organismo está constituido por compuestos de carbono, los cuales se obtienen mediante procesos metabólicos realizados durante su crecimiento y desarrollo, y se liberan post muerte mediante descomposición. Esto lo hace uno de los compuestos más importantes para la vida (Picos y Covelo, 2002).

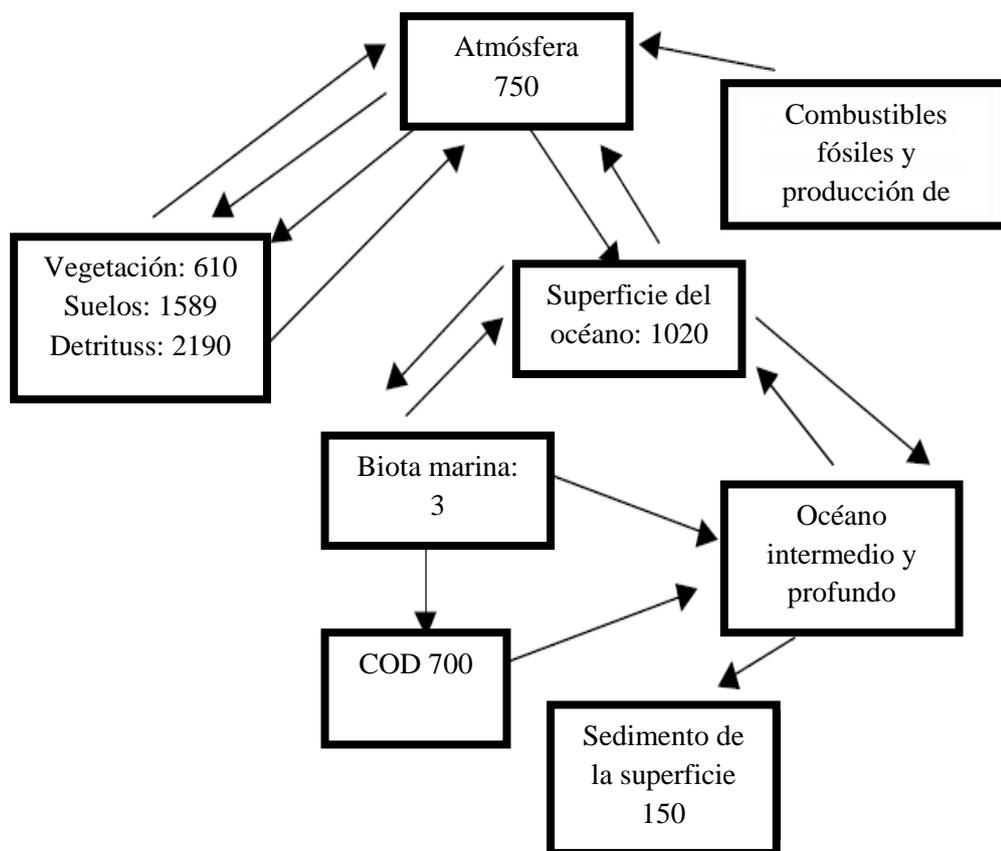
El carbono en la naturaleza se halla en el agua como carbonatos (compuestos carbónicos disueltos) y en el aire como CO₂. Podría considerarse el

inicio del ciclo biológico del carbono como la fijación de CO₂ atmosférico a través de organismos fotoautótrofos (plantas y algunos microorganismos). El gas en cuestión es absorbido por las plantas mediante estomas presentes en las hojas. Una vez absorbido, es utilizado entre otras cosas para formar carbohidratos mediante el ciclo de Calvin-Benson, en el cual simultáneamente se libera oxígeno hacia la atmósfera (Picos y Covelo, 2002).

Parte del carbohidrato formado por la planta es utilizado para obtener energía mediante la respiración, proceso en el cual se libera CO₂ a la atmósfera. Asimismo, las plantas podrán ser consumidas por otros animales, los cuales a su vez podrán servir como alimento de otros. Todos ellos respiran y liberan CO₂, y además, inevitablemente mueren y su descomposición da como resultado el regreso del CO₂ a la atmósfera.

Según Sampson et al., citados por Álvarez (2009), una forma de sustracción de carbono de la atmósfera, son los cambios químicos que pueden sufrir los organismos cuando son comprimidos sin ser atacados por las bacterias, dando lugar, luego de miles de años, a la formación de turba, lignita, carbón y petróleo. Sin embargo, el accionar del hombre ha devuelto cierta parte de CO₂ a la atmósfera mediante la generación de trastornos geológicos, obras de minería, perforaciones y también por la quema de petróleo.

No obstante, las cantidades más importantes de carbono en la tierra están bajo la forma de carbonatos en rocas como el mármol y la piedra caliza, y en el fondo del mar formando otras rocas generadas a partir de los sedimentos de animales y plantas muertas. Existe una constante liberación de carbono por la erosión que sufren las rocas, empero, una continua formación de rocas en el fondo del mar, logrando de este modo que el ciclo se mantenga relativamente constante (Sampson et al., citados por Álvarez, 2009).



Esquema No. 2. Ciclo global del carbono.

*Los números de las cajas indican el tamaño de cada reservorio en GtC.

*Cada flecha indica la magnitud del flujo en GtC/año.

*COD = carbono orgánico disuelto.

Fuente: Montoya et al. (2008)

Según se aprecia en el esquema 2, el carbono total en el planeta, está estimado en unos 45.112 GtC, distribuyéndose en formas orgánicas e inorgánicas en la atmósfera, la tierra y el agua. El reservorio de carbono más importante en el globo está representado por los océanos, los cuales contienen aproximadamente un 87% del total, teniendo en cuenta la superficie del océano, el océano intermedio y profundo, la biota marina, el carbono orgánico disuelto y el sedimento. Los ecosistemas terrestres representan entre el 9 y el 11% del carbono total, dentro de los cuales se pueden encontrar a los bosques como principales reservorios de dicho gas. Finalmente, solo entre el 1 y 2% del carbono mundial está en la atmósfera. Por esta razón, es tan importante encontrar todas las maneras posibles de mantener el

equilibrio, ya que pequeños modificaciones podrían causar (o ya lo están haciendo) grandes desajustes mundiales.

2.4.1 Plantaciones forestales como sumideros de carbono

Existen diversas fuentes de carbono, entre las cuales se pueden encontrar la combustión, la oxidación de materia orgánica, la respiración, las erupciones volcánicas, la actividad industrial, los cambios en el uso de la tierra; pero también diversas formas de fijarlo. Aquellos procesos o sistemas capaces de fijar dióxido de carbono son llamados sumideros de carbono, entre los cuales están los océanos (disolución del gas), la fotosíntesis y la formación de carbonatos (Picos y Covelo, 2002). Obviamente, el principal enfoque será en los sistemas forestales, los cuales utilizan como proceso de fijación, la fotosíntesis.

Houghton y Skole, citados por Montoya et al. (2008), señalan que la vegetación y el suelo con manejo forestal, retienen entre 20 y 100 veces más carbono por unidad de superficie que los sistemas agrícolas. Por lo tanto, estiman que la liberación de carbono a la atmósfera por los cambios del uso del suelo, principalmente la deforestación, entre 1850 y 1987, está en un rango de 80 a 150 GtC. Al generar estos cambios de uso en el suelo, existen diversos componentes los cuales generan flujos de carbono con la atmósfera, entre ellos se encuentran la quema asociada con los cambios de uso del suelo, la descomposición de la biomasa *in situ*, la oxidación de la madera cortada y la regeneración de la masa vegetativa (este último caso actúa como fijación de carbono).

En el caso de los sistemas forestales, para poder afirmar que se está capturando, o que se va a capturar carbono, es necesario comparar dos escenarios. Uno denominado línea base, el cual se caracteriza por ser el bosque o el ecosistema que fuere en su estado “natural” o no modificado. El segundo escenario es el del proyecto, es decir, las modificaciones que se introducen para lograr una gestión forestal sostenible. La diferencia que se produzca entre ambos escenarios, será la cuantificación de carbono neto capturado que tiene el proyecto forestal (Montoya et al., 2008).

Más allá de que toda la vegetación, a través de la fotosíntesis es capaz de asimilar CO₂ en mayor o menor medida, las especies arbóreas capturan y conservan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre. Tan es así, que según Montoya et al. (2008), los bosques participan con el flujo anual de carbono de la atmósfera y de la superficie de la tierra en un 90%, y que por esta razón, la forestación podría compensar las crecientes emisiones de CO₂ en dos maneras:

- Incrementando reservorios de anhídrido carbono a través del aumento de la masa de material maderable ya sea mediante el crecimiento de árboles como por la extracción de madera. Es recomendable que la madera utilizada comercialmente sea con objetivos durables (muebles, aserrado, etc), de modo de lograr una mayor efectividad a largo plazo en la captura de carbono. Cuando el árbol, o visto en su conjunto, el bosque, llega a la madurez, se alcanza un equilibrio el cual, los procesos de respiración y fotosíntesis se igualan, generando desde ese momento un balance entre captación y liberación de CO₂ igual a cero. Entonces, el carbono previamente acumulado se mantendrá almacenado, y el área actuará como reservorio, estimándose a largo plazo, una captura neta que puede alcanzar un rango de entre 80 y 350 toneladas de carbono por hectárea.

- Protegiendo bosques y suelos naturales que actúan como sumideros de carbono. Al destruir sistemas boscosos, se estima que se liberan entre 50 y 400 tC/ha. Por esta razón, se hace sumamente importante conservar los almacenes de carbono como forma de evitar la liberación de CO₂ a la atmósfera si se toma como medida a largo plazo. De todos modos, hay que ser cuidadosos con este régimen de mitigación, ya que la protección de cierta área forestal, podría estar presionando indirectamente la eliminación de otra. Indefectiblemente entonces, se requieren de esquemas integrados de manejo de recursos, de manera de cerciorarse que no ocurrirá dicho fenómeno.

2.5 ESTIMACIÓN DE VOLUMEN, BIOMASA Y CAPTACIÓN DE CARBONO

Al ser el objetivo principal el cálculo de captación de carbono a partir de mediciones más sencillas como diámetro o altura, es necesario repasar una serie de ecuaciones intermedias que podrían ser usadas para alcanzar dicho objetivo.

2.5.1 Estimación de volumen

En primera instancia, una vez obtenidos los datos a campo, de diámetro y altura, se es posible calcular el volumen, para ello se cuenta con diversos métodos.

2.5.1.1 Desplazamiento de líquidos

Uno de los métodos más exactos para la medición de volumen, el cual no fue utilizado, pero es importante mencionar, es el de desplazamiento de líquidos. Si se tiene un recipiente con cierta cantidad conocida de volumen de un líquido, al sumergir un sólido cualquiera completamente en el recipiente, el volumen

desplazado del líquido será igual al volumen del sólido sumergido. Este método suele ser usado cuando se tiene cuerpos irregulares, que no permiten calcular su volumen mediante ecuaciones matemáticas conocidas o estándar (Sorrentino, 2008).

2.5.1.2 Volumen aparente según los tipos dendrométricos

Otra forma de calcular volumen, es mediante ecuaciones geométricas. Para esto, debe asumirse que la forma del fuste o troza que se está midiendo es regular, situación que se da en muy raras ocasiones. Existen 4 formas básicas regulares para calcular volumen aparente; cilíndrica, paraboloides, cónica y neiloide. La ecuación base es la de volumen de un cilindro, la cual se multiplica por el factor geométrico correspondiente para adaptarlo a cualquiera de las otras 3 formas (Sorrentino, 2008).

Volumen de cilindro = $B \cdot h$		}	B = Base
Volumen de paraboloides = $\frac{1}{2} \cdot B \cdot h$			
Volumen de cono = $\frac{1}{3} \cdot B \cdot h$			
Volumen de neiloide = $\frac{1}{4} \cdot B \cdot h$			
			h = Altura

El factor geométrico, o factor de forma, puede asumirse por experiencias previas con la especie que se esté trabajando, o puede determinarse a campo mediante el apeo de algunos árboles. Una vez determinado el factor de forma, simplemente midiendo el diámetro y la altura en pie, se es posible determinar el volumen aparente de los árboles.

2.5.1.3 Volumen real de árboles enteros

Por otro lado, también existen fórmulas que permiten calcular de manera precisa el volumen de árboles enteros, pero para emplearlas, es necesario el apeo del árbol que quiere medirse. Son métodos en los cuales se utilizan las denominadas fórmulas acumuladas, permitiendo calcular el volumen real que el usuario desee, es decir, volumen total, volumen comercial o cualquier otro volumen. Simplemente hay que definir la sección de interés a los efectos de determinar los diámetros extremos (mínimo y máximo) a tener en cuenta (Sorrentino, 2008).

Se considera que la forma más común en trozas aserrables es el paraboloido truncado, y para este tipo de forma existen tres ecuaciones muy difundidas; Smalian, Huber y Newton – Simpson (Sorrentino, 2008).

La fórmula de Smalian es exacta si la forma de la troza fuese paraboloido truncado, paraboloido o incluso cilíndrica (Sorrentino, 2008).

$$V_s = \left[\frac{a + A}{2} \right] * L * \pi/8$$

A = diámetro mayor
a = diámetro menor
L = largo de la troza

En caso de contar con el árbol entero apeado, puede obtenerse el volumen rollizo utilizando la fórmula recién descrita pero acumuladas a lo largo de las secciones del árbol, surgiendo de ese modo, la fórmula acumulada de Smalian.

$$V_{ts} = L * \pi/8 * \left[D_0^2 + D_n^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} D_i^2 \right]$$

D₀ = diámetro inferior
D_n = diámetro superior
D_i = diámetros intermedios

Con la fórmula de Huber se puede calcular el volumen de manera muy precisa en el caso que la forma de la troza, al igual que en la fórmula de Smalian, sea paraboloido truncado, paraboloido o cilíndrica. En caso de que sea paraboloido truncado, el resultado de ésta fórmula será exactamente el mismo que si se aplica Smalian. Sin embargo, según Sorrentino (2008), es posible demostrar matemáticamente que la fórmula de Huber es más precisa que la de Smalian para trozas que no sean con forma de paraboloido.

$$V_H = \pi/4 * D_{0,5}^2 * L$$

D_{0,5} = diámetro en la mitad del largo de la troza
L = largo de la troza

Utilizando el mismo concepto que con Smalian, para calcular el volumen del fuste entero, se utiliza la fórmula de trozas independientes para obtener la fórmula acumulada de Huber.

$$V_{tH} = L * \pi/4 * \left[D_{0,5(1)}^2 + \dots + D_{0,5(n)}^2 \right]$$

L = largo de troza
D_{0,5} = diámetro en la mitad del largo de la troza

La fórmula de Newton - Simpson, a diferencia de las dos anteriores, arroja resultados exactos para cualquier tipo de forma de troza, incluso para formas representadas por funciones más complejas (Sorrentino, 2008).

$$V_N = \pi/24 * L * [d^2 + 4 * D_{0,5}^2 + D^2]$$

d = diámetro menor
 D = diámetro mayor
 D_{0,5} = diámetro en la parte media

Siguiendo el mismo procedimiento que en los dos casos anteriores, la fórmula acumulada de Newton – Simpson que se genera es:

$$V_{tN} = L * \pi/24 * [D_0^2 + D_n^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} D_i^2 + 4 \sum_{i=1}^{n-1} D_{0,5(i)}^2]$$

D₀ = diámetro menor
 D_n = diámetro mayor
 D_i = diámetro inferior de cada troza
 D_{0,5} = diámetro en la parte media de cada troza

La utilidad de medir el volumen real de los árboles, radica en poder calcular luego el factor de forma, ya sea de árboles individuales o rodales enteros. Como ya se explicó anteriormente, el volumen aparente es calculado tomando en cuenta al fuste con forma cilíndrica. Obviamente, sería erróneo considerar el volumen de los árboles como si fuesen cilíndricos, por eso, es necesario corregir esos valores con el ya mencionado factor de forma (Sorrentino, 2008).

Volumen real/árbol = Fórmula de Smalian, Huber, Newton – Simpson
 Volumen aparente = $\pi/4 \cdot DAP^2 \cdot H$

$$FF = \frac{\text{Volumen real del árbol tipo}}{\text{Volumen aparente del árbol tipo}}$$

También pueden encontrarse otras maneras de hallar volumen que no serán explicadas en este documento, pero a modo de mención, puede calcularse mediante el método gráfico, y también con fórmulas empíricas como ser la fórmula de Hossfel, fórmula del Servicio Forestal Norteamericano y la fórmula de Pressler.

2.5.2 Estimación de biomasa

Una vez calculado el volumen se prosigue hacia el cálculo de biomasa, paso fundamental y necesario para una posterior estimación del carbono.

Según el IPCC (2001), se considera la biomasa como la masa total de organismos vivos en un lugar o volumen determinado, aunque en ciertas ocasiones pueden incluirse restos de plantas recientemente muertas, siendo esta última, biomasa muerta. Por otro lado, López et al. (2002), define la biomasa como *“cualquier materia orgánica de origen reciente que se derive de animales y vegetales como resultado del proceso de conversión fotosintética”* y además agrega que, *“la energía de la biomasa deriva del material vegetal y animal, tal como madera de bosques, residuos de procesos agrícolas y forestales y de la basura industrial, humana o de animales”*.

Los ecosistemas forestales poseen distinta capacidad de almacenar carbono en forma de biomasa aérea según su composición florística, edad y densidad de población (Schulze et al., citados por Acosta et al., 2002).

Para medir la cantidad de biomasa aérea en un ecosistema forestal se requiere, según Brown et al., citados por Acosta et al. (2002), un análisis destructivo o directo, o estimaciones a partir de métodos indirectos. El método directo o destructivo se basa en medir los parámetros básicos de un árbol (por ejemplo; dap y altura), apearlo y calcular la biomasa de cada uno de sus componentes (fuste, ramas verdes, ramas secas y follaje) determinando el peso de cada uno de ellos (González, 2008).

Por otro lado el método indirecto es utilizado en aquellos casos que se desea estimar la biomasa aérea de los árboles y no se desea derribarlos. Es necesario entonces, contar con funciones que permitan estimar la biomasa total según el tamaño y las dimensiones de los árboles, es decir, funciones matemáticas que relacionen alométricamente los órganos de un individuo (Huxley, citado por Acosta et al., 2002). Para determinar dichas funciones deben tomarse muestras de madera del árbol, pesarlas y luego en el laboratorio calcular los factores de conversión de volumen a peso seco, entre los que se puede mencionar la gravedad específica verde y/o específica seca, y la densidad básica en gramos por centímetro cúbico (González, 2008).

2.5.2.1 Métodos indirectos

El método de estimación de biomasa que más interesa para este proyecto es el de modelos alométricos. Estos, son ecuaciones matemáticas que relacionan la biomasa con otros parámetros medibles del árbol en pie, como pueden ser dap y altura total fundamentalmente. Como se mencionó anteriormente, para lograr el desarrollo de estos modelos, es esencial un muestreo destructivo de árboles, siendo el tamaño de la muestra lo suficientemente grande para que el valor del error sea aceptable. Según Vallejo et al., citados por González (2008), se recomienda un tamaño de muestra de al menos 20 individuos distribuidos en todos los rangos diamétricos.

La biomasa total de cada árbol se obtiene sumando la biomasa de los diferentes componentes del árbol. Por último, mediante técnicas estadísticas se realizan relaciones directas entre la biomasa total y las variables medidas en pie (González, 2008). A modo de ejemplo, Sanquetta et al. (2001), proponen algunos modelos para el cálculo de biomasa de *Pinus taeda*, a partir de dap, altura, o ambos, siendo:

PV= Peso vivo

D= Diámetro a la altura del pecho

H= altura

- 1) $PV = a * D^2$
- 2) $PV = a + b*D + cD^2$
- 3) $PV = a + b*D + c(D^2 + H)$
- 4) $PV = a + b*D + cD^2 + d (D^2 * H)$
- 5) $PV = a + b*D^2 + c(D^2 * H)$
- 6) $PV = a + b*D + c*H$
- 7) $PV = a*D^b*H^c$

Otra forma de estimación de biomasa aérea por método indirecto no tomada en cuenta en esta investigación, pero no menos importante, es aquella en la cual en una primera instancia se calcula el volumen total (de una parcela, grupo de arboles, rodal) y se lo multiplica por la densidad promedio, obteniéndose así, la biomasa del fuste. La densidad se calcula como la masa de la madera seca al horno, por unidad de volumen (MSA. DB. SAyDS, 2004).

Posteriormente la biomasa aérea es calculada multiplicando la biomasa del fuste por un factor de expansión (FE), siendo este último una constante la cual refleja

la participación de otros compartimentos de la biomasa aérea como por ejemplo ramas y hojas. Cuanto mayor sea la biomasa promedio de los fustes menor será el FE, es decir menor será la participación de los otros compartimentos sobre la biomasa aérea total, y viceversa. Este método es aplicado fundamentalmente cuando no existe información detallada de un inventario forestal con los parámetros de cada árbol individual (Aguirre et al., 2007).

2.5.3 Estimación de captación de carbono

La mayoría de los autores consultados, hacen referencia a Brown y Lugo (1992), donde afirman que el carbono almacenado en la biomasa total aérea, se obtiene multiplicando esta última (BT) por el factor 0,5. Es decir, que a groso modo, la mitad de la biomasa acumulada en un árbol (cualquiera sea su especie) está conformada por carbono, formando parte de diversas estructuras químicas. Dicho esto, una vez que se obtenga el valor de la biomasa de un árbol, parcela, o bosque, por cualquiera de los métodos mencionados anteriormente, solo será necesario multiplicar dicho valor por 0,5 para obtener de este modo el carbono fijado o captado.

También existe otro método para la estimación de captación de carbono, el programa CO2FIX, divulgado ampliamente en el mundo, el cual no es utilizado en este caso, pero suele estar bien recomendado en toda la bibliografía consultada sobre este método.

El modelo fue desarrollado en el marco del proyecto CASFOR (“Fijación de carbono en repoblación forestal y gestión forestal sostenible”) en 1990 por Mohren y Goldewijk, y ha sido distribuido gratuitamente por internet desde 1999, sufriendo mejoras en el correr de los años (Álvarez, 2009).

La versión CO2FIX 3.1 a modo de ejemplo, descrita por Álvarez (2009), consta de seis diferentes módulos:

- Módulo de biomasa; estimado fundamentalmente a partir del incremento volumétrico anual.
- Módulo de suelo; es una simulación de la descomposición de los residuos orgánicos y otros desechos de actividades silvícolas, utilizándose datos climáticos y tipo de residuos.

- Módulo de productos; es el carbono almacenado en la extracción de la madera, se utiliza la eficacia de los tratamientos de los productos, así como la longevidad y el reciclado de los mismos.
- Módulo de bioenergía; aquí se consideran otros productos y desechos forestales del ítem anterior, que puedan ser utilizados para la generación de energía.
- Módulo financiero; tiene como objetivo determinar el beneficio financiero de distintos escenarios, utilizando los costo e ingresos de la gestión.
- Módulo de contabilidad de carbono; representa el resumen de los flujos de carbono con la atmósfera.

2.6 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA EN ESTUDIO

La zona en estudio se encuentra comprendida entre el norte del departamento de Tacuarembó y el oeste de Rivera. Los suelos predominantes según clasificación CONEAT pertenecen a la zona 7, pudiéndose encontrar también suelos de tipo 2 y 8.

La zona del grupo Coneat 7 ocupa una superficie de unas 477.027 ha, representando un 13.3% del total de los suelos de prioridad forestal. Esta zona abarca las unidades Tres cerros (7.1, 7.41), Rivera (7.2, 7.31), Tacuarembó (7.2, 7.32), Cuchilla de Corrales (7.33) y Río Tacuarembó (7.41), de la carta de suelos escala 1: 1000000.

El relieve es ondulado, con lomas redondeadas y laderas convexas medias o cortas, con pendientes de entre 5 y 8% (Marchesi y Durán, 1969). Estos suelos (praderas arenosas rojas, y praderas arenosas gris amarillentas) suelen ser muy profundos (hasta 4 metros), y bien drenados. Poseen un horizonte A de entre 40 y 120 cm, de color pardo rojizo o pardo grisáceo, y textura liviana, generalmente arenoso franca, y estructura muy débil. El horizonte B es espeso, siendo su textura franco arcillosa arenosa o arcillosa arenosa, con estructura de bloques o prismas. El horizonte C, suele ser similar al B, en cuanto a colores, pero de textura más liviana (Marchesi y Durán, 1969).

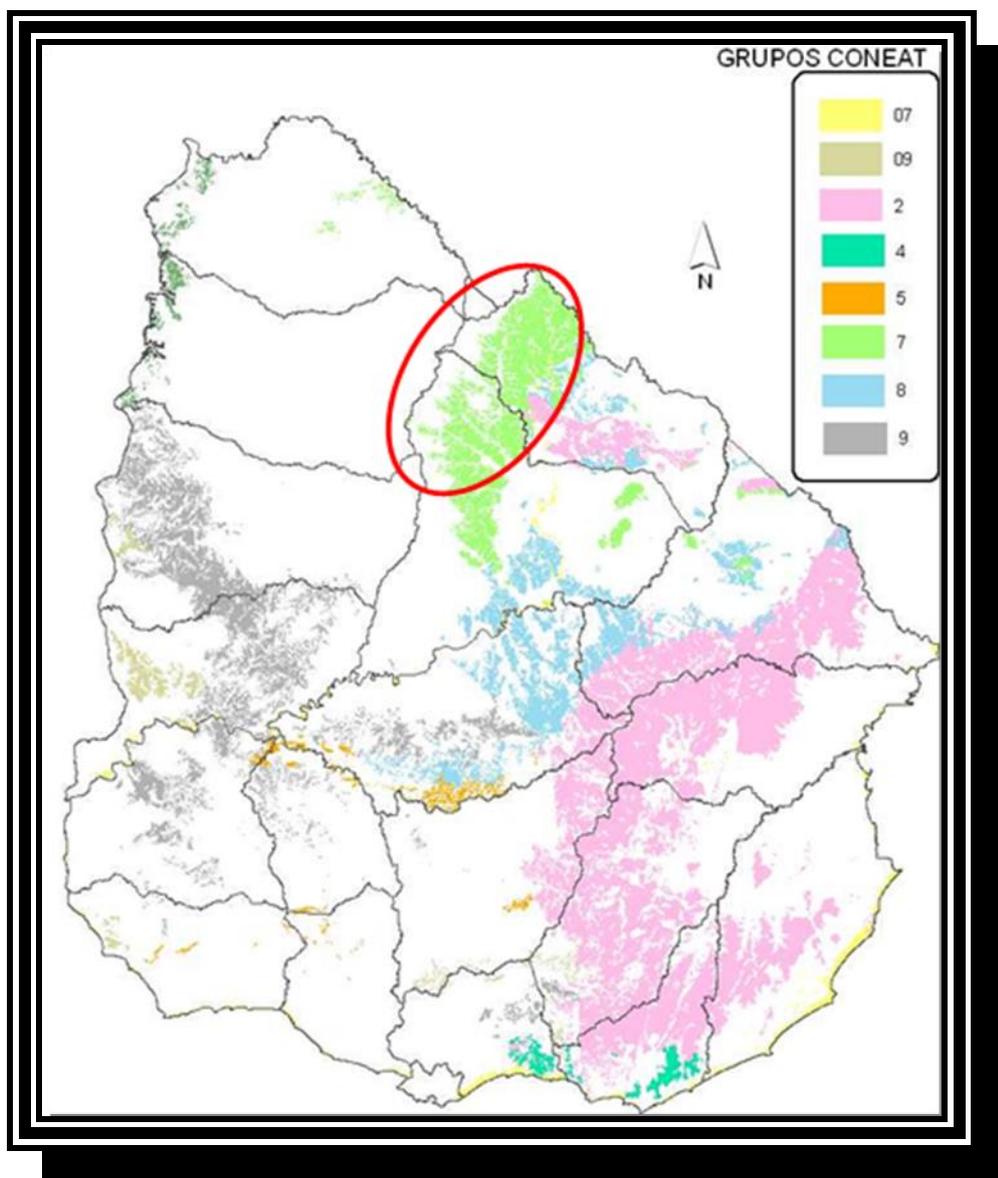


Figura No. 1. Suelos de prioridad forestal

Fuente: MGAP (2006)

Estos suelos se caracterizan por ser fuertemente ácidos, con pH de entre 4,5 y 5 en todo el perfil, saturación de bases bajas, no mayores al 50%, y muy bajo contenido de materia orgánica (1%). Poseen un muy bajo nivel de fertilidad pero gran capacidad de almacenamiento de agua, por poseer un horizonte A liviano y profundo y un B pesado (Marchesi y Durán, 1969).

3 MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos se colectaron en plantaciones de *Pinus taeda* con edades de entre 4 y 17 años, en los departamentos de Tacuarembó y Rivera, perteneciente a suelos de la zona 7, según CONEAT.

Las parcelas se caracterizaron por ser circulares, de 9,77 m de radio, y estar asociadas a las del inventario forestal nacional (IFN) realizado en los años 2009 y 2010. Una vez ubicadas las parcelas del IFN, se realizaba otra a pocos metros de distancia, respetando las condiciones topográficas. Tanto la ubicación como la selección de parcelas fueron realizadas a partir de mapas proporcionados por la empresa Weyerhaeuser, propietaria del área. Ubicada la misma, se procedió a llegar a ella por tierra, mediante la ayuda de personal idóneo del el área en cuestión. Una vez encontrada físicamente se procedió a limitarla. Primero se ubicó el centro de la parcela y mediante el uso de una cinta métrica de 50 m se midió el radio de la misma.



Figura No. 2. Marcación del centro de la parcela.

Una vez medido el radio con la cinta adherida al centro de la parcela, se caminaba en círculo marcando los árboles que se localizaban en el borde.



Figura No. 3. Determinación de la parcela circular.

Limitada la parcela se determinaba la cantidad de árboles que quedaban comprendidos en ella, numerándolos con etiquetas en orden creciente por fila y en zig-zag para su correcta distinción.



Figura No. 4. Numeración de árboles dentro de la parcela.

Subsiguientemente se realizó la medición del dap de todos los individuos, siguiendo el orden de numeración, utilizando una forcípula común de aluminio

compuesta por una regla graduada con precisión de 1mm. La medición se realizaba colocando la forcípula perpendicular al tronco, aproximadamente a la altura del pecho del medidor (1.30 m de altura), haciendo coincidir en primer lugar el brazo fijo con uno de los costados del tronco y desplazando el brazo móvil a lo largo de la regla hasta hacerlo tocar el otro costado. La medida del diámetro se estima realizando la lectura sobre la regla graduada en el punto donde coincide con el borde interior del brazo móvil. Para mayor precisión del dap de cada individuo, sabiendo que la forma del tronco no es un círculo perfecto, se realizaron dos mediciones perpendiculares entre sí.

La persona encargada de estimar los dap dictaba en voz alta la medición de cada árbol, el cual se anotaba por otra persona en las planillas correspondientes ya impresas. De esta manera en una columna se aprecia el número del árbol y en las dos columnas siguientes el Dap1 y el Dap2 de cada árbol. Según la variabilidad de diámetros se determinaron el número de clases diamétricas convenientes, con intervalos de 5cm. Cuanto mayor era la variabilidad de diámetros, mayores eran las clases seleccionadas para comprender a todos los árboles.

Una vez clasificados los individuos, se eligió un árbol representativo de cada clase diamétrica (árbol marca de clase), evitando que sea bifurcado o que presente algún problema sanitario. Los árboles elegidos fueron apeados, e inmediatamente desramados.



Figura No. 5. Apeo de un árbol seleccionado.

Apeado el árbol, se procedió a medir la altura total del mismo con la cinta métrica desde el área de corte hasta el ápice del árbol. Luego se determinó la altura del tocón con la regla métrica y fue sumada a la altura determinada con la cinta.



Figura No. 6. Medición de altura del árbol.

El siguiente paso consistió en marcar el fuste del árbol en trozas de 1 o 2 metros según el diámetro, de manera de no complicar la tarea de pesado. A cada troza, además de pesarla, se le midió el diámetro inferior utilizando una forcípula (la misma que se usó para la medición de dap) y el espesor de la corteza con una regla graduada con precisión 1mm.



Figura No. 7. Corte del fuste en trozas.



Figura No. 8. Medición de diámetro inferior de trozas.

La etapa próxima fue la clasificación de las ramas en vivas y secas. A las ramas vivas se le separaron las hojas, trabajo que se realizó manualmente depositando las mismas en lonas dispuestas en el suelo.



Figura No. 9. Separación de hojas de las ramas.

Cada uno de los componentes fue pesado en tanques de plástico de 200 litros (excepto las trozas las cuales se pesaron directamente), mediante la utilización de una balanza portátil marca Thunderbird modelo Ultrascala con precisión de 1 kg, descontando en cada pesada, el peso del tanque. Hasta aquí, las variables fueron organizadas en una planilla Excel, con los encabezados dap, diámetro inferior y espesor de corteza de cada troza, altura total, peso del fuste, peso de hojas, peso de ramas verdes, peso de ramas secas y peso total. Todos los datos recabados fueron anotados por la persona encargada, en planillas correspondientes a la parcela en cuestión.



Figura No. 10. Pesado de trozas.



Figura No. 11. Pesado de ramas y hojas.

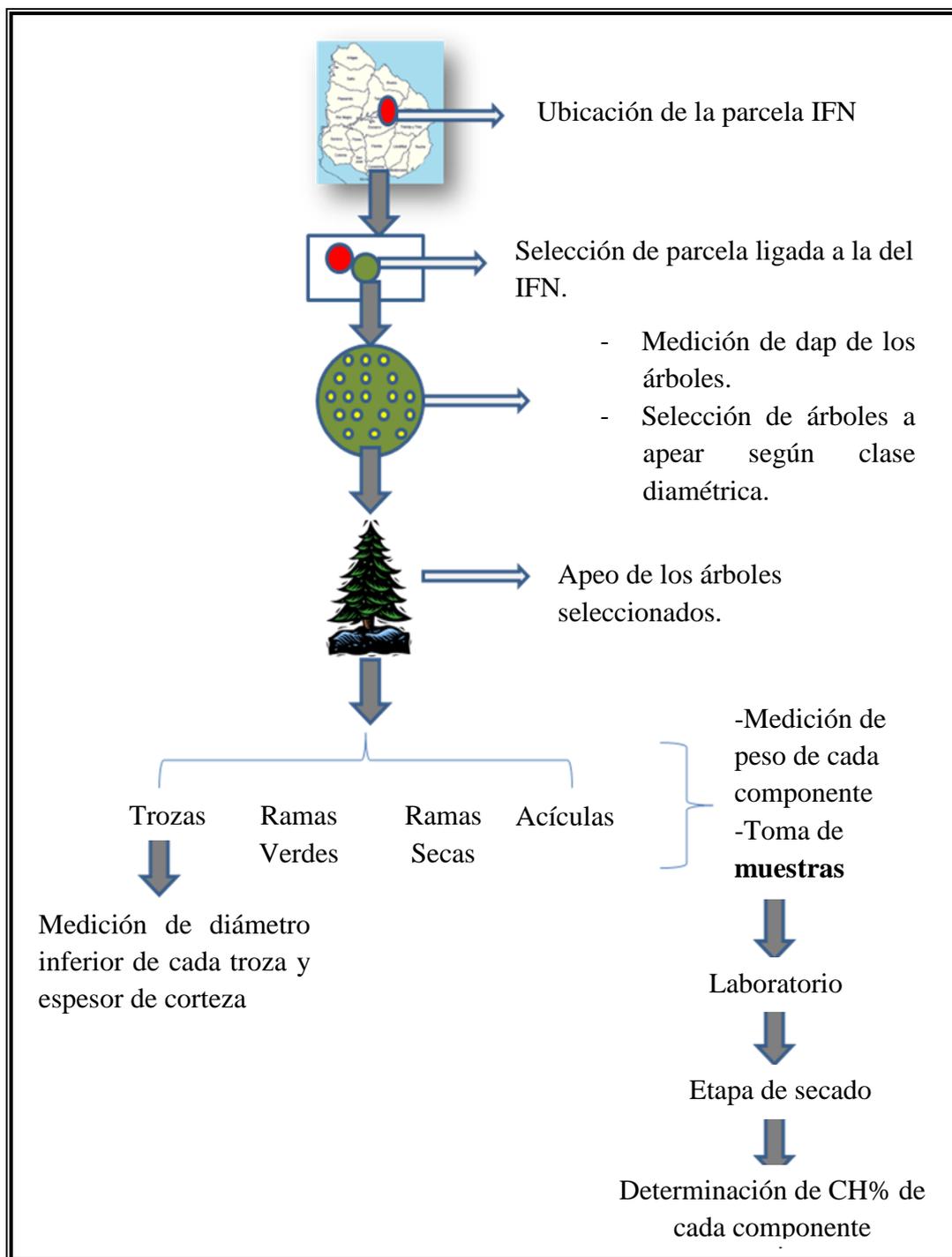
El apeo, el trozado y el desramado fueron realizados con motosierra por personal especializado. En todo momento se contó con el apoyo de personal aportado por la empresa Weyerhaeuser, propietaria del área en estudio, variando el número de personas según el día, con un mínimo de 4 y un máximo de 10. Todas las personas presentes en el área de trabajo contaban con el equipo de seguridad necesario como ser casco, guantes, chaleco refractario, polainas y botas con puntas de acero. Adicionalmente el motosierrista contaba con gafas protectoras, protector auditivo y pantalón anticorte.

Para la estimación de biomasa se tomaron muestras de cada componente del árbol inmediatamente después de ser pesado, organizándolas en bolsas con un correcto etiquetado (parcela, tipo de muestra y fecha), para luego pasar a la fase de secado. En esta etapa, se pesaron las muestras colectadas (Pv) en una balanza electrónica marca Denver Instrument modelo APX – 6001 con precisión de 0,1 g, debiendo descontar el peso de la bandeja de aluminio. Luego se colocaron en un horno eléctrico marca Nova Etica para medir su peso cada 48 horas. Este procedimiento se realizaba hasta obtener el peso anhidro (Pa) de la muestra, el cual se conseguía cuando una de las pesadas era igual a la anterior. Las muestras tomadas se clasificaron en hojas verdes, ramas verdes, ramas secas, torta chica, mediana y grande; siendo las tres últimos muestreos del fuste.



Figura No. 12. Toma de muestras de distintos componentes

Con el peso verde (peso inicial) y el peso anhidro de cada muestra, se calculó el porcentaje de humedad en base húmeda ($CH\%_{(BH)} = \frac{Pv - Pa}{Pv}$). Una vez obtenidos los porcentajes de humedad, se calculó el peso anhidro de cada componente del árbol ($Pa = Pv * (1 - CH\%_{(BH)})$). Los datos obtenidos se clasificaron en peso anhidro del fuste, peso anhidro de ramas verdes, peso anhidro de ramas secas, peso anhidro de hojas y peso anhidro total.



Esquema No. 3. Resumen del procedimiento experimental.

El siguiente paso consistió en generar una base de datos Excel, en la cual se unieron todos los datos recabados previo, durante y después de la etapa de campo. La tabla generada fue la que se utilizó como base en el software InfoStat, utilizado para realizar los análisis de datos.

En una primera instancia, se analizaron algunas de las regresiones vistas en el punto 6.2.1, con el objetivo de determinar cuál de ellas se ajustaba mejor a la cuantificación de carbono. Todas las regresiones son lineales, a excepción de la número 6, la cual es no lineal.

- 1) $C = a + b \cdot D + c \cdot D^2 + e$
- 2) $C = a + b \cdot h + c \cdot h^2 + e$
- 3) $C = a + b \cdot D^2 + c(D^2 \cdot H) + e$
- 4) $C = a + b \cdot D + cD^2 + d(D^2 \cdot H) + e$
- 5) $C = a + b \cdot D + c \cdot H + e$
- 6) $C = a \cdot D^b \cdot H^c + e$

C = Carbono

D = Dap

H = Altura

e = Error

a, b, c, d = Constantes

A través del Infostat, se analizaron los resultados de cada modelo, focalizando la atención en el que tuviese mayor coeficiente de determinación ajustado (R^2 aj), menor error cuadrático medio ponderado (ECMP) y que todos los supuestos se cumplan (normalidad y homocedasticidad).

Además, se realizó un análisis de correlación entre diversas variables; peso del fuste (PF), peso de ramas vivas (PRV), peso total (PT), peso anhidro total (PAT), D^2H , D^2 , D y H. Para PF, PRV, PT, PAT y C, se eligieron las 2 o 3 variables con mayor correlación (D^2H , D^2 , D, H). Para cada una de las variables, se realizaron 3 modelos de regresión predeterminados; eliminación backward, selección forward y stepwise. Para determinar cuál de los 3 modelos fue mejor, se tuvo en cuenta el R^2 aj, el ECMP y la comprobación de los supuestos.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir del análisis realizado, se determinaron los 2 mejores modelos según lo que se explicó en el capítulo anterior. El modelo que mejor ajustó fue $C = a + b \cdot D + c \cdot D^2 + e$ (modelo 1), presentando un R^2 aj de 0,98 y ECMP de 57,41.

El segundo mejor modelo fue $C = a + b \cdot h + c \cdot h^2 + e$ (modelo 2), siendo su R^2 aj 0,93 y ECMP de 170,14.

4.1 ANÁLISIS DEL MODELO 1

Los resultados obtenidos del modelo 1 fueron los siguientes.

Tabla No. 1. Análisis de regresión lineal del modelo 1.

Variable	N	R²	R² Aj	ECMP	AIC	BIC
Carbono (kg)	465	0,98	0,98	57,41	3196,37	3212,94

Tabla No. 2. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados modelo 1.

Coeficiente	Estimación	E.E	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallovs
Constante	29,97	3,73	22,63	37,3	8,03	<0,001	
D (cm)	-4,90	0,30	-5,50	-4,30	-16,09	<0,001	260,19
D (cm) ^ 2	0,29	0,01	0,28	0,30	45,52	<0,001	2069,2

Tabla No. 3. Cuadro de análisis de varianza (SC tipo III) del modelo 1.

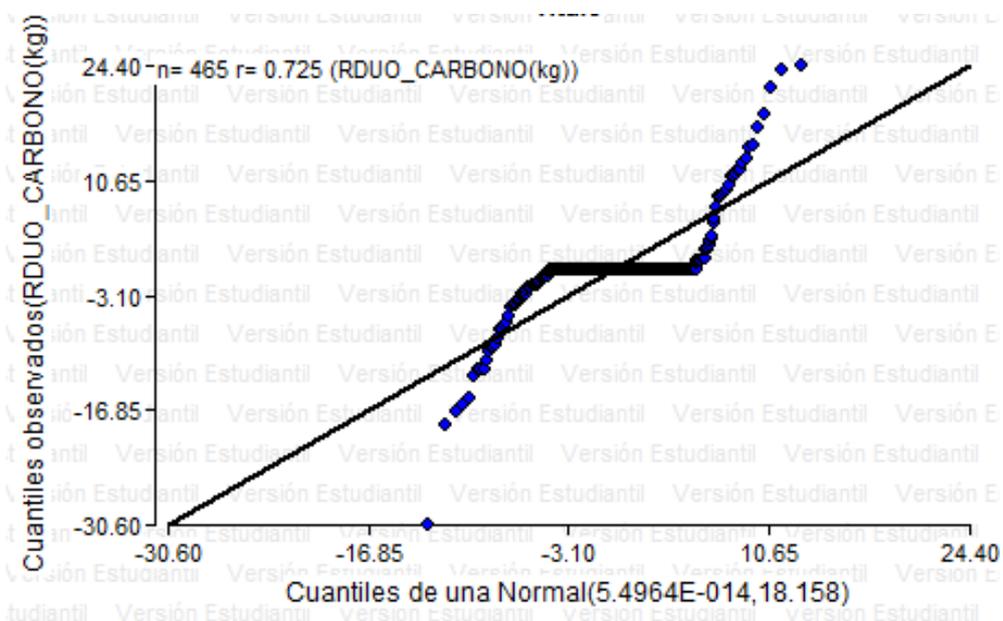
F.V	SC	GI	CM	F	p-valor
Modelo	1013925,18	2	506962,59	9053,36	<0,001
D medio (cm)	1013925,18	2	506962,59	9053,36	<0,001
Error	25870,68	462	56,0		
Total	1039795,86	464			

Como puede apreciarse en la tabla No. 2, todos los parámetros tienen valor de p menor a 0,01, significando esto, que todos son significativamente distintos de 0.

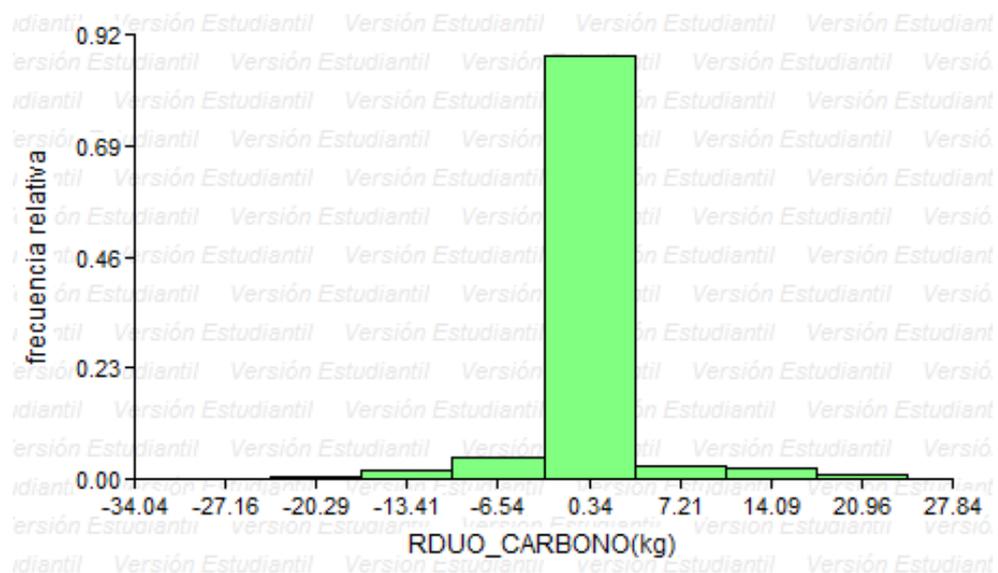
Con estos valores, el modelo es:

$$C = 29,97 - 4,9 \cdot D + 0,29 \cdot D^2.$$

Para la validación del supuesto de normalidad se realizó un análisis Q-Q plot con los residuos del modelo de regresión, y utilizando como distribución teórica la normal, y un histograma de distribución de los residuos.



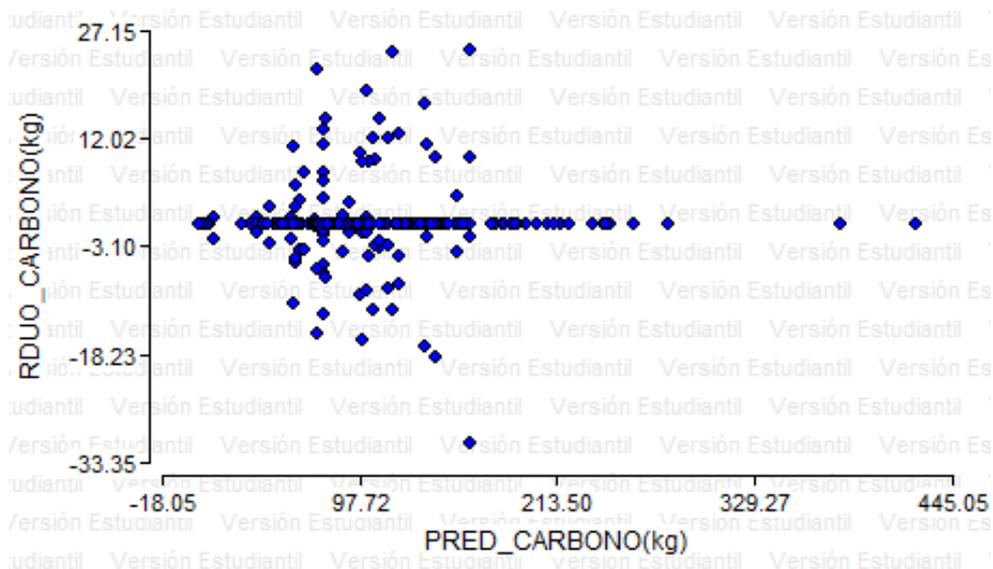
Gráfica No. 5. Q-Q plot modelo 1.



Gráfica No. 6. Distribución de los residuos del modelo 1.

Como puede observarse, la distribución de los residuos tiende a ser normal, validando el supuesto de normalidad.

Por otro lado, para la comprobación del supuesto de homocedasticidad, se realizó un gráfico de residuos versus predichos, para verificar que la distribución de los puntos no sigue un patrón determinado.



Gráfica No. 7. Residuos versus predichos modelo 1.

Si bien el gráfico no muestra totalmente lo que era esperable, no parecería ser suficiente para rechazar la hipótesis de homocedasticidad.

4.2 ANÁLISIS DEL MODELO 2

Los resultados del modelo 2 pueden observarse en las siguientes tablas

Tabla No. 4. Análisis de regresión lineal del modelo 2.

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Carbono (kg)	465	0,93	0,93	170,14	3704,22	3720,79

Tabla No. 5. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados modelo 2

Coefficiente	Estimación	E.E	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallows
Constante	49,66	7,16	35,59	63,74	6,93	<0,001	
h (m)	-12,89	1,01	-14,87	-10,92	-12,83	<0,001	166,24
h (m) ^ 2	1,03	0,04	0,96	1,1	28,65	<0,001	821,26

Tabla No. 6. Cuadro de análisis de varianza (SC tipo III) del modelo 2.

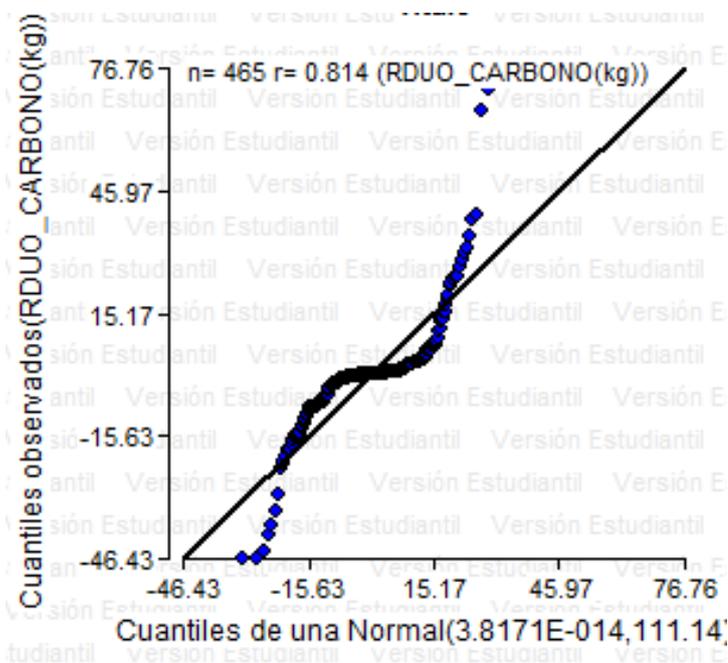
F.V	SC	Gl	CM	F	p-valor
Modelo	962683,74	2	481341,87	2883,85	<0,001
h (m)	962683,74	2	481341,87	2883,85	<0,001
Error	77112,12	462	166,91		
Total	1039795,86	464			

En la tabla número 5 se puede apreciar que todos los parámetros tienen valor de p menor a 0,01, pudiendo asegurar entonces, que todos son significativamente distintos de 0.

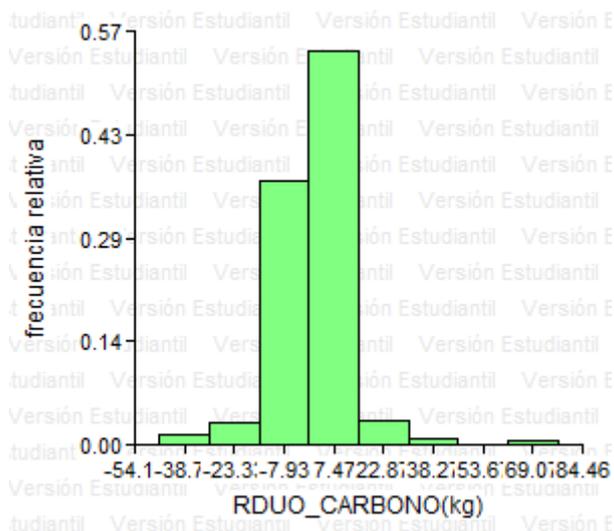
Con los valores obtenidos, el modelo queda de la siguiente manera:

$$C = 49,66 - 12,89 \cdot h + 1,03 \cdot h^2.$$

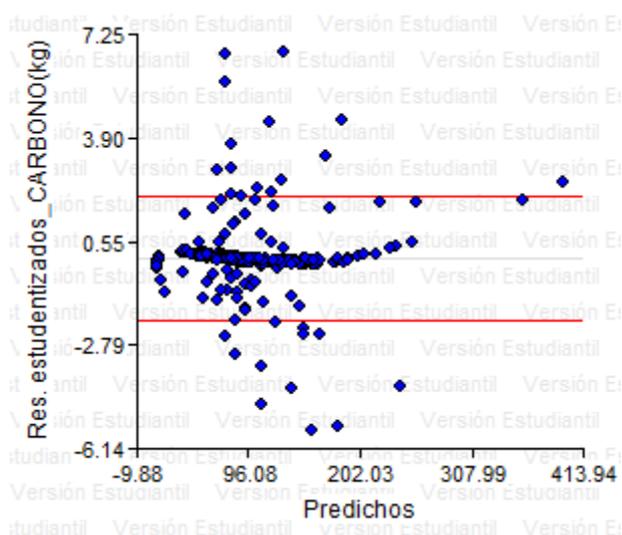
Para la validación de supuestos se realizaron los mismos análisis que para el modelo 1. Por un lado, para comprobar el supuesto de normalidad se realizó Q-Q plot con los residuos del modelo de regresión utilizando como distribución teórica la normal, y un histograma de distribución de los residuos. Por otro lado, para comprobar el supuesto de homocedasticidad se realizó un gráfico de residuos versus predichos.



Gráfica No. 8. Q-Q plot modelo 2.



Gráfica No. 9. Distribución de los residuos del modelo 2.



Gráfica No. 10. Residuos versus predichos modelo 2.

Al igual que en el modelo 1, la gráfica de residuos versus predichos no se comportó de una manera esperable, pero sigue siendo suficiente para validar la hipótesis de homocedasticidad.

4.3 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN

Por último, se realizó un análisis de correlación de Pearson, la cual mide la relación entre 2 o más variables cuantitativas, independientemente de su unidad de medida o escala.

Las variables elegidas para este análisis fueron:

- Peso del fuste (kg)
- Peso de ramas vivas (kg)
- Peso total (kg)
- Peso anhidro total (kg)
- Dap^2h
- Dap^2
- Dap
- h

Tabla No. 7. Correlación de Pearson: Coeficientes/probabilidades.

	PF	PRV	PT	PAT	D^2H	D^2	D	H
PF	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PRV	0,97	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PT	1,0	0,98	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PAT	0,99	0,97	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
D^2H	1,0	0,96	0,99	0,99	1,0	0,0	0,0	0,0
D^2	0,98	0,96	0,98	0,98	0,98	1,0	0,0	0,0
D	0,92	0,90	0,93	0,93	0,92	0,97	1,0	0,0
H	0,89	0,85	0,89	0,89	0,89	0,92	0,96	1,0

Como se explicó anteriormente, para cada una de las variables PF, PRV, PT y PAT, se eligieron las 2 o 3 con mayor correlación (D^2H , D^2 , D, H). Luego, en cada caso se utilizaron 3 metodologías para la selección del mejor modelo; eliminación backward, selección forward y stepwise. Para la determinación del mejor de los 3, se tuvo en cuenta el R^2 aj, el ECMP y la comprobación de los supuestos.

A continuación se presenta una tabla de resumen de las correlaciones y sus respectivos modelos.

Tabla No. 8. Modelos de correlación seleccionados.

Variable dependiente	Variable independiente	Método de selección del modelo	Modelo
PF	D^2H ; D^2	Stepwise	$PF = 10,06 + 0,03 * D^2H$
PRV	D^2H ; D^2 ; H	Stepwise	$PRV = -101,6 + 11,54 * H$
PT	D^2H ; D^2	Selección forward	$PT = 25,63 + 0,04 * D^2H$
PAT	D^2H ; D^2	Selección forward	$PAT = 16,66 + 0,02 * D^2H$

5 CONCLUSIONES

Dada la creciente preocupación a nivel mundial por la contaminación generada por la liberación de carbono, es que surgió la posibilidad de mitigar o contrarrestar dicho efecto, mediante la creación de los bonos de carbono. Para llevar a cabo esto, se hace indispensable investigar formas prácticas y confiables de calcular el carbono capturado en plantaciones de interés.

A través del análisis estadístico de ciertos parámetros de las plantaciones forestales de *Pinus taeda* en el norte de Uruguay, es que se logra en esta tesis, vincularlos con el carbono capturado a través de modelos estadísticos. De esta manera, es que se obtienen dos modelos confiables para calcular el carbono a través de parámetros de fácil medición como lo son el diámetro y la altura. Los R^2 aj obtenidos de cada modelo fueron de 0,98 y 0,93 respectivamente, lo cual indica la alta correlación que existe entre los parámetros elegidos y el carbono presente en el árbol.

Adicionalmente, se logró establecer correlaciones entre otros parámetros que inciden directamente sobre la cantidad de carbono. Para las variables PF, PRV, PT y PAT se generaron modelos de correlación vinculados al DAP y/o H, según cual fuese mejor para cada caso.

Además, para llegar al resultado deseado se originó abundante información extra, la cual puede ser de interés para futuros trabajos relacionados con el tema. Ejemplo de ello, la humedad en base seca y húmeda de los distintos componentes del árbol (hojas, ramas, fuste), el porcentaje de cada uno de ellos, y su influencia sobre el carbono total.

Esta metodología de medición de carbono, será de gran utilidad para todas aquellas empresas u organismos que estén interesados en cuantificar el carbono capturado por sus plantaciones. Es además, una vía de entrada a la posibilidad de diversificar aún más, los productos generados por el bosque, haciendo aún más rentable al rubro.

6 RESUMEN

El cambio climático generado por el aumento de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, ha despertado gran preocupación a nivel mundial en las últimas décadas. Como consecuencia, en 1988 se crea el panel intergubernamental de cambio climático (IPCC). En marzo de 1992, se crea el Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (UNFCCC), la cual entre en vigor en 1994 y cuenta actualmente con 188 estados. En 1997, se realiza la conferencia de las partes (COP) en Kioto, marcada y recordada por la aprobación del protocolo de Kioto, el cual abre un nuevo mercado a nivel mundial conocido como mercado de carbono. Esto representó una gran oportunidad para pequeñas naciones, ya que las grandes potencias altamente industrializadas, estarían obligadas a compensar las emisiones de CO₂ generadas en sus territorios, mediante la compra de carbono absorbido en otros países. Uruguay forma parte de los países captadores de carbono, fundamentalmente por la masa boscosa que se ha generado en los últimos 20 años, presentándose entonces grandes oportunidades para las empresas instaladas en el país, para ingresar al mercado de carbono mundial. Sin embargo, la experiencia en el país sigue siendo escasa, y es donde surge la necesidad de profundizar las investigaciones, fundamentalmente poder generar mecanismos que permitan estimar la captación de carbono en plantaciones forestales, de la manera más sencilla, rápida y confiable posible. Si bien, en los últimos años, el compromiso de las grandes naciones ha disminuido considerablemente, aún se mantiene un comercio voluntario a nivel mundial en donde los proyectos forestales han captado gran atención fundamentalmente por su gran variedad de beneficios sociales y ambientales que los hacen aptos para aquellas empresas (fundamentalmente capitales privados), y otros agentes como ONG's que buscan mejorar su perfil medio ambiental o representar un ejemplo.

Palabras clave: Cambio climático; Protocolo de Kioto; Mercado de carbono; Captación de carbono.

7 SUMMARY

The climate change generated by the increasing concentrations of CO₂ in the atmosphere, has aroused great concern worldwide in the last decades. As a consequence, the intergovernmental panel on climate change (IPCC) was created in 1988. In March 1992, the United Nations framework convention on climate change (UNFCCC) is created, which starts working in 1994 and has currently 188 states associated. In 1997, the conference of the parties (COP) takes place in Kyoto, pronounced and remembered by the approval of the Kyoto protocol, which opens a new global market known as carbon market. This represented a huge opportunity for the small nations, because major industrialized countries, would be obliged to compensate the CO₂ emissions generated in their territories, by purchasing carbon absorbed in other countries. Uruguay is one of the carbon collector countries, mainly by the forest mass that has been generated in the last 20 years, presenting then, great opportunities for companies operating in the country, to enter into the global carbon market. However, the experience in the country remains weak, and therefore, further investigations are needed, primarily, to generate mechanisms to estimate carbon sequestration in forest plantations in the most simple, quick and reliable way as possible. Even though, in recent years the commitment of great nations has declined significantly, there are still worldwide voluntary trades. This trades were attracted by forestry projects, specially for its wide variety of social and environmental benefits that make them proper for companies (private capital fundamentally), and other actors such as NGO's, seeking to improve their environmental profile or being considered an example for society.

Keywords: Climate change; Kyoto protocol; Carbon market; Carbon sequestration.

8 BIBLIOGRAFÍA

1. Acosta, M.; Vargas, J.; Velázquez, A.; Etchevers, J. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*. 36: 725-736.
2. Álvarez, S. 2009. Optimización de la planificación forestal considerando la captura de carbono en bosques de pino - encino de la sierra Juárez, Oaxaca (México). Madrid, Universidad Politécnica de Madrid. 174 p.
3. Avilés, A. 2008. Generación hidroeléctrica en el Ecuador; posibles beneficios en los mercados de carbono. *Cuestiones Económicas (Banco Central del Ecuador)*. 24: 141 - 167.
4. Baethgen, W.; Martino, D. 2000. Cambio climático, gases de efecto invernadero e implicancias en los sectores agropecuario y forestal del Uruguay. (en línea). Montevideo, INIA. 16 p. Consultado oct. 2010. Disponible en http://inia.inia.org.uy/disciplinas/agroclima/publicaciones/ambiente/cc_gei_agrop_forestal.pdf.
5. Chidiak, M.; Moreyra, A.; Greco, C. 2003. Captura de carbono y desarrollo forestal sustentable en la Patagonia argentina; sinergias y desafíos. Buenos Aires, Fundación CENIT. 118 p.
6. Cole, J.; Prairie, Y.; Caraco, N.; McDowell, W.; Tranvik, L.; Striegl, R.; Duarte, C.; Kortelainen, P.; Downing, J.; Middelburg, J.; Melack, J. 2007. Plumbing the global carbon cycle; integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems*. 10: 171 - 184.
7. Crowley, T.; North, G. 1988. Abrupt climate change and extinction events in earth history. *Science*. 240 (4855): 996-1002.
8. Galarza, R. 2008. Los créditos de carbono del protocolo de Kyoto. Umbrales. *Revista del Postgrado Multidisciplinario en Ciencias del Desarrollo*. 17: 305-333.
9. González, M. 2008. Estimación de la biomasa aérea y la captura de carbono en regeneración natural de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, *Pinus oocarpavar. ochoterenai* Mtz. y *Quercus sp.* en el norte del estado de Chiapas, México. Tesis Magíster Scientiae en Manejo y Conservación de Bosques Naturales y Biodiversidad. Turrialba, Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 81 p.

10. IPCC. 1996. Tecnologías, políticas y medidas para mitigar el cambio climático. Ginebra, Suiza. 94 p.
11. _____. 2007. Cambio climático 2007; informe de síntesis. Ginebra, Suiza. 104 p.
12. López, M.; De Koning, F.; Paredes, H.; Benítez, P. 2002. Estimación de carbono en biomasa de bosques secundarios y plantaciones forestales en el noroccidente de Ecuador. Eschborn, Alemania, GTZ. 34 p. (TÖB TWF-31s).
13. Marchesi, E.; Durán, A. 1969. Suelos del Uruguay. Montevideo, Nuestra Tierra. pp. 47-49 (Nuestra Tierra no. 19).
14. Martino, D. 2000. Los sumideros de carbono en el mecanismo de desarrollo limpio del protocolo de Kyoto. (en línea). Montevideo, INIA. 9 p. Consultado oct. 2010.
Disponible en
http://www.inia.org.uy/disciplinas/agroclima/publicaciones/ambiente/sumideros_carbono_kioto.pdf.
15. MGAP (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, UY). 2006. Actualización de la carta forestal del Uruguay con imágenes del año 2004. Montevideo. 27 p.
16. MSA. DB. SAYDS (Ministerio de Salud y Ambiente. Dirección de Bosques. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal, AR). 2004. Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono de las regiones forestales argentinas. Buenos Aires. 26 p.
17. Montoya, G.; Soto, L.; De Jong, B.; Nelson, K.; Farias, P.; Yakactic, P.; Taylor, J. 2008. Desarrollo forestal sustentable; captura de carbono en las zonas tzeltal y tojolabal del estado de Chiapas. Edimburgo, s.e. 50 p. (Cuadernos de trabajo no. 4).
18. ONU (Organización de las Naciones Unidas). 1998. Protocolo de Kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. Kyoto. 25 p.
19. Oreskes, N. 2004. Beyond the ivory tower; the scientific consensus on climate change. Science. 306 (5702): 1686-1686.

20. Picos, J.; Covelo, X. 2002. Trabajo realizado en el marco de la cátedra ENCE. Pontevedra, Universidad de Vigo. 99 p.
21. Reali, P. 2010. 20 años del mercado del carbono atmosférico forestal; historia y situación. Revista de la Sociedad de Productores Forestales. 41: 32-35.
22. Sanquetta, C.; Watzlawick, L.; Arce, J.; De Mello, A. 2001. Estimación de biomasa aérea y subterránea en plantaciones de *Pinus taeda* en el sur del estado de Paraná, Brasil. Paraná, Universidad Federal del Paraná. Departamento de Ciencias Forestales. 11 p.
23. Seeberg-Elverfeldt, C. 2010. Las posibilidades de financiación del carbono para la agricultura, la actividad forestal y otros proyectos de uso de la tierra en el contexto del pequeño agricultor. Roma, FAO. pp. 5-11 (Documentos de Trabajo - Medio Ambiente y la Gestión de los Recursos Naturales no. 34).
24. Serra, L. 2005. Situación actual del mercado de carbono. (en línea). s.n.t. 7 p. Consultado oct. 2010. Disponible en <http://aplicaciones.medioambiente.gov.ar/archivos/web/UCC/File/Informe%202005.pdf>.
25. Smith, T.; Cramer, W.; Dixon, R.; Leemans, R.; Neilson, R.; Solomon, A. 1993. The global terrestrial carbon cycle. Dordrecht, Kluwer. pp. 19 – 37.
26. Sorrentino, A. 2008. Manual teórico – práctico. Técnicas e instrumentos de medición forestal. Montevideo, Facultad de Agronomía. 312 p.
27. UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 1992. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Nueva York. 26 p.

9 ANEXOS

PLANILLA TIPO PARA DATOS DE PARCELA

PARCELA No.		UBICACIÓN:	
ESPECIE:		AÑO:	
ÁRBOL	DIÁMETRO 1 (cm)	DIÁMETRO 2 (cm)	ALTURA (m)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			

15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			

PLANILLA TIPO PARA ÁRBOLES APEADOS

PARCELA No.		ÁRBOL No.			
ESPECIE:					
TROZA	LARGO TROZA (m)	DIÁMETRO 1 (cm)	DIÁMETRO 2 (cm)	CORTEZA (mm)	PESO (kg)
1					
2					
3					
4					
5					

6					
7					
8					

Peso ramas verdes	
Peso ramas secas	
Peso hojas	

Observaciones:
