



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Maestría en Artes en Estadística Aplicada

**IMPORTANCIA DE LA APLICACIÓN DE MODELOS DE REGRESIÓN  
LINEAL EN PROYECCIONES DE LA COBERTURA BOSCOSA Y DE  
CAPTURA DE CO<sub>2</sub>, PARA LA VENTA DE CERTIFICADOS DE CARBONO EN  
GUATEMALA, PERÍODO 2017-2030**

**Víctor Manuel Aceituno Melgar**

Asesorado por el Mtro. Víctor Manuel Aceituno Quezada

Guatemala, marzo de 2018



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPORTANCIA DE LA APLICACIÓN DE MODELOS DE REGRESIÓN  
LINEAL EN PROYECCIONES DE LA COBERTURA BOSCOSA Y DE  
CAPTURA DE CO<sub>2</sub>, PARA LA VENTA DE CERTIFICADOS DE CARBONO EN  
GUATEMALA, PERÍODO 2017-2030**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**VÍCTOR MANUEL ACEITUNO MELGAR**

ASESORADO POR EL MTRO. VÍCTOR MANUEL ACEITUNO QUEZADA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN ARTES EN ESTADÍSTICA APLICADA**

GUATEMALA, MARZO DE 2018



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

|            |  |
|------------|--|
| DECANO     | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco     |
| VOCAL I    | Ing. Angel Roberto Sic García          |
| VOCAL II   | Ing. Pablo Christian de León Rodríguez |
| VOCAL III  | Ing. José Milton de León Bran          |
| VOCAL IV   | Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez      |
| VOCAL V    | Br. Carlos Enrique Gómez Donis         |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López      |

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

|            |   |
|------------|---|
| DECANO     | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco      |
| EXAMINADOR | Dra. Mayra Virginia Castillo Montes     |
| EXAMINADOR | Mtro. Edwin Adalberto Bracamonte Orozco |
| EXAMINADOR | Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque    |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López       |



## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **IMPORTANCIA DE LA APLICACIÓN DE MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL EN PROYECCIONES DE LA COBERTURA BOSCOSA Y DE CAPTURA DE CO<sub>2</sub>, PARA LA VENTA DE CERTIFICADOS DE CARBONO EN GUATEMALA, PERÍODO 2017-2030**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 3 de junio de 2017.



**Víctor Manuel Aceituno Melgar**



## **ACTO QUE DEDICO A:**

|                            |  |
|----------------------------|--|
| <b>Dios</b>                | Por todas sus bendiciones y darme sabiduría para permitirme alcanzar esta meta.  |
| <b>La Santísima Virgen</b> | María Auxiliadora. Mi madre del cielo a quien acudo en mis momentos de dificultad y siempre encuentro su maternal protección.                              |
| <b>Mis padres</b>          | Mayra Magaly Melgar Rivera de Aceituno y Mtro. Lic. Víctor Manuel Aceituno Quezada. Muchas gracias por su amor, apoyo incondicional y por guiarme siempre. |
| <b>Mi hermano</b>          | Mtro. Dr. Jorge Estuardo Aceituno Melgar. Muchas gracias por tu cariño y por apoyarme.   |
| <b>Mi abuelo</b>           | José Adrián Melgar Girón. Le agradezco sus consejos.   |
| <b>Mis tíos y primos</b>   | Por acompañarme en todo momento y su cariño.   |
| <b>Mis amigos</b>          | Por su amistad.  |



## **AGRADECIMIENTOS A:**

|   |  |
|---|--|
| <b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b> | Por abrirme de nuevo sus puertas para continuar mi formación académica y aportar a la sociedad guatemalteca profesionales de alto nivel académico. |
| <b>Facultad de Ingeniería</b>                 | Por formarme como Ingeniero Químico y ahora como Maestro en Estadística Aplicada.  |
| <b>Mi asesor y padre</b>                      | Mtro. Lic. Víctor Manuel Aceituno Quezada. Por tu apoyo en la asesoría y guía en el proceso de la elaboración de este trabajo de graduación.       |
| <b>Mi mamá</b>                                | Mayra Magaly Melgar Rivera de Aceituno. Por siempre motivarme a seguir adelante y todos tus cuidados y amor.                                       |
| <b>Mi hermano</b>                             | Mtro. Dr. Jorge Estuardo Aceituno Melgar. Por apoyarme en todo momento.  |
| <b>Dra. Mayra Castillo</b>                    | Por su apoyo en la revisión y constante motivación durante esta investigación.   |
| <b>Mtro. Ing. Edwin Bracamonte</b>            | Por compartirme sus conocimientos en esta maestría.  |





FACULTAD DE  
INGENIERÍA - USAC  
ESCUELA DE  
ESTUDIOS DE POSTGRADO

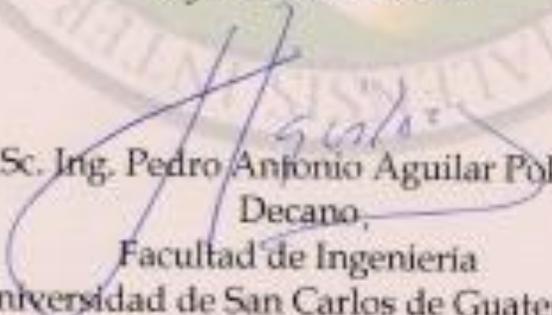
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

APT-2018-004

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Postgrado, al Trabajo de Graduación de la Maestría en Artes en Estadística Aplicada titulado: **"IMPORTANCIA DE LA APLICACIÓN DE MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL EN PROYECCIONES DE LA COBERTURA BOSCOSA Y DE CAPTURA DE CO<sub>2</sub> PARA LA VENTA DE CERTIFICADOS DE CARBONO EN GUATEMALA, PERÍODO 2017-2030"** presentado por el Ingeniero Químico Víctor Manuel Aceituno Melgar, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
MSc. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano,  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, marzo de 2018.

Ciudad de Guatemala, Guatemala, C.A.

**Docentes:** Centro Clínico y Saneamiento, **Programas de Maestrías:** Ingeniería Vial, Gestión Industrial, Electrónica, Energía y Ambiente Ingeniería Geotécnica, Ingeniería para el Desarrollo Municipal, Tecnología de la Información y la Comunicación, Ingeniería de Mantenimiento, **Especializaciones:** Diseño del Talento Humano, Atención al Cliente, Investigación Científica, Educación Virtual para el Nivel Superior, Administración y Mantenimiento Hospitalario, Neurorehabilitación y Hincapié en la Industria, Gestión de la Integridad en el Nivel Superior, Derecho, Seguridad y Gestión de Recursos Humanos, Gestión de Información Geográfica, Sistemas de Gestión de Calidad, Explotación Minería, Carbón.





Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

APT-2018-004

La Directora de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y dar el visto bueno del revisor y la aprobación del área de Lingüística del Trabajo de Graduación titulado **"IMPORTANCIA DE LA APLICACIÓN DE MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL EN PROYECCIONES DE LA COBERTURA BOScosa Y DE CAPTURA DE CO<sub>2</sub> PARA LA VENTA DE CERTIFICADOS DE CARBONO EN GUATEMALA, PERÍODO 2017-2030"** presentado por el Ingeniero Químico Victor Manuel Aceituno Melgar, correspondiente al programa de Maestría en Artes en Estadística Aplicada; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

*"Id y Enseñar a Todos"*

Dra. Mayra Virginia Castillo Montes  
Directora a.i.

Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, marzo de 2018.

Ci. activo/L.Z.L.A.





Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

APT-2018-004

Como Coordinador de la Maestría en Artes en Estadística Aplicada del Trabajo de Graduación titulado **"IMPORTANCIA DE LA APLICACIÓN DE MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL EN PROYECCIONES DE LA COBERTURA BOSCOSA Y DE CAPTURA DE CO<sub>2</sub>, PARA LA VENTA DE CERTIFICADOS DE CARBONO EN GUATEMALA, PERÍODO 2017-2030"** presentado por el Ingeniero Químico Víctor Manuel Aceituno Melgar, apruebo y recomiendo la autorización del mismo.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

MSc. Edwin Adalberto Bracamonte Orozco  
Coordinador de Maestría  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, marzo de 2018.

Ciudad/LZLA.







|   |    |
|---|----|
| 3.4. Estimación de los ingresos por la venta de certificados de carbono | 45 |
| 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS  | 49 |
| 4.1. Modelos de regresión de la cobertura boscosa en Guatemala          | 49 |
| 4.2. Modelos de regresión para la reforestación en Guatemala            | 54 |
| 4.3. Modelos de fijación de CO <sub>2</sub> por bosques                 | 56 |
| 4.4. Estimación de los ingresos por la venta de certificados de carbono | 57 |
| CONCLUSIONES  | 61 |
| RECOMENDACIONES   | 63 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS  | 65 |
| APÉNDICES   | 71 |
| ANEXOS  | 85 |



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

|     |   |      |
|-----|---|------|
| 1.  | Asignación del Presupuesto Nacional al PINFOR.<br>Período 2008-2016                               | XIII |
| 2.  | Cobertura boscosa de Guatemala en función del tiempo.<br>Modelo exponencial. Período 1991-2012    | 29   |
| 3.  | Cobertura de bosques latifoliados en función del tiempo.<br>Modelo exponencial. Período 1991-2012 | 30   |
| 4.  | Cobertura de bosques de coníferas en función del tiempo.<br>Modelo cuadrático. Período 1991-2012  | 31   |
| 5.  | Cobertura de bosques mixtos en función del tiempo.<br>Modelo cúbico. Período 1991-2012            | 32   |
| 6.  | Proyección de la cobertura boscosa de Guatemala.<br>Período 2013-2030                             | 33   |
| 7.  | Proyección del área de bosques latifoliados.<br>Período 2013-2030                                 | 34   |
| 8.  | Proyección del área de bosques de coníferas.<br>Período 2013-2030                                 | 35   |
| 9.  | Proyección del área de bosques mixtos. Período 2013-2030  | 36   |
| 10. | Proyección del área forestal de Guatemala por clase de bosque<br>al año 2030                      | 37   |
| 11. | Área reforestada acumulada por el PINFOR entre 1998 y 2016<br>Modelo de regresión lineal          | 38   |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 12. | Área reforestada acumulada por el PINFOR entre 1998 y 2016.<br>Modelo de regresión lineal calculado con el método de mínimos cuadrados generalizados | 39 |
| 13. | Proyección del área reforestada acumulada entre 2017 y 2030 con el modelo de mínimos cuadrados generalizados   | 40 |
| 14. | Tasa de reforestación propuesta para detener la pérdida de cobertura forestal en 2030  | 41 |
| 15. | Modelo de CO <sub>2</sub> fijado. Modelo exponencial. Período 1991-2012  | 42 |
| 16. | Proyección de la masa de CO <sub>2</sub> fijado por bosques al año 2030  | 43 |
| 17. | Tasa anual de emisión de CO <sub>2</sub> por deforestación en Guatemala. Período 1991-2030   | 44 |
| 18. | Proyección de la emisión base de CO <sub>2</sub> por deforestación y la emisión de CO <sub>2</sub> por deforestación al operar bajo REDD+            | 47 |

## TABLAS

|      |   |    |
|------|---|----|
| I.   | Variables del estudio   | XX |
| II.  | Proyección de la cobertura boscosa de Guatemala.<br>Período 2013-2030   | 33 |
| III. | Proyección del área de bosques latifoliados.<br>Período 2013-2030   | 34 |
| IV.  | Proyección del área de bosques de coníferas.<br>Período 2013-2030   | 35 |
| V.   | Proyección del área de bosques mixtos. Período 2013-2030  | 36 |
| VI.  | Proyección del área forestal de Guatemala y la distribución por clase de bosques a 2030                                   | 37 |
| VII. | Proyección del área reforestada acumulada en Guatemala entre 2017 y 2030 con el modelo de mínimos cuadrados generalizados | 40 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| VIII. | Proyección de la masa de CO <sub>2</sub> fijado por bosques.<br>Período 2013-2030  | 43 |
| IX.   | Proyección de la tasa anual de pérdida de cobertura boscosa y<br>tasa de reforestación necesaria, para detener la pérdida de<br>cobertura boscosa al 2030 bajo operación de REDD+            | 45 |
| X.    | Proyección de la tasa base de emisión de CO <sub>2</sub> por deforestación<br>comparada con la tasa de emisión de CO <sub>2</sub> , por deforestación al<br>operar bajo REDD+ de 2018 a 2030 | 46 |
| XI.   | Proyección de la tasa base de emisión de CO <sub>2</sub> por deforestación<br>comparada con la tasa de emisión de CO <sub>2</sub> , por deforestación al<br>operar bajo REDD+ de 2018 a 2030 | 47 |



## LISTA DE SÍMBOLOS

| <b>Símbolo</b>     | <b>Significado</b>                             |
|--------------------|--|
| $^{\circ}\text{C}$ | Grado Celsius                                  |
| $\text{CO}_2$      | Dióxido de carbono                             |
| $e_i$              | Residuo de la $i$ -ésima observación           |
| exp                | Función exponencial                            |
| $H_0$              | Hipótesis nula                                 |
| $H_1$              | Hipótesis alterna                              |
| ha                 | Hectárea                                       |
| Q                  | Quetzales                                      |
| $r$                | Coeficiente de correlación                     |
| $r^2$              | Coeficiente de determinación                   |
| $s$                | Desviación estándar                            |
| $s^2$              | Varianza                                       |
| t                  | Tonelada métrica                               |
| $T$                | Transpuesta                                    |
| $\hat{y}$          | Valor estimado de la variable de respuesta     |
| $\alpha$           | Nivel de significancia                         |
| $\beta_0$          | Coeficiente de regresión del término constante |
| $\beta_1$          | Coeficiente de regresión del término lineal    |
| $\varepsilon$      | Error aleatorio                                |
| \$                 | Dólares de Estados Unidos de América           |



## GLOSARIO

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| <b>Área forestal per cápita</b> | Área cubierta por bosque por cada habitante.  |
| <b>Bosque</b>                   | Extensión de terreno mayor a 3 hectáreas cubierta de árboles.   |
| <b>Bosques de coníferas</b>     | Bosque con más del 70 % de árboles caracterizados por hojas aciculares, fruto en cono y ramas con contorno cónico.  |
| <b>Bosques latifoliados</b>     | Bosque con más del 70 % de árboles caracterizados por hojas anchas.   |
| <b>Bosques mixtos</b>           | Bosques que tienen menos de 70 % de especies latifoliadas o coníferas.  |
| <b>COP21</b>                    | Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.                      |
| <b>Deforestación</b>            | Conjunto de procesos que ocasionan una transición de actividades forestales a no forestales en el uso de la tierra. |

|                |   |
|----------------|---|
| <b>INAB</b>    | Instituto Nacional de Bosques. Promueve y fomenta el desarrollo forestal de Guatemala, a través del manejo de los bosques, reducción de la deforestación y fomento de la reforestación.                         |
| <b>PINFOR</b>  | Programa de incentivos forestales. Pago en efectivo que el Estado de Guatemala realiza al propietario de tierras de vocación forestal, debido a la ejecución de proyectos de reforestación o manejo de bosques. |
| <b>REDD+</b>   | Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Modelo que busca la disminución de las emisiones de CO <sub>2</sub> , a través de la conservación de bosques.  |
| <b>Residuo</b> | Diferencia entre el valor estimado con un modelo de regresión y el valor observado.   |

## RESUMEN

Se estimó el potencial de la venta por certificados de carbono de Guatemala, a través de la fijación de CO<sub>2</sub> obtenida por bosques conservados bajo el modelo de operación REDD+. Para lograrlo, se calcularon modelos de regresión, a través del método de mínimos cuadrados, con base en los inventarios de la cobertura forestal de Guatemala y por clase de bosque, obtenidos, a partir de los informes de la dinámica forestal del país durante el período 1991-2012. Se estima que en 2030, el área cubierta por bosques en Guatemala disminuirá a  $2.67 \times 10^6$  hectáreas, de las cuales el 58.6 % serán cubiertas con bosques latifoliados, el 25.4 % con bosques de coníferas y el 16 % con bosques mixtos.

Asimismo, se calculó un modelo lineal generalizado con esquema AR(1) del área reforestada acumulada en el país de acuerdo a los registros oficiales del PINFOR durante el período 1998-2016. Este modelo permitió resolver el problema de la autocorrelación serial y la heterocedasticidad de los residuos de un modelo de regresión lineal. Se estima que de mantenerse esa tendencia, para 2030 se habrán reforestado 239,154 hectáreas (7,119 hectáreas/año) con costo promedio de Q14,362/hectárea, determinándose que la tasa actual es insuficiente para compensar la pérdida de cobertura boscosa al año 2030, para lograrlo se debe reforestar a una tasa mínima de 43,806 hectáreas/año.

Si se reforestan como mínimo 43,806 hectáreas/año operando con el esquema REDD+ durante 2018-2030, Guatemala podrá fijar  $1.41 \times 10^8$  toneladas de CO<sub>2</sub> en ese período, significando financieramente un potencial de Q5,308 millones de inversión en proyectos de reforestación y conservación de bosques.



## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### Contexto general

Entre 1991 y 2010, la superficie boscosa de la República de Guatemala decreció de 5,121,629.01 a 3,720,628.24 hectáreas; es decir, una pérdida forestal del 27.35 % (INE, 2015). Esta pérdida de área boscosa es consecuencia de:

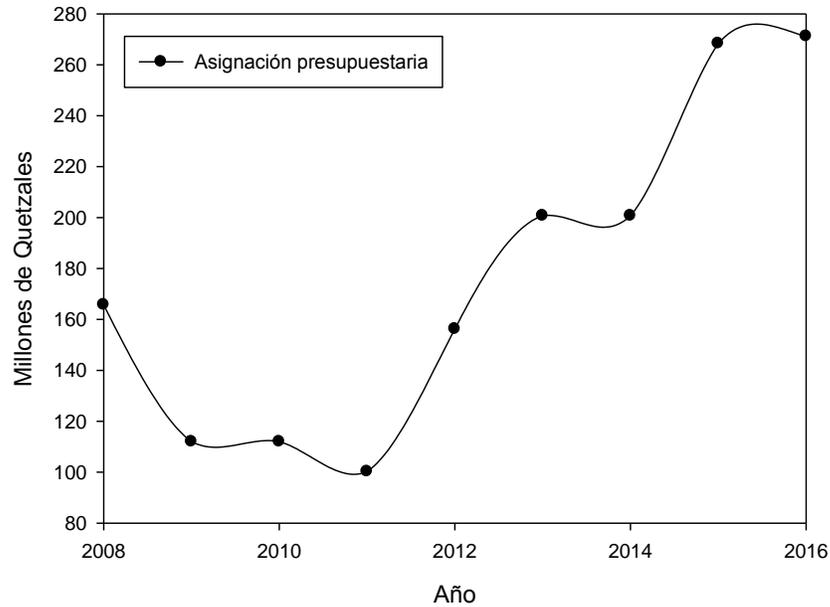
- Escaso manejo de protección de las zonas boscosas fuera del sistema de áreas protegidas. En 2001, sólo 5,912 hectáreas (equivalentes al 0.13 % del total de área forestal nacional) que no eran consideradas áreas protegidas, estaban en manejo de protección (INE, 2015).
- Crecimiento poblacional. En 2001, el bosque existente per cápita era de 0.34 ha/persona. El departamento de El Petén tenía la mayor área forestal per cápita (4.44 ha/persona), mientras el departamento de Guatemala tenía la menor cobertura boscosa per cápita (0.03 ha/persona). Comparado con 2011, El Petén disminuyó su área forestal per cápita en 2.2 veces en 2014. Entre 2010 y 2014, la cobertura boscosa per cápita en Guatemala decreció de 0.26 ha/persona a 0.22 ha/persona (INE, 2015).
- Incendios. Entre 2001 y 2014, el 51.9 % de los siniestros ocurrió en bosques. En particular, en 2014 el 85.5 % de estos fue en bosques (INE, 2015).

- La reforestación obtenida por incentivos forestales es menor que la deforestación. De 1998 a 2006, se reforestaron 53,142.3 hectáreas (5,904.7 ha/año). Sin embargo, la deforestación en el país fue de 73,212 ha/año entre 1991 y 2001. En 2006, Guatemala erogó Q 91,466,506.54. De ese monto, el 56.75 % se destinó a reforestación y el 43.25 % restante a la gestión forestal (INE, 2015).
- Pobreza. En los departamentos con mayor proporción de habitantes en situación de pobreza, la deforestación es alta en el período 1991-2001 (INE, 2015).
- Uso de leña como combustible. De acuerdo con la Encuesta de Condiciones de Vida 2011 (citada en INE, 2015), el 71.4 % de las familias del país utilizan leña para cocinar.
- El Instituto Nacional de Bosques (INAB) redujo su asignación presupuestaria entre 2001 y 2014. En 2014, únicamente se asignaron Q37,500,000, correspondientes al 0.06 % del presupuesto nacional. Comparado con lo asignado en 2001 (Q 45,900,000).

## **Descripción del problema**

Uno de los objetivos de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (Naciones Unidas, 2015) es detener la deforestación en 2020. A pesar de los resultados del Programa de Incentivos Forestales (PINFOR), la reforestación no iguala la deforestación en el país. Existe baja asignación en inversión del Presupuesto Nacional al PINFOR. La inversión desde 2008 se observa en la figura 1.

Figura 1. **Asignación del Presupuesto Nacional al PINFOR. Período 2008-2016**



Fuente: elaboración propia. Información con base en datos obtenidos de la Ley del Presupuesto General de ingresos y egresos del Estado (Congreso de la República de Guatemala).

En los informes del área forestal en Guatemala entre 1991 y 2012, se evidencian los cambios observados en el área boscosa del país y por departamento para cada período analizado. Por tal razón, se determinó un modelo estadístico del área forestal en Guatemala, desde 1991 hasta 2012, que permitió establecer el ritmo de deforestación y de reforestación, para determinar el ritmo de pérdida boscosa neta para ese período. La pérdida del área forestal es atribuida a la baja asignación al PINFOR, a factores socioeconómicos como la pobreza y la expansión de la frontera agraria. La reforestación es aún menor que la deforestación a pesar de los resultados de ese programa. La venta de certificados de carbono generaría más fondos para esos ingresos.

Por tal razón, fue necesario determinar el modelo estadístico del potencial que tiene Guatemala para vender certificados de carbono por la cobertura boscosa proyectada hasta el 2030. Este modelo permite complementar las estadísticas del área boscosa y así monitorear la gestión forestal de acuerdo con la Agenda 2030. Dicho modelo estadístico de la cobertura boscosa en el tiempo espera contribuir en la orientación de la gestión forestal fundamentándose en estadísticas y proyecciones.

## **Formulación del problema**

### **Pregunta central**

¿Cuál es el modelo estadístico del área forestal en Guatemala durante el período entre 1991 y 2012, que permite proyectar la cobertura boscosa de 2017 a 2030, estimar la tasa de reforestación al 2030 y proyectar la venta de certificados de carbono, obtenidos a través de la fijación de CO<sub>2</sub> por el área boscosa?

### **Preguntas auxiliares**

1. ¿Cuál es el modelo que estima el área forestal en Guatemala, la distribución por clase de bosque de 1991 a 2012 y permite proyectar la distribución boscosa de 2017 a 2030?
2. ¿Cuál es el modelo del área reforestada entre 1998 y 2015 que permite estimar el área reforestada de 2017 a 2030, la inversión por unidad de área reforestada y la tasa de reforestación necesaria para detener la pérdida de área forestal al 2030?
3. ¿Cuáles son los modelos del CO<sub>2</sub> fijado por bosques y del CO<sub>2</sub> que no se ha fijado como consecuencia de la pérdida de área forestal en Guatemala de 1991 a 2012, que permiten proyectar la cantidad de CO<sub>2</sub> fijado y el CO<sub>2</sub> que no se podría fijar debido a la pérdida de zonas boscosas de 2017 a 2030?
4. ¿Cuál es el potencial de Guatemala para generar ingresos por la venta de certificados de carbono, para determinar los recursos financieros que podrían obtenerse para implementar programas de gestión forestal?

## **Delimitación del problema**

La evolución de la deforestación en Guatemala, se analizó a partir de la tendencia de la cobertura boscosa de Guatemala durante el período comprendido entre 1991 y 2012, para proyectar el área boscosa de 2017 a 2030 de mantenerse las tasas de deforestación y reforestación.

En el ámbito estadístico, se propusieron modelos de regresión lineal y un modelo de regresión lineal generalizado para describir el área forestal del país, dado que se desconocían modelos que describieran el comportamiento de la deforestación en Guatemala en el tiempo. Se determinaron modelos para el área boscosa total en el país, por clase de bosque y la reforestación realizada entre 1998 y 2015. Estos modelos permitieron establecer la tasa anual de deforestación del país.

Se determinó el modelo de regresión lineal del CO<sub>2</sub> fijado de 1991 a 2012, para proyectar dicha fijación al 2030 de mantenerse la disminución de área forestal y el CO<sub>2</sub> que no se ha capturado, debido a la deforestación. Con ese modelo, se estimó el equivalente de recursos monetarios por la venta de certificados de carbono que no se han obtenido por la deforestación en el país. Del modelo de regresión lineal generalizado de la reforestación proyectada al 2030, se estimó el equivalente en certificados de carbono que podrían generarse por reforestación, para invertir en programas de conservación forestal.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Establecer un modelo estadístico del área forestal en Guatemala para el período entre 1991 y 2012, por medio de un análisis de regresión lineal, que permita proyectar la cobertura boscosa de 2017 a 2030, estimar la tasa de reforestación al 2030, y proyectar la venta de certificados de carbono, obtenidos a través de la fijación de CO<sub>2</sub> por bosques.

### **Específicos**

1. Establecer por medio de un modelo de regresión lineal el área forestal en Guatemala, y por clase de bosque, durante el período comprendido entre 1991 y 2012 que permita proyectar la distribución boscosa por clase de bosque de 2017 a 2030.
2. Establecer por medio de un modelo de regresión lineal el área reforestada entre 1998 y 2015 que permita estimar: el área reforestada de 2017 a 2030, la inversión por unidad de área reforestada y la tasa de reforestación necesaria para detener la pérdida de la cobertura boscosa al 2030.

3. Establecer los modelos de regresión lineal del CO<sub>2</sub> fijado por bosques y del CO<sub>2</sub> que no se ha fijado como consecuencia de la pérdida del área forestal en Guatemala de 1991 a 2012, que permitan proyectar el CO<sub>2</sub> fijado y el CO<sub>2</sub> que no se podría fijar, debido a la pérdida de zonas boscosas de 2017 a 2030.
  
4. Estimar los ingresos por la venta de certificados de carbono, a partir de los modelos de regresión lineal de la fijación de CO<sub>2</sub> proyectados de 2017 a 2030 y del precio de los mismos, para determinar los recursos financieros que podrían obtenerse por la implementación de programas de gestión forestal.

## RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

### Características del estudio

El estudio tuvo un enfoque cuantitativo, debido a que se determinaron modelos de regresión lineal de la cobertura boscosa en Guatemala, para calcular la tasa de deforestación existente entre 1991 y 2012. La proyección de la tasa de deforestación permitió establecer la tasa de reforestación necesaria para detener como mínimo la pérdida de cobertura boscosa a 2030.

Además, se determinó un modelo lineal generalizado bajo el esquema AR(1) de la reforestación obtenida por el PINFOR. Se estableció la tasa de reforestación adicional necesaria para detener la deforestación y los ingresos posibles por la venta de certificados de carbono.

La investigación tuvo un alcance descriptivo, ya que los modelos permitieron describir la cobertura boscosa en función del tiempo y por clase de bosque. Asimismo, el estudio tuvo un diseño no experimental dado que se utilizó información de publicaciones de la dinámica forestal en Guatemala, informes del Instituto Nacional de Bosques, del Ministerio de Ambiente y de los Recursos Naturales y del Instituto Nacional de Estadística.

El estudio fue longitudinal de tendencia, porque se utilizó información de publicaciones de la cobertura boscosa en el período 1991-2012, para realizar proyecciones al 2030 del área forestal, del potencial de captura de carbono por reforestación y de los ingresos que podrían obtenerse por la venta de certificados de carbono.

## Unidades de análisis

El análisis de la cobertura boscosa de Guatemala se realizó a nivel país, tomando como referencia las publicaciones realizadas para los años 1991, 1996, 2001, 2006, 2010 y 2012.

## Variables

Tabla I. **Variables del estudio**

| <b>Nombre de la variable</b> | <b>Definición técnica</b>  | <b>Definición operativa</b> |
|------------------------------|--|-----------------------------|
| Área de bosque natural       | Superficie cubierta por bosques que alcanzan más de 5 m de altura en su madurez y que en su plantación o crecimiento no intervino cualquier acción humana. | km <sup>2</sup>             |
| Área de bosques latifoliados | Área de bosque con más del 70 % de árboles caracterizados por hojas anchas.  | km <sup>2</sup>             |
| Área de bosques coníferas    | Área de bosque con más del 70 % de árboles del grupo de las gimnospermas, caracterizados por hojas aciculares, fruto en cono y ramas con contorno cónico.  | km <sup>2</sup>             |
| Área de bosques mixtos       | Área de bosques que tienen menos de 70 % de especies latifoliadas o coníferas.   | km <sup>2</sup>             |
| Área deforestada             | Superficie cuya cobertura boscosa fue removida.  | km <sup>2</sup>             |
| Área de reforestación        | Superficie en donde se plantan árboles para recuperar la cobertura boscosa de un terreno   | km <sup>2</sup>             |
| Tasa de deforestación        | Ritmo en el que se deforesta un terreno en el tiempo   | km <sup>2</sup> /año        |

|                                |    |  |                                  |
|--------------------------------|----|--|----------------------------------|
| Tasa de reforestación          | de | Ritmo en el que se reforesta un terreno en el tiempo                         | km <sup>2</sup> /año             |
| Fijación de dióxido de carbono | de | Cantidad de dióxido de carbono fijado por bosques en un intervalo de tiempo. | Tonelada de CO <sub>2</sub> /año |
| Certificado de carbono         | de | Equivalente a 1 tonelada de CO <sub>2</sub> fijada por bosques.              | Tonelada de CO <sub>2</sub>      |

Fuente: elaboración propia.

### Fases del estudio

La investigación consistió en las siguientes fases:

**Fase 1.** Revisión de literatura. En el transcurso de la investigación, se utilizaron informes presentados por el Instituto Nacional de Bosques, la Comisión Nacional de Áreas Protegidas y el Instituto Nacional de Estadística. Asimismo, se revisaron artículos relacionados con el tema.

**Fase 2.** Gestión y recolección de la información. En el primer mes de la investigación, se solicitaron bases de datos publicadas de la cobertura boscosa y se consolidó la información publicada en informes.

**Fase3.** Análisis de información. En el segundo y tercer mes de la investigación, se determinaron modelos de regresión lineal.

**Fase 4.** Interpretación de información. En el tercer y cuarto mes de la investigación, se describió el modelo de regresión lineal de mejor ajuste de la cobertura boscosa para Guatemala y el ritmo de deforestación existente.

**Fase 5.** Redacción del informe. Quinto y sexto mes de la investigación. Se redactó el informe final del trabajo de graduación.

## **Técnicas de análisis de la información**

### **Modelos de regresión de la cobertura boscosa**

Se determinaron modelos de regresión lineal de la cobertura boscosa en función del tiempo para Guatemala. Los modelos de regresión permitieron determinar la tasa de deforestación al calcular la primera derivada de la función de cobertura boscosa con respecto tiempo. Los modelos también permitieron proyectar la cobertura boscosa a 2030, de mantenerse el ritmo de deforestación observado en los últimos años.

### **Modelos de regresión de las áreas reforestadas**

Se determinaron los modelos de regresión de las áreas reforestadas en Guatemala, a través del Programa de Incentivos Forestales (PINFOR). Se utilizó el método lineal generalizado bajo el esquema AR(1). Se determinó el incremento de reforestación necesario para igualar la deforestación en Guatemala a 2030.

### **Modelos de captura de carbono**

A partir del modelo de cobertura boscosa de Guatemala en el tiempo y de la fijación de CO<sub>2</sub> en los bosques de Guatemala, se proyectó el modelo de captura de carbono en el país. Esta proyección permitió estimar el ingreso potencial de recursos económicos de Guatemala, por la venta de certificados de carbono bajo una operación de reducción de emisiones de gases de

efecto invernadero causadas por la deforestación y degradación de los bosques (REDD+).

### **Software utilizado**

Los análisis estadísticos se realizaron con los siguientes programas: SigmaPlot10.0, EViews 9, Microsoft Excel 2007 y Matlab R2008.



## INTRODUCCIÓN

En 1998 varios países miembros de las Naciones Unidas suscribieron el Protocolo de Kyoto, con el fin de frenar el cambio climático y mitigar sus efectos. Luego, en 2015 surgieron el Acuerdo de París y la Agenda 2030 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. El objetivo es evitar que la temperatura promedio de la Tierra aumente más de 2 °C, tomando como base la temperatura que el planeta registraba antes de la Revolución Industrial. Para lograrlo, los países deben reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero, en especial del anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>). Se ha propuesto la captura de este gas mediante la ampliación de áreas boscosas.

Según los registros de la cobertura boscosa, en Guatemala se deforestan anualmente 132,137 ha, demostrando que los resultados de reforestación (93,432 ha/año) del Programa de Incentivos Forestales, PINFOR, son insuficientes para detener la pérdida de área boscosa. Además, de acuerdo al mecanismo para un desarrollo sostenible, Guatemala desaprovecha la oportunidad de vender certificados de carbono a los países suscritos al Acuerdo de París, para invertir los recursos provenientes de la venta en proyectos de reforestación.

En la presente investigación se aplicaron modelos de regresión que evidencian la variación del área forestal en Guatemala durante el período entre 1991 y 2012 y proyectan la tendencia de la cobertura boscosa de 2017 a 2030. Estos modelos permitieron la estimación de la tasa de reforestación que como mínimo iguala a la tasa de deforestación que se calculó con el modelo para el año 2030 de tal forma que la pérdida de cobertura boscosa se detenga en ese

año. Al incrementar la tasa de reforestación observada entre 1998 y 2016 hasta la tasa de reforestación necesaria en 2030, se determinó la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> causadas por deforestación. Estas emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas se compararon con una línea base de emisiones calculada, a partir de la tendencia de pérdida de cobertura forestal actual. Las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas constituyen el potencial de captura de carbono de Guatemala, cuyo valor monetario permitió estimar los ingresos financieros que el país podría captar por la venta de certificados de carbono.

El informe final del Trabajo de Graduación consta de cuatro capítulos. El primer capítulo presenta el marco teórico, que incluye las clases de bosques, causas de la deforestación y soluciones propuestas para el control del cambio climático en las Convenciones Marco de Cambio Climático de las Naciones Unidas. Se describe el sistema de comercio de certificados de carbono.

El segundo capítulo presenta el fundamento estadístico de los modelos de regresión que fueron aplicados para proyectar la cobertura boscosa en Guatemala. Se describe el método de mínimos cuadrados, las propiedades de los estimadores del método, las pruebas de hipótesis para los modelos, la aplicación de estos modelos para realizar predicciones, el coeficiente de correlación lineal y el modelo de regresión lineal generalizado.

El tercer capítulo presenta los resultados: los modelos de regresión de la distribución de bosques en Guatemala, las proyecciones de la cobertura boscosa y reforestación a 2030 y el potencial de captura de carbono en el país. Los resultados se discuten en el cuarto capítulo. Se determinó que la pérdida de cobertura boscosa en Guatemala sigue un modelo de regresión con tendencia exponencial, el cual permitió estimar que para 2030, el área boscosa en Guatemala será de  $2.67 \times 10^6$  hectáreas, de las cuales el 58.6 % serán bosques

latifoliados, el 25.4 % serán bosques de coníferas y el 16 % serán bosques mixtos. Asimismo, para detener la pérdida de cobertura boscosa al año 2030, es necesario reforestar a una tasa mínima de 43,806 hectáreas/año.

Los resultados del Trabajo de Graduación son innovadores desde el punto de vista estadístico porque se presenta el modelo del área forestal en Guatemala. Las publicaciones de la dinámica forestal de Guatemala entre 1991 y 2012 constituyeron la base de cálculo de los modelos para proyectar la cobertura boscosa, el potencial de captura de carbono y los ingresos de recursos financieros por la venta de certificados de carbono en el período entre 2017 y 2030. Estos modelos permiten aportar algunas estadísticas e indicadores que son solicitados en el artículo 7 del Acuerdo de París, relacionados con las acciones de los países miembros que buscan capturar sus emisiones de dióxido de carbono con bosques para frenar el cambio climático.

La investigación aporta información de utilidad para proyectos de incidencia económica, social y ambiental en Guatemala. El estudio tiene impacto en la sociedad, porque se estimó que el potencial de ingresos por captura de dióxido de carbono a través de bosques en el período 2018-2030 es de Q5,308 millones al operar bajo un modelo REDD+, ya que se habrá evitado la emisión de  $1.41 \times 10^8$  toneladas de CO<sub>2</sub>. De esta forma, el país contará con una fuente de recursos financieros que cubran los presupuestos de inversión, administración y ejecución de programas forestales que fortalecerán a los programas de reforestación y beneficiarán económicamente a las comunidades involucradas en la protección de bosques. La implementación de dichos proyectos tendrá un impacto favorable en el ambiente, para cumplir con el objetivo 15 de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. Finalmente, el manejo forestal adecuado permitirá que se capture una fracción de CO<sub>2</sub>, uno de los gases causantes del calentamiento global.



# 1. MARCO REFERENCIAL

La disminución del área forestal en el mundo preocupa a la Organización de las Naciones Unidas (ONU), porque los bosques son considerados sumideros de CO<sub>2</sub>. Esta consideración está relacionada con la fotosíntesis que inicia con la captura de CO<sub>2</sub>, produciendo oxígeno (O<sub>2</sub>) y otras moléculas. El aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> ha promovido la búsqueda de procesos de reducción de emisiones en las Convenciones Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático y en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

En 1997 se acordó el Protocolo de Kyoto (Naciones Unidas, 1998). Dicho protocolo buscó que entre 2008 y 2012, los países que lo ratificaron redujeran como mínimo el 5 % del total de emisiones de los gases de efecto invernadero de 1990. Uno de los mecanismos a utilizarse fue el de la compra de certificados de carbono que los países contaminadores harían a los países que promovieran la gestión sostenible de sus bosques. Los certificados se utilizarían para demostrar reducciones de CO<sub>2</sub> de los países suscritos al protocolo.

En la Conferencia de las Partes (COP21), se aprobó el Acuerdo de París (Naciones Unidas, 2015a), como continuación del Protocolo de Kyoto. Se plantearon propuestas de desarrollo con baja emisión de gases de efecto invernadero para 2020. Con las acciones implementadas, se pretende una reacción rápida para evitar que la temperatura global aumente más de 1.5 °C (2 °C como máximo) comparado con la temperatura que existió antes de la Revolución Industrial. Es decir, en 2030 el total de CO<sub>2</sub> emitido debe ser menor a 40 gigatoneladas (1 gigatonelada equivale a 10<sup>9</sup> toneladas). Se busca capturar las emisiones con la conservación de bosques y reforestación, usando

el Fondo verde para el clima y fijando precio a las toneladas de carbono capturadas.

En la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (Naciones Unidas, 2015b), se estableció una lista de 17 objetivos con 169 metas como seguimiento a los Objetivos de Desarrollo del Milenio. En el objetivo 15 de la Agenda destaca el manejo forestal: detener la deforestación, recuperar los bosques degradados y aumentar la reforestación en 2020. Asimismo, se indica que para financiar estos proyectos de gestión forestal, es necesario asignar recursos financieros e incentivar la adhesión de los países en desarrollo.

Evidentemente, se propone el esfuerzo global para mitigar la emanación de gases de efecto invernadero, a través de la gestión sostenible de bosques financiada con fondos asignados o incentivos para tal fin. El objetivo es detener la deforestación y aumentar la reforestación, para utilizar las áreas forestales como sumideros de esos gases y de esta forma evitar que la temperatura promedio aumente más de 2 °C.

### **1.1. Estudios previos**

Como se indicó anteriormente, existen informes que cuantifican la variación del área forestal de Guatemala entre 1991 y 2010 al determinar la pérdida neta de bosques en cada período. Castellanos, Monzón, Valencia, Delgado, Regalado, Corral, Roldán, Roldán, Pérez, Noriega, Véliz, Ramos, Solís, Zetina, Guerra y Saravia (2006) presentaron el mapa forestal de Guatemala entre 1991/1993 y 2001. Se concluyó que en ese período, el área forestal disminuyó de 5,121,629 ha (47.32 % del país) a 4,558,453 ha (42.11 % del país); se deforestaron 717,075 ha y se recuperaron 153,899 ha. La

disminución neta de bosques fue de 563,176 ha. La deforestación y de reforestación fue de 73,148 ha/año y 15,704 ha/año, respectivamente. El Petén fue el departamento que más bosque perdió: 47,412 ha/año.

Castellanos, Regalado, Pérez, Montenegro, Ramos e Incer (2011) continuaron con el estudio del área boscosa del país entre 2001 y 2006. Se revisaron las fotografías de 2001, se concluyó que la cobertura boscosa disminuyó de 4,152,051 ha a 3,866,383 ha (35.5 % del país); se deforestaron 605,103 ha y se reforestaron 319,435 ha. Se perdieron 285,668 ha de bosque. La deforestación y reforestación fue de 101,869 ha/año y 53,785 ha/año, respectivamente.

En 2012, Regalado, Villagrán, Pérez, Castellanos, Martínez e Incer analizaron el área boscosa del país entre 2006 y 2010. Se concluyó que el área forestal disminuyó de 3,868,708 ha a 3,722,595 ha (34 % de la extensión territorial); se deforestaron 500,219 ha y se regeneraron 354,107 ha. La pérdida neta de bosque fue de 146,112 ha. Los informes indican que entre 2006 y 2010, el ritmo de deforestación fue mayor en comparación con los dos períodos anteriores.

Los informes del estudio del área forestal en Guatemala para los períodos 1991/1993-2001, 2001-2006 y 2006-2010 evidencian que el área cubierta por bosques disminuyó de 47.32 % al 34 % de la superficie del país. Por el contrario, el aumento en el ritmo de reforestación ha contribuido a mitigar la tasa de pérdida neta de bosque. Los valores iniciales y finales de la cobertura boscosa en cada período fueron usados para determinar los modelos de regresión.

Osorio, Mas, Guerra y Maass (2015), determinaron modelos probabilísticos de las regiones con mayor tendencia a la deforestación y al cambio del uso de la tierra en la cuenca del río Coyuquilla, México, de 1986 a 2011. Con los modelos probabilísticos, se evaluaron esas relaciones durante el período de 1986 a 2000 y se validaron para el período de 2000 a 2011 utilizando el análisis de la característica de operación relativa (ROC).

Farfán, Rodríguez-Tapia y Mas (2016) determinaron la variación en el uso del suelo y la deforestación en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, México, de 2000 a 2008. Se analizaron dos períodos: de 2000 a 2004 y de 2004 a 2008. Se calculó una tasa uniforme de cambio y se comparó con el cambio observado en cada período. Se denominó tasa de cambio activa si la tasa es mayor que la tasa de cambio uniforme. Por el contrario, se denominó tasa de cambio latente. Se determinó que en el primer período, la deforestación fue activa y en el período final fue latente debido a un plan de manejo de la reserva.

Con respecto al potencial de captura de CO<sub>2</sub> de los bosques se ha publicado en varios informes su fijación con especies vegetales. Se indica que esta estimación es muy compleja, porque el dióxido de carbono fijado se calcula con un balance del gas consumido en la fotosíntesis para generar biomasa, la cantidad que expulsan los árboles durante la respiración, la masa capturada por el humus del suelo y la fracción que se expulsa cuando la biomasa se degrada. Esta fijación es usada para determinar los costos por captura de carbono de un proyecto de conservación forestal. Las conclusiones de esos informes se describen a continuación.

Nabuursy Mohren (1993) publicaron el potencial de captura de CO<sub>2</sub> utilizando actividades forestales para varias especies de árboles en América, Europa, Asia y Oceanía aplicando el modelo CO2FIX. El modelo estima la

fijación del gas con el ritmo de crecimiento de los árboles, la velocidad de pérdida de biomasa y la fracción de dióxido de carbono emitido a la atmósfera con respecto al fijado por el suelo, asumiendo un estado estable en el área, sin alteraciones significativas en clima y contaminación. En el informe, se indica que el potencial de captura es temporal. Durante el crecimiento de los árboles, el CO<sub>2</sub> es fijado para la producción de estructuras en la raíz, el tallo y las hojas, observándose que su absorción es alta. Sin embargo, la tasa de crecimiento se reduce y los árboles pierden algunas de sus partes que al degradarse, emiten el gas a la atmósfera. Al alcanzar el equilibrio, se igualan las tasas de captura y emisión de dióxido de carbono, causando detención en su captura.

El informe propone que la absorción de CO<sub>2</sub> se calcule ya sea a largo plazo o en la rotación inicial. En la rotación inicial, se busca plantar los árboles y cortarlos después de cierto tiempo para luego reforestar el área. A pesar de obtener altos rendimientos de captura, esto es poco recomendable porque el carbono fijado se pierde totalmente al cortar el árbol para usar la leña como un combustible, debido a que el carbono regresa a la atmósfera. Por lo tanto, la captura neta de carbono es nula. Los autores concluyeron que se captura más dióxido de carbono en proyectos a largo plazo dado que representa una captura permanente del gas. Se presentan resultados de captura de carbono para el *Pinus caribaea* que se distribuye en la costa del Atlántico de Centro América y en el Caribe, estimándose una captura promedio a largo plazo de 89 Mg C/ha.

Nabuurs y Schelhass (2002) continuaron con la investigación utilizando el modelo CO2FIX para 16 especies plantadas en bosques en Europa. En concordancia con el estudio publicado previamente, se indicó que la tasa de captura de carbono varía con el tiempo, provocando incertidumbre en el cálculo de la fijación de carbono. Para evitar ese inconveniente, se sugiere utilizar la media a largo plazo, una estimación más estable que permite reducir la

incertidumbre para establecer políticas de manejo forestal. La media se calcula sumando los valores netos de captura anual de carbono de 0 al  $n$ -ésimo año y dividiendo la suma por la cantidad de años,  $n$ . Los autores enfatizan el uso de estimaciones a largo plazo de la captura biológica de carbono para crear políticas de manejo forestal. Se utilizó el criterio a largo plazo propuesto para estimar la captura de CO<sub>2</sub> por los bosques, de tal forma que la estimación de la fijación de CO<sub>2</sub> por hectárea de bosque para Guatemala sea acertada.

Richards (2004) describe métodos para estimar el costo unitario de CO<sub>2</sub> capturado por bosques en distintos países con metodologías que estiman su fijación por bosques. El autor indica que la masa capturada depende del método de cálculo y describe cinco métodos para calcular el carbono fijado: curvas de flujo, flujo promedio, captura acumulada, carbono almacenado promedio y conservado. El primer método indica la variación de la fijación en el tiempo. El segundo método es una estimación de la fijación durante el período del proyecto de conservación. El tercer método contabiliza todo el carbono fijado desde el inicio del proyecto de conservación. El cuarto método mide el aumento del gas fijado en promedio sobre el inventario capturado. El quinto método mide las de emisiones evitadas por conservación forestal.

En esta investigación se buscó determinar la cantidad de toneladas de CO<sub>2</sub> capturadas por hectárea, que permitiera proyectar su captura por unidad de área reforestada o conservada con el modelo de regresión del área forestal. La fijación del gas por unidad de área está relacionada con los últimos tres métodos indicados por Richards (2004), quien resumió las estimaciones de dióxido de carbono capturado por unidad de área presentadas en informes previos.

La estimación del carbono fijado por bosques permitió determinar los ingresos potenciales al capturar CO<sub>2</sub> en un área boscosa, estimar costos y de esta forma, se podrán plantear políticas de manejo forestal basadas en estimaciones confiables. Los estudios descritos indican que las estimaciones a largo plazo son las más certeras para evitar sobreestimar el potencial de fijación. Por tal razón, se utilizaron estimaciones a largo plazo de absorción de dióxido de carbono.



## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Bosques y deforestación**

Un bosque se define como una extensión de terreno mayor a 3 hectáreas cubierta de árboles. El bosque es un ecosistema compuesto por componentes bióticos (vivos) y elementos abióticos (inertes) (Grijpma, 2008). Los árboles son plantas portadoras de semillas o espermatofitas (Carreto, 2008). Las espermatofitas se clasifican en gimnospermas o angiospermas. Las gimnospermas son llamadas coníferas y las angiospermas son llamadas latifoliadas.

De acuerdo a las especies que los componen, los bosques se clasifican en homogéneos y heterogéneos. Los bosques homogéneos se conforman de especies que se adaptan a condiciones particulares del ambiente. Un bosque es considerado homogéneo si el 80 % de sus árboles pertenecen a una misma especie (Grijpma, 2008). A diferencia de los bosques homogéneos, los bosques heterogéneos están conformados de varias especies de árboles.

#### **2.1.1. Clases de bosques**

Los bosques se clasifican en bosques de coníferas, bosques latifoliados y bosques mixtos.

### **2.1.1.1. Bosques de coníferas**

Las coníferas pertenecen a las gimnospermas. Las coníferas son especies gimnospermas de madera blanda (Carreto, 2008) y se caracterizan por tener hojas perennes aciculadas (en forma de aguja) y semillas expuestas (Grijpma, 2008). Las coníferas tienen un desarrollo rápido en grosor que se aprovecha para la producción de madera y papel.

### **2.1.1.2. Bosques latifoliados**

Las latifoliadas pertenecen a las angiospermas. Las latifoliadas son especies angiospermas de madera dura y se caracterizan por tener hojas perennes o caducas anchas (Carreto, 2008). A diferencia de las coníferas, sus semillas están cubiertas por un tejido vegetal (Grijpma, 2008). Los bosques latifoliados se caracterizan por ser los bosques que más captura de carbono realizan (INAB-CONAP, 2015).

### **2.1.1.3. Bosques mixtos**

Los bosques mixtos están formados por una mezcla de coníferas y latifoliadas (Grijpma, 2008), cuya composición de cualquier especie varía entre el 25 y el 75 % del bosque. En Guatemala, los géneros predominantes de los bosques mixtos son *Pinus* y *Quercus*.

Los bosques también se clasifican por la edad de sus árboles en coetáneos y multietáneos. Un bosque coetáneo está formado por árboles aproximadamente de la misma edad. Un bosque multietáneo está formado por árboles de distintas edades.

## **2.1.2. Deforestación**

La deforestación se define como el conjunto de procesos que ocasionan una transición de actividades forestales a no forestales en el uso de la tierra (Gómez-Echeverri, 2002). Si los productos derivados de los árboles se usan como combustible, se genera CO<sub>2</sub> por la combustión de la celulosa. Además, se disminuye el potencial de captura de CO<sub>2</sub> por la fotosíntesis (Gómez-Echeverri, 2002).

### **2.1.2.1. Causas de la deforestación**

A pesar de los beneficios de los bosques como generadores de oxígeno, fijadores de CO<sub>2</sub> y conservadores de biodiversidad, la deforestación representa un riesgo. La deforestación es causada principalmente por la expansión de la frontera agraria, ante el reto de alimentar a una población mundial en crecimiento. Se estima que en 2050, la población alcanzará los 9 millardos con impacto severo en la reducción de masa boscosa (FAO, 2016). Las prácticas agrícolas y de ganadería causan el incendio de áreas boscosas para obtener el terreno libre de bosques. Es necesario establecer mecanismos sostenibles para la agricultura y la ganadería. Otras causas de la deforestación son los asentamientos humanos, la infraestructura y la minería (FAO, 2016).

## **2.1.2.2. Soluciones a la deforestación y el control del cambio climático**

### **2.1.2.2.1. Políticas de control de cambio climático**

La reforestación es la principal medida para recuperar la cobertura boscosa en las áreas deforestadas, recuperando la vegetación natural de la zona. Es fundamental que la reforestación se realice con especies propias de la región a reforestar. De lo contrario, la introducción de especies distintas pueden alterar el equilibrio en el ecosistema.

Se estima que el cambio climático tiene mayor impacto en los países en desarrollo que en los países industrializados (Pearce, 2002). Sin embargo, los países en desarrollo no muestran interés en el control de emisiones. Algunos beneficios para los países en desarrollo de controlar el cambio climático son (Pearce, 2002):

1. Los países que tienen riesgo potencial de sufrir consecuencias graves del cambio climático dada su ubicación geográfica, que a pesar de no realizar esfuerzos para detenerlo, pueden beneficiarse del compromiso de otros países en la mitigación de la tasa de calentamiento global.
2. Si los países industrializados invierten en proyectos de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en países en desarrollo, pueden contabilizarlas como propias al aplicar el Mecanismo de Desarrollo Limpio (CDM).

3. Los países industrializados pueden comprar certificados de carbono a países en desarrollo, según lo estipulado en el Protocolo de Kyoto (Naciones Unidas, 1998).
4. El incumplimiento en la disminución de emisiones causará el pago de una compensación destinada a mitigar los efectos del cambio climático en países vulnerables.

La implementación conjunta (JI) está compuesta por un país inversionista y un país "hospedero" que invierte en proyectos de reducción de emisiones en un país en desarrollo para contabilizar la reducción lograda (Pearce, 2002).

La implementación conjunta (JI) tiene su fundamento en: (1) El efecto de la emisión de una cantidad másica de gas de efecto invernadero es el mismo, independientemente del lugar en donde se emita (Pearce, 2002). De igual forma, la reducción de una cantidad másica de gas de efecto invernadero tiene el mismo efecto sin importar el lugar de esa reducción. (2) La reducción de las emisiones es más costoso en países industrializados que en países en desarrollo. De esta forma, se optimizan recursos al reducir las emisiones en países en desarrollo. Los beneficios ambientales esperados se comparan con una línea de base en la que se proyecta la situación ambiental de no ejecutarse el proyecto (Pearce, 2002).

El mecanismo de desarrollo limpio (CDM) impulsa proyectos con potencial de generar beneficios comparados con la línea basal. Se debe realizar un análisis costo-beneficio de los proyectos, considerando a todos los sectores. Un proyecto de CDM debe buscar beneficios para el país y a la vez busque reducir la pobreza. Se debe tener precaución con los proyectos que perjudican a los pobres a pesar de tener un beneficio para otros sectores (Pearce, 2002).

El mecanismo del desarrollo limpio (CDM) busca el desarrollo sostenible, a través de la inversión e incorporación de tecnología en los países en desarrollo. La aplicación más conveniente de estos sistemas ocurre cuando las fuentes de contaminación están dispersas y no están concentradas en una región que provoque alta concentración de contaminación en ese lugar (Stewart, 2002).

#### **2.1.2.2.2. Sistemas de comercio de emisiones de gases de efecto invernadero**

En el sistema de cuotas de contaminación, se requiere de una autoridad gubernamental que fije los límites máximos de emisiones a cada fuente de emisión de un determinado gas de efecto invernadero. De esta forma, se determinan cuotas de contaminación iniciales para cada fuente, las cuales son limitadas y adquieren un valor económico. Si una fuente no alcanza la cuota máxima de emisiones en un período, tiene un excedente de cuotas del contaminante que puede venderse a otra fuente que haya excedido su límite máximo de emisión, para que esta última pueda cumplir con el objetivo de emisión máxima del gas. El objetivo es la reducción de emisiones a través de procesos económicamente eficientes (Stewart, 2002).

El mecanismo de certificados de reducción de emisiones (CERS) está considerado en el Protocolo de Kyoto. El mecanismo consiste en la venta de certificados de reducción de emisiones (CERS) de un país en desarrollo a uno industrializado, después de demostrar disminución de emisiones con respecto a una línea basal (Pearce, 2002).

## 2.2. Modelos de regresión

El análisis de regresión establece si existe relación entre una variable dependiente  $y$  y una o más variables independientes  $x_i$ . El objetivo del análisis es determinar una función que permita modelar el comportamiento de la variable  $y$  a partir de valores de  $x_i$ . Es decir, se busca un modelo de la forma:

$$\hat{y} = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

(Ec. 1) (Mendenhall, 1986)

En particular, para un modelo de regresión lineal simple, la variable  $y$  es función de la variable  $x$  y se representa con la ecuación (2).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$$

(Ec. 2) (Mendenhall, 1986)

En la ecuación (2),  $\beta_0$  y  $\beta_1$  son coeficientes de regresión y  $\varepsilon$  es el término del error aleatorio. El coeficiente de regresión  $\beta_1$  es la pendiente del modelo y equivale al cambio en el valor de  $y$  dado un cambio unitario en  $x$ .

### 2.2.1. Método de mínimos cuadrados

En el método de mínimos cuadrados se minimiza la sumatoria de los errores de los valores observados de  $y$  con los valores estimados con la ecuación (2).

Para el punto  $(x_i, y_i)$ , la ecuación (2) se convierte en la ecuación (3)

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i$$

(Ec. 3) (Mendenhall, 1986)

La estimación de  $y_i$  es

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i$$

(Ec. 4) (Mendenhall, 1986)

Donde  $\hat{\beta}_0$  y  $\hat{\beta}_1$  son los estimadores de los coeficientes de regresión.

El error cuadrático, según (3), es

$$\varepsilon_i^2 = (y_i - \hat{y}_i)^2 = [y_i - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i)]^2$$

(Ec. 5) (Mendenhall, 1986)

La suma de los cuadrados de los errores se denota como  $L$

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i)]^2$$

(Ec. 6) (Mendenhall, 1986)

Se calculan los estimadores de los coeficientes de regresión verdaderos,  $\hat{\beta}_0$  y  $\hat{\beta}_1$ , que minimizan la ecuación (6) al derivar parcialmente con respecto a  $\hat{\beta}_0$  y  $\hat{\beta}_1$  y resolviendo el sistema de ecuaciones lineales al igualar las derivadas a 0, para calcular el mínimo relativo.

$$\frac{\partial L}{\partial \hat{\beta}_0} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i)] = -2 \left( \sum_{i=1}^n y_i - n \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_i \right) = 0$$

(Ec. 7) (Mendenhall, 1986)

$$\frac{\partial L}{\partial \hat{\beta}_1} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i)] x_i = -2 \left( \sum_{i=1}^n x_i y_i - \hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n x_i - \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) = 0$$

(Ec. 8) (Mendenhall, 1986)

Los valores de  $\hat{\beta}_0$  y  $\hat{\beta}_1$  que minimizan la función (6) son:

$$\hat{\beta}_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

(Ec. 9) (Mendenhall, 1986)

$$\hat{\beta}_0 = y - \hat{\beta}_1 x$$

(Ec. 10) (Mendenhall, 1986)

### 2.2.1.1. Propiedades de los estimadores de mínimos cuadrados

Los residuales se definen como el error del ajuste del modelo en la observación  $i$ :

$$e_i = y_i - \hat{y}_i$$

(Ec. 11) (Montgomery, 2006)

La suma de los cuadrados de los errores es:

$$SSE = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

(Ec. 12) (Montgomery, 2006)

Un estimador insesgado de  $\sigma^2$  es:

$$\sigma^2 = \frac{SSE}{n-2}$$

(Ec. 13) (Montgomery, 2006)

Una forma equivalente de calcular  $SSE$  es:

$$SSE = SST - \hat{\beta}_1 S_{xy}$$

(Ec. 14) (Montgomery, 2006)

donde

$$SST = \sum_{i=1}^n y_i^2 - ny^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - y)^2$$

(Ec. 15) (Montgomery, 2006)

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n y_i (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)}{n}$$

(Ec. 16) (Montgomery, 2006)

El error estándar estimado de la pendiente es:

$$se(\hat{\beta}_1) = \sqrt{\frac{\hat{\sigma}^2}{S_{xx}}}$$

(Ec. 17) (Montgomery, 2006)

donde

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}{n}$$

(Ec. 18) (Montgomery, 2006)

y el error estándar estimado de la ordenada al origen es:

$$se(\hat{\beta}_0) = \sqrt{\hat{\sigma}^2 \left( \frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{S_{xx}} \right)}$$

(Ec. 19) (Montgomery, 2006)

## 2.2.2. Pruebas de hipótesis

En las pruebas de hipótesis se busca probar si los coeficientes de regresión son iguales a una constante.

### 2.2.2.1. Prueba t para la pendiente del modelo

Se desea probar la hipótesis que  $\hat{\beta}_1$  es igual a una constante  $\beta_{1,0}$ . Las hipótesis son:

$$H_0 : \hat{\beta}_1 = \beta_{1,0}$$

(Ec. 20) (Montgomery, 2006)

$$H_1 : \hat{\beta}_1 \neq \beta_{1,0}$$

(Ec. 21) (Montgomery, 2006)

donde  $H_0$  es la hipótesis nula y  $H_1$  es la hipótesis alterna.

La prueba es bilateral. El estadístico de prueba es:

$$t_p = \frac{\hat{\beta}_1 - \beta_{1,0}}{\frac{\hat{\sigma}^2}{\sqrt{S_{xx}}}} = \frac{\hat{\beta}_1 - \beta_{1,0}}{se(\hat{\beta}_1)}$$

(Ec. 22) (Montgomery, 2006)

El estadístico t sigue la distribución t de Student con  $\nu = n - 2$  grados de libertad. La hipótesis nula  $H_0$  se rechaza a un nivel de significancia  $\alpha$  si

$$|t_p| > t_{\alpha/2, n-2}$$

(Ec. 23) (Montgomery, 2006)

### 2.2.2.2. Prueba t para la ordenada al origen del modelo

Se desea probar la hipótesis de que  $\hat{\beta}_0$  es igual a una constante  $\beta_{0,0}$ . Las hipótesis son:

$$H_0 : \hat{\beta}_0 = \beta_{0,0} \quad (\text{Ec. 24}) \text{ (Montgomery, 2006)}$$

$$H_1 : \hat{\beta}_0 \neq \beta_{0,0} \quad (\text{Ec. 25}) \text{ (Montgomery, 2006)}$$

donde  $H_0$  es la hipótesis nula y  $H_1$  es la hipótesis alterna.

La prueba es bilateral. El estadístico de prueba es:

$$t_p = \frac{\hat{\beta}_0 - \beta_{0,0}}{\sqrt{\sigma^2 \left( \frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{S_{xx}} \right)}} = \frac{\hat{\beta}_0 - \beta_{0,0}}{se(\hat{\beta}_0)} \quad (\text{Ec. 26}) \text{ (Montgomery, 2006)}$$

El estadístico t sigue la distribución t de Student con  $\nu = n - 2$  grados de libertad. La hipótesis nula  $H_0$  se rechaza a un nivel de significancia  $\alpha$  si

$$|t_p| > t_{\alpha/2, n-2} \quad (\text{Ec. 27}) \text{ (Montgomery, 2006)}$$

### 2.2.2.3. Significación de la regresión

La prueba de significación de la regresión es el caso de las ecuaciones (20) y (21), con  $\beta_{1,0} = 0$ ,

$$H_0 : \hat{\beta}_1 = 0 \quad (\text{Ec. 28}) \text{ (Montgomery, 2006)}$$

$$H_1 : \hat{\beta}_1 \neq 0$$

(Ec. 29) (Montgomery, 2006)

Rechazar  $H_0$  indica que las variables  $x$  y  $y$  están relacionadas linealmente.

#### 2.2.2.4. Significación de la regresión con el enfoque del análisis de varianza

El análisis de varianza (ANOVA) es un método alternativo a la prueba  $t$  para probar la significación de la regresión. Generalmente, este método es exclusivo para pruebas bilaterales mientras que la prueba  $t$  también puede ser utilizada en pruebas unilaterales (Montgomery, 2006).

El análisis de varianza divide las causas de la variabilidad total de la variable  $y$ . En ANOVA, la suma total corregida de los cuadrados de  $y$  ( $SST$ ) es igual a la suma de los cuadrados de regresión ( $SSR$ ) más la suma de los cuadrados de los errores ( $SSE$ ). Esto se expresa matemáticamente con la ecuación (30).

$$SST = SSR + SSE$$

(Ec. 30) (Montgomery, 2006)

donde

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \nu = n - 1$$

(Ec. 31) (Montgomery, 2006)

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2, \nu = 1$$

(Ec. 32) (Montgomery, 2006)

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2, \nu = n-2$$

(Ec. 33) (Montgomery, 2006)

La prueba de las hipótesis de las ecuaciones (28) y (29) se realiza a través del estadístico de prueba que sigue la distribución  $F_{1,n-2}$

$$F_p = \frac{\frac{SSR}{1}}{\frac{SSE}{n-2}} = \frac{MSR}{MSE}$$

(Ec. 34) (Montgomery, 2006)

donde  $MSR$  es el cuadrado medio de la regresión y  $MSE$  es el cuadrado medio de los errores. La hipótesis nula (28) se rechaza si

$$F_p > F_{\alpha,1,n-2}$$

(Ec. 35) (Montgomery, 2006)

### 2.2.3. Intervalos de confianza de los coeficientes de regresión

Si los valores de error  $\varepsilon_i$  son independientes y siguen la distribución normal, es posible estimar los intervalos de confianza de la pendiente ( $\beta_1$ ) y la ordenada al origen ( $\beta_0$ ), a través de las siguientes ecuaciones, con un nivel de significancia  $\alpha$ .

$$\hat{\beta}_1 - t_{\alpha/2,n-2} \sqrt{\frac{\hat{\sigma}^2}{S_{xx}}} \leq \beta_1 \leq \hat{\beta}_1 + t_{\alpha/2,n-2} \sqrt{\frac{\hat{\sigma}^2}{S_{xx}}}$$

(Ec. 36) (Montgomery, 2006)

$$\hat{\beta}_0 - t_{\alpha/2,n-2} \sqrt{\hat{\sigma}^2 \left( \frac{1}{n} + \frac{x^2}{S_{xx}} \right)} \leq \beta_0 \leq \hat{\beta}_0 + t_{\alpha/2,n-2} \sqrt{\hat{\sigma}^2 \left( \frac{1}{n} + \frac{x^2}{S_{xx}} \right)}$$

(Ec. 37) (Montgomery, 2006)

#### 2.2.4. Predicción a partir de los modelos de regresión lineal

El intervalo de confianza a un nivel de significancia  $\alpha$  para el valor de  $y_0$  a partir de la estimación de  $\hat{y}_0$  cuando  $x = x_0$ .

$$\hat{y}_0 - t_{\alpha/2, n-2} \sqrt{\hat{\sigma}^2 \left[ 1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{S_{xx}} \right]} \leq y_0 \leq \hat{y}_0 + t_{\alpha/2, n-2} \sqrt{\hat{\sigma}^2 \left[ 1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{S_{xx}} \right]}$$

(Ec. 38) (Montgomery, 2006)

donde

$$\hat{y}_0 = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_0$$

(Ec. 39) (Montgomery, 2006)

#### 2.2.5. Coeficiente de correlación lineal

Este coeficiente mide la asociación lineal entre las variables  $x$  y  $y$ .

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n y_i (x_i - \bar{x})}{\left[ \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2}} = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} S_{yy}}}$$

(Ec. 40) (Montgomery, 2006)

Los valores de  $r$  oscilan entre -1 y 1. Donde ya sea valores de  $r$  iguales a -1 ó 1 indican una asociación lineal perfecta entre las variables. Si  $r$  es menor que 0, las variables están inversamente relacionadas. Por el contrario, si  $r$  es mayor que 0, las variables están directamente relacionadas. Si  $r$  es 0, las variables no están relacionadas linealmente.

### 2.2.5.1. Prueba de hipótesis del coeficiente de correlación

Se determina si existe relación lineal entre las variables. Las hipótesis son:

$$H_0 : \rho = 0$$

(Ec. 41) (Montgomery, 2006)

$$H_1 : \rho \neq 0$$

(Ec. 42) (Montgomery, 2006)

El estadístico de prueba es

$$t_p = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-R^2}}$$

(Ec. 43) (Montgomery, 2006)

La hipótesis nula se rechaza si

$$|t_p| > t_{\alpha/2, n-2}$$

(Ec. 44) (Montgomery, 2006)

Rechazar la hipótesis nula prueba la existencia de una relación lineal significativa entre las variables.

### 2.2.6. Coeficiente de determinación

El coeficiente de determinación indica el grado en que la variabilidad de los datos se explica por el modelo de regresión.

$$r^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

(Ec. 45) (Montgomery, 2006)

El recorrido de  $r^2$  está entre 0 y 1.

### 2.2.7. Método de mínimos cuadrados multivariado con enfoque matricial

El modelo clásico de regresión lineal

$$Y = z\beta + \varepsilon$$

(Ec. 46) (Johnson y Wickern, 2007)

Dado un vector de los valores de respuesta para  $n$  observaciones

$$\vec{Y}^T = [Y_1, Y_2, \dots, Y_n]$$

(Ec. 47) (Johnson y Wickern, 2007)

La matriz de los valores de las  $r$  variables predictoras para las  $n$  observaciones es:

$$Z = \begin{pmatrix} 1 & z_{11} & \dots & z_{1r} \\ 1 & z_{21} & \dots & z_{2r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & z_{n1} & \dots & z_{nr} \end{pmatrix}$$

(Ec. 48) (Johnson y Wickern, 2007)

El vector de los regresores del modelo es:

$$\vec{\beta}^T = [\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_r]$$

(Ec. 49) (Johnson y Wickern, 2007)

El vector del error es:

$$\vec{\varepsilon}^T = [\varepsilon_0, \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_r]$$

(Ec. 50) (Johnson y Wickern, 2007)

El sistema de ecuaciones a resolver se representado matricialmente es:

$$(Z^T Z)\hat{\beta} = Z^T Y$$

(Ec. 51) (Johnson y Wickern, 2007)

La solución de (51) para los estimadores de los regresores del modelo es:

$$\hat{\beta} = (Z^T Z)^{-1} Z^T Y$$

(Ec. 52) (Johnson y Wickern, 2007)

El valor esperado de la variable de respuesta  $Y_0$  dada una observación cuyos valores son  $Z_0$  es:

$$E(Y_0|Z_0^T) = Z_0^T \hat{\beta}$$

(Ec. 53) (Johnson y Wickern, 2007)

### 2.2.7.1. Intervalo de confianza de un modelo de regresión multivariado

Si los errores siguen la distribución normal, el intervalo al  $100(1-\alpha)\%$  de confianza es:

$$Z_0^T \hat{\beta} \pm t_{n-r-1(\alpha/2)} \sqrt{\left( Z_0^T (Z^T Z)^{-1} Z_0 \right) s^2}$$

(Ec. 54) (Johnson y Wickern, 2007)

donde

$t_{n-r-1(\alpha/2)}$  es el percentil  $100(\alpha/2)$  de la distribución t con  $n-r-1$  grados de libertad.

$$s^2 = \frac{(Y - Z\hat{\beta})^T (Y - Z\hat{\beta})}{n-r-1}$$

(Ec. 55) (Johnson y Wickern, 2007)

### 2.2.7.2. Intervalo de predicción de un modelo de regresión multivariado

Si los errores siguen la distribución normal, el intervalo de predicción al  $100(1-\alpha)\%$  de confianza es:

$$Z_0^T \hat{\beta} \pm t_{n-r-1(\alpha/2)} \sqrt{s^2 \left( 1 + Z_0^T (Z^T Z)^{-1} Z_0 \right)}$$

(Ec. 56) (Johnson y Wickern, 2007)

donde

$t_{n-r-1(\alpha/2)}$  es el percentil  $100(\alpha/2)$  de la distribución t con  $n-r-1$  grados de libertad.

### 2.2.8 Método de mínimos cuadrados generalizados

Cuando el modelo de regresión clásico no cumple con los supuestos del modelo de regresión clásico, se utiliza el método de mínimos cuadrados generalizados.

Considérese el modelo de regresión lineal

$$Y_t = \beta_1 + \beta_2 X_t + u_t$$

(Ec. 57) (Gujarati, 2004)

Se supone que el término del error está autocorrelacionado con el esquema AR(1)

$$u_t = \rho u_{t-1} + \varepsilon_t$$

(Ec. 58) (Gujarati, 2004)

donde  $\rho$  es el coeficiente de autocorrelación serial.

La ecuación (57) para (t-1) se multiplica por  $\rho$

$$\rho Y_{t-1} = \rho \beta_1 + \rho \beta_2 X_{t-1} + \rho u_{t-1}$$

(Ec. 59) (Gujarati, 2004)

Al restar la ecuación (59) de (57)

$$Y_t - \rho Y_{t-1} = \beta_1(1 - \rho) + \beta_2(1 - \rho X_{t-1}) + (u_t - \rho u_{t-1})$$

(Ec. 60) (Gujarati, 2004)

Sea

$$\varepsilon_t = u_t - \rho u_{t-1}$$

(Ec. 61) (Gujarati, 2004)

$$Y_t - \rho Y_{t-1} = \beta_1(1 - \rho) + \beta_2(X_t - \rho X_{t-1}) + \varepsilon_t$$

(Ec. 62) (Gujarati, 2004)

La ecuación (62) se representa como:

$$Y_t^* = \beta_1^* + \beta_2^* X_t^* + \varepsilon_t$$

(Ec. 63) (Gujarati, 2004)

donde

$$Y_t^* = Y_t - \rho Y_{t-1}$$

(Ec. 64) (Gujarati, 2004)

$$\beta_1^* = \beta_1(1-\rho)$$

(Ec. 65) (Gujarati, 2004)

$$\beta_2^* = \beta_2$$

(Ec. 66) (Gujarati, 2004)

$$X_t^* = X_t - \rho X_{t-1}$$

(Ec. 67) (Gujarati, 2004)

### 3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1. Modelos de regresión de la cobertura boscosa en Guatemala

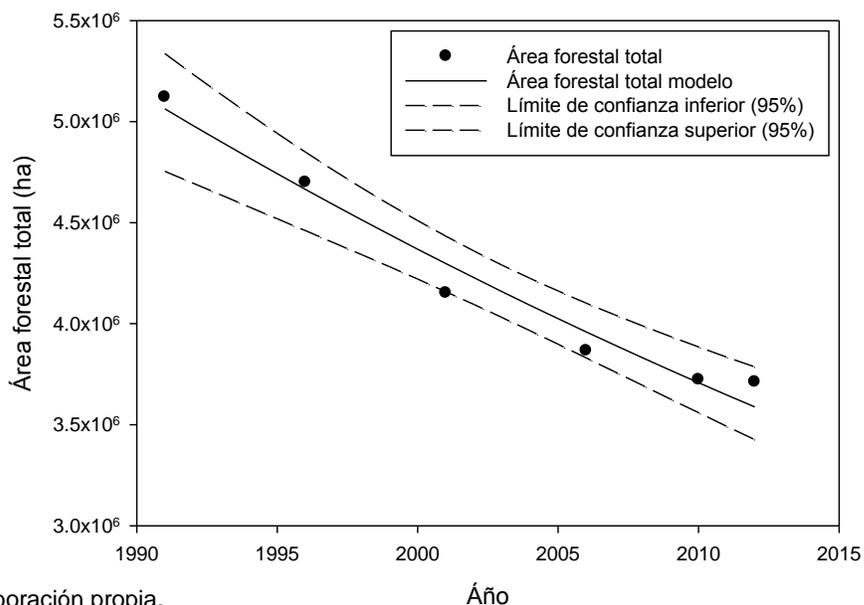
Los valores utilizados para calcular los modelos fueron obtenidos de los informes de la dinámica forestal, los cuales son generalmente de un período quinquenal. La figura 2 muestra el comportamiento del total de la cobertura boscosa de Guatemala en función del tiempo, reflejando un modelo del tipo exponencial con un coeficiente de determinación de 0.9704. Se muestra una tendencia descendente, la cual es modelada con la siguiente ecuación:

$$y = 5063688.89 \exp[-0.0164(x - 1991)] \quad (\text{Ec. 67})$$

$y$ : El área forestal (ha)

$x$ : El año

Figura 2. Cobertura boscosa de Guatemala en función del tiempo. Modelo exponencial. Período 1991-2012



Fuente: elaboración propia.

La figura 3 muestra el comportamiento de la cobertura de bosques latifoliados en Guatemala en función del tiempo con un modelo del tipo exponencial. Se muestra con tendencia descendente, la cual es modelada con la siguiente ecuación

$$y = 4496639.69 \exp[-0.026(x - 1991)]$$

(Ec. 68)

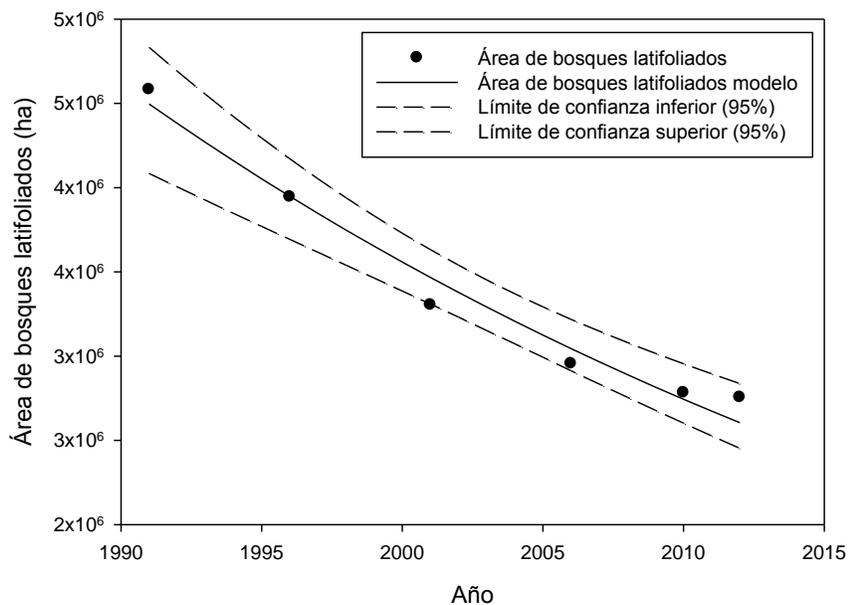
donde:

$y$  : El área de bosques latifoliados (ha)

$x$ : El año

El coeficiente de determinación del modelo (68) fue de 0.9755.

**Figura 3. Cobertura de bosques latifoliados en función del tiempo. Modelo exponencial. Período 1991-2012**



Fuente: elaboración propia.

La figura 4 muestra el comportamiento de la cobertura de bosques de coníferas en Guatemala en función del tiempo con un modelo del tipo cuadrático. Se muestra una tendencia descendente en los primeros años, hasta antes de 2003 y a partir de ese año, la cobertura de coníferas tiene una tendencia ascendente, la cual es modelada con la siguiente ecuación

$$y = 347475.03 - 15887.77(x - 1991) + 643.27(x - 1991)^2 \quad (\text{Ec. 69})$$

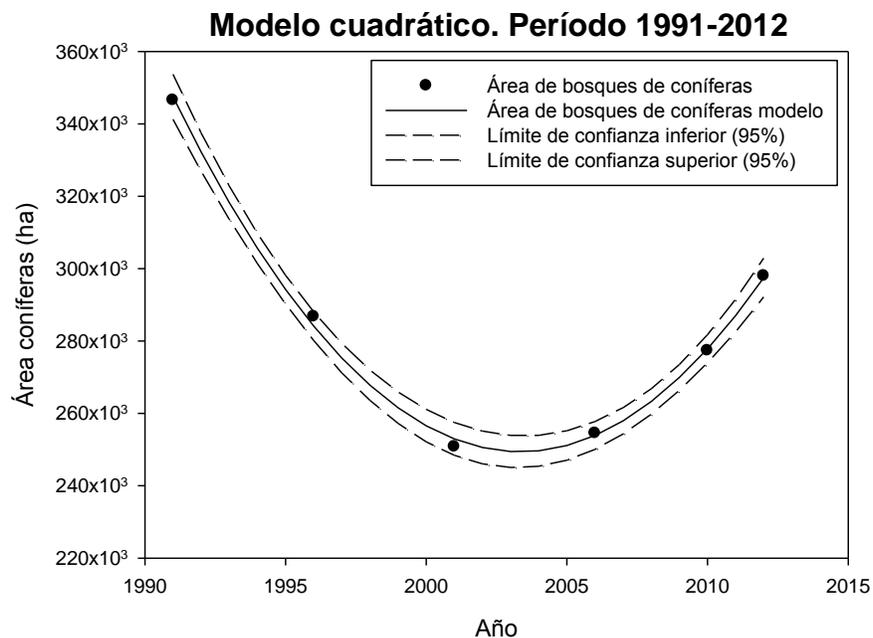
donde:

$y$  : El área de bosques de coníferas (ha)

$x$  : El año

El coeficiente de determinación del modelo (69) fue de 0.9978.

Figura 4. **Cobertura de bosques de coníferas en función del tiempo.**



Fuente: elaboración propia.

La figura 5 muestra el comportamiento de la cobertura de bosques mixtos en Guatemala en función del tiempo con un modelo del tipo cúbico. Se muestra una tendencia cúbica, la cual es modelada con la siguiente ecuación

$$y = 194297.42 - 81169.03(x - 1991) - 4519.94(x - 1991)^2 + 66.81(x - 1991)^3 \quad (\text{Ec. 70})$$

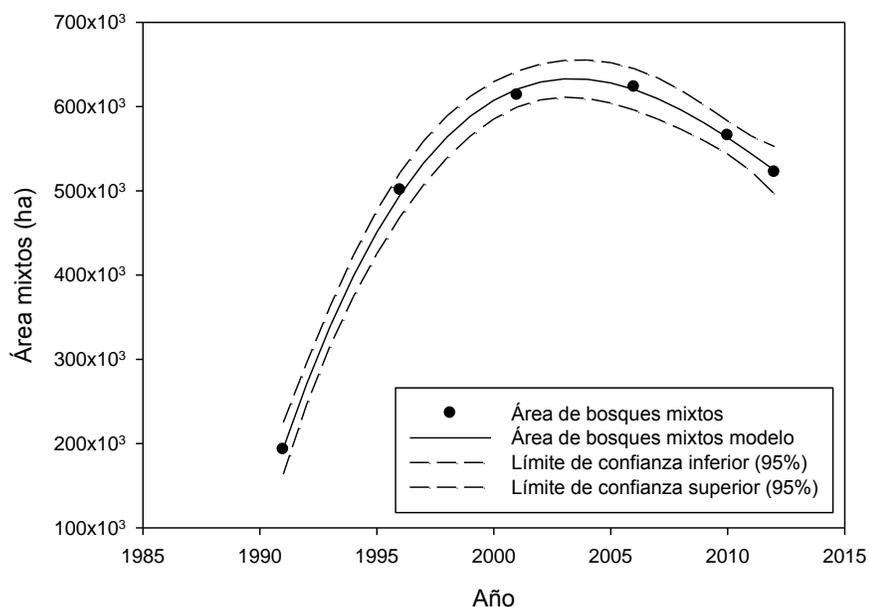
donde:

$y$  : El área de bosques mixtos (ha)

$x$  : El año

El coeficiente de determinación del modelo (70) fue de 0.9992.

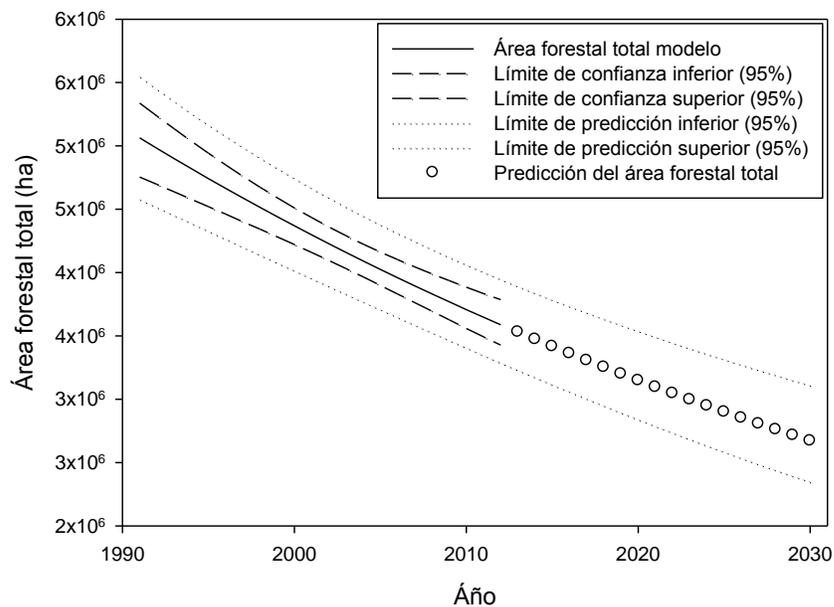
Figura 5. **Cobertura de bosques mixtos en función del tiempo. Modelo cúbico. Período 1991-2012**



Fuente: elaboración propia.

El modelo exponencial obtenido a través del método de mínimos cuadrados (67), predice la cobertura forestal de 2013 a 2030. En el año 2030, se proyecta que esta cobertura forestal disminuya a  $2.67 \times 10^6$  hectáreas. En la figura 6, se muestran los intervalos de predicción al 95 % de confianza y en la tabla II las proyecciones para algunos años del período 2013-2030.

Figura 6. **Proyección de la cobertura boscosa de Guatemala. Período 2013-2030**



Fuente: elaboración propia.

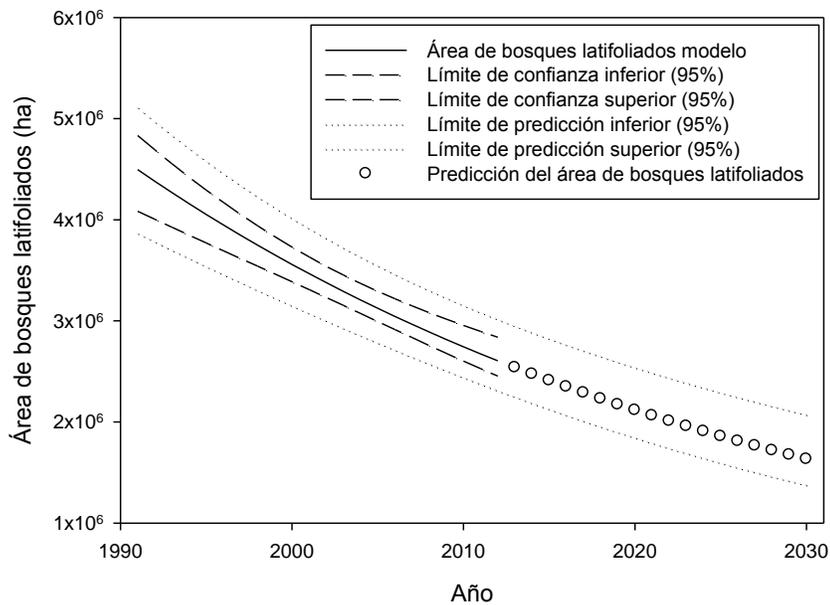
Tabla II. **Proyección de la cobertura boscosa de Guatemala. Período 2013-2030**

| Año  | Área forestal (ha) |
|------|--------------------|
| 2013 | 3,529,991          |
| 2017 | 3,305,855          |
| 2021 | 3,095,951          |
| 2025 | 2,899,375          |
| 2030 | 2,671,113          |

Fuente: elaboración propia.

El modelo exponencial (68) proyecta que para el año 2030, el área de bosques latifoliados disminuirá a  $1.63 \times 10^6$  hectáreas. Esta información se presenta en la figura 7 y en tabla III para el período 2013-2030.

**Figura 7. Proyección del área de bosques latifoliados. Período 2013-2030**



Fuente: elaboración propia.

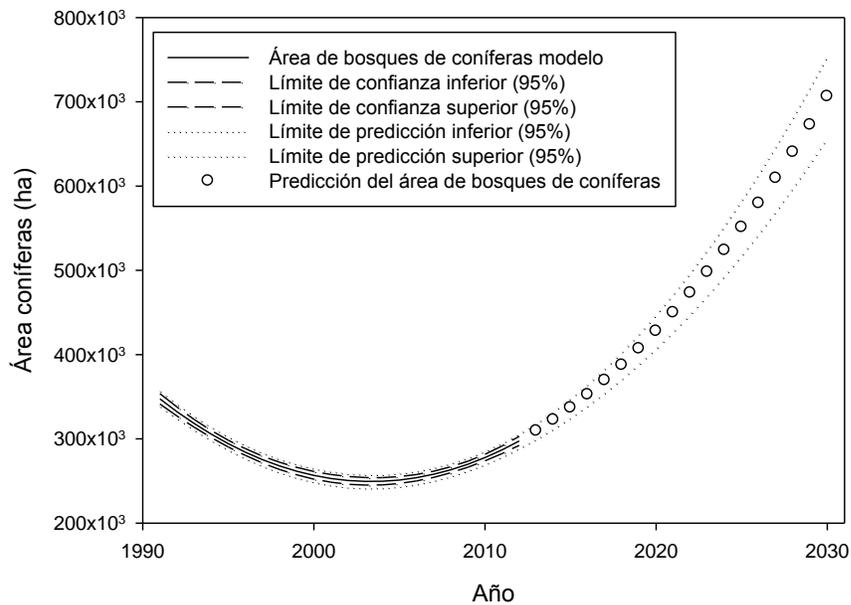
**Tabla III. Proyección del área de bosques latifoliados Período 2013-2030**

| <b>Año</b> | <b>Área de bosques latifoliados (ha)</b> |
|------------|--|
| 2013       | 2,537,883                                |
| 2017       | 2,287,205                                |
| 2021       | 2,061,287                                |
| 2025       | 1,857,684                                |
| 2030       | 1,631,224                                |

Fuente: elaboración propia.

El modelo cuadrático (69) predice que en el año 2030, la cobertura de bosques de coníferas habrá aumentado a  $7.06 \times 10^5$  hectáreas. Esta información se presenta en la figura 8 y en la tabla IV para el período 2013-2030.

**Figura 8. Proyección del área de bosques de coníferas. Período 2013-2030**



Fuente: elaboración propia.

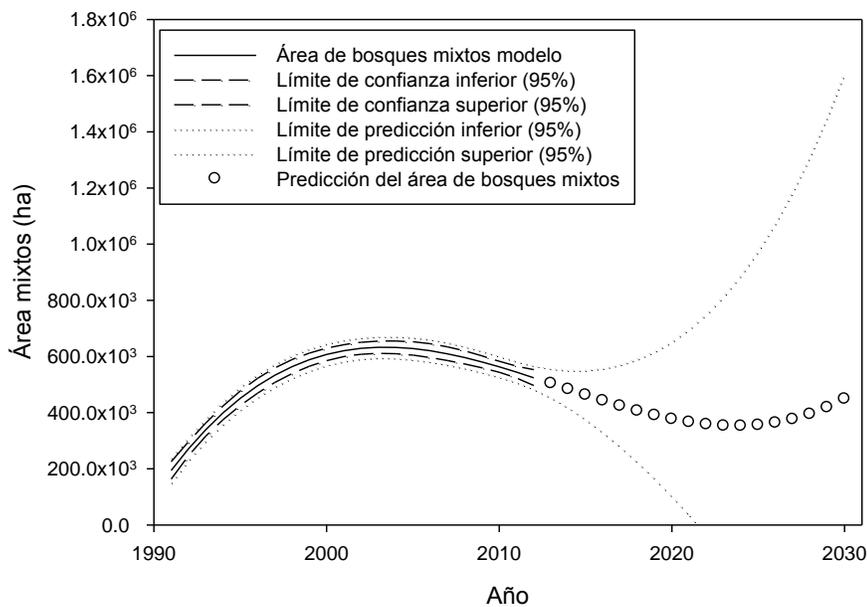
**Tabla IV. Proyección del área de bosques de coníferas. Período 2013-2030**

| <b>Año</b> | <b>Área de bosques de coníferas (ha)</b> |
|------------|--|
| 2013       | 309,287                                  |
| 2017       | 369,244                                  |
| 2021       | 449,785                                  |
| 2025       | 550,911                                  |
| 2030       | 706,266                                  |

Fuente: elaboración propia.

En el año 2030, se proyecta que la cobertura de bosques mixtos sea de  $4.48 \times 10^5$  hectáreas según el modelo cúbico (70), según se muestra en la figura 9 y en la tabla V para las proyecciones para el período 2013-2030.

Figura 9. **Proyección del área de bosques mixtos. Período 2013-2030**



Fuente: elaboración propia.

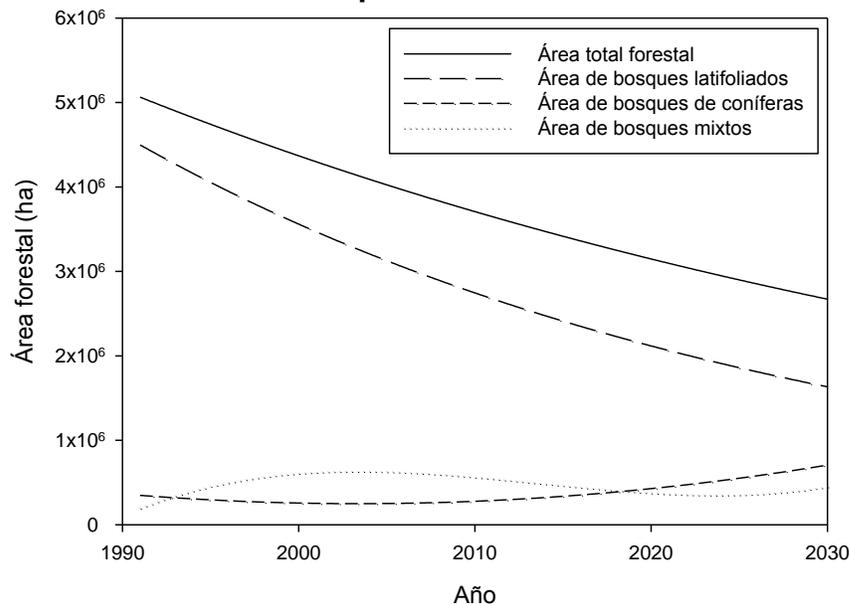
Tabla V. **Proyección del área de bosques mixtos. Período 2013-2030**

| <b>Año</b> | <b>Área de bosques mixtos (ha)</b> |
|------------|------------------------------------|
| 2013       | 503,757                            |
| 2017       | 423,464                            |
| 2021       | 365,290                            |
| 2025       | 354,891                            |
| 2030       | 448,160                            |

Fuente: elaboración propia.

La proyección de área forestal para el año 2030 se estima en  $2.67 \times 10^6$  hectáreas. La distribución por clase de bosque será del 58.6 % de bosques latifoliados, 25.4 % de bosques de coníferas y 16.0 % de bosques mixtos. La tendencia del área forestal total y por clase de bosque se muestra en la figura 10. En la tabla VI se presenta la distribución forestal por clase de bosque proyectada a 2030.

Figura 10. **Proyección del área forestal de Guatemala por clase de bosque al año 2030**



Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Proyección del área forestal total de Guatemala y la distribución por clase de bosques a 2030**

|  |                  |
|--|------------------|
| <b>Área forestal total (ha)</b>        | <b>2,671,113</b> |
| Porcentaje de bosques latifoliados (%) | 58.6             |
| Porcentaje de bosques de coníferas (%) | 25.4             |
| Porcentaje de bosques mixtos (%)       | 16.0             |

Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Modelos de regresión para la reforestación en Guatemala

El área reforestada acumulada por el PINFOR entre 1998 y 2016 se modela con una función lineal

$$y = -550.53 + 7826.72(x - 1998)$$

(Ec. 71)

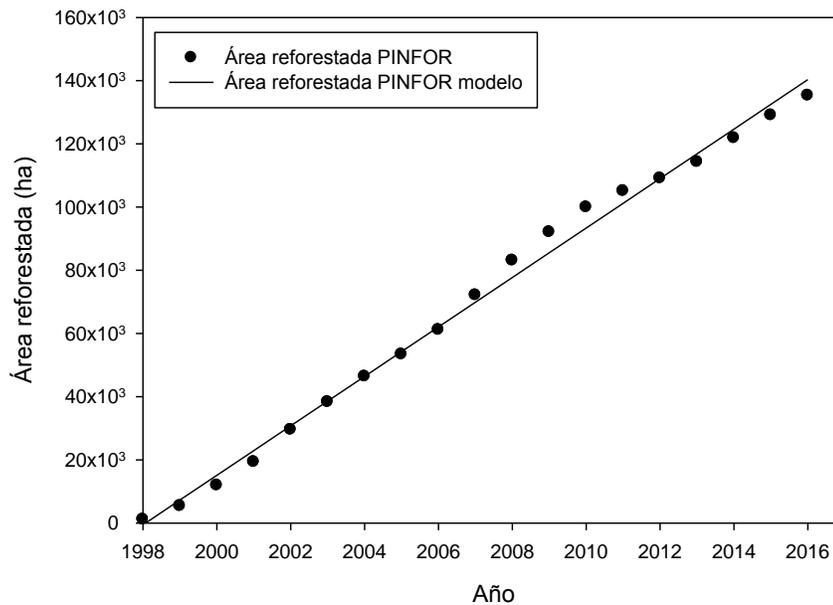
donde:

$y$  : El área de reforestación (ha)

$x$  : El año

El coeficiente de determinación del modelo (71) fue de 0.9937 y su representación gráfica se muestra en la figura 11.

Figura 11. **Área reforestada acumulada por el PINFOR entre 1998 y 2016. Modelo de regresión lineal**



Fuente: elaboración propia.

La figura 12 muestra el comportamiento del área reforestada acumulada por el PINFOR en Guatemala entre 1998 y 2016 con un modelo lineal generalizado utilizando el método AR(1). La reforestación se modela con:

$$y_t = 0.89y_{t-1} + 5244.03(1 - 0.89) + 7320.25[(x_t - 1998) - 0.89(x_t - 1997)] \quad (\text{Ec. 72})$$

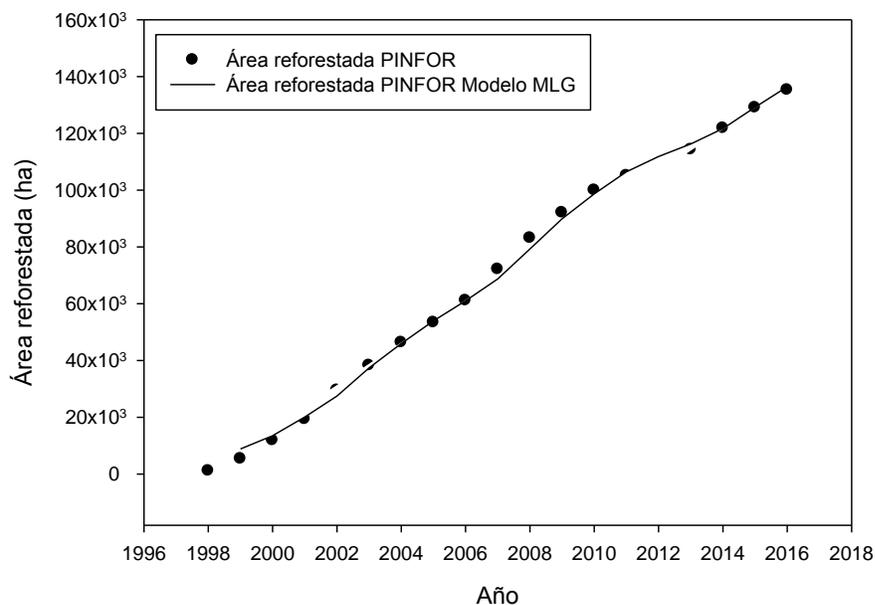
donde:

$y$  : El área de bosques mixtos (ha)

$x_t$  : El año

El coeficiente de determinación del modelo (72) es de 0.9978.

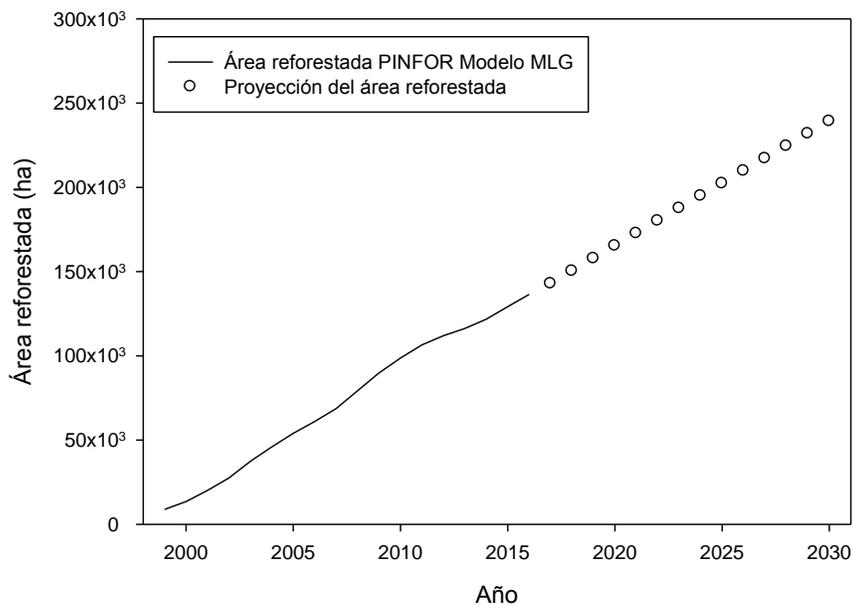
**Figura 12. Área reforestada acumulada por el PINFOR entre 1998 y 2016. Modelo de regresión lineal calculado con el método de mínimos cuadrados generalizados**



Fuente: elaboración propia.

La proyección del área reforestada a 2030 se calculó con el modelo obtenido, a través del método de mínimos cuadrados generalizados y su gráfica se presenta en la figura 13. De mantenerse la tasa de reforestación obtenida con el PINFOR, para 2030, se habrán reforestado 239,154 hectáreas, según se muestra en las proyecciones de la tabla VII.

**Figura 13. Proyección del área reforestada acumulada entre 2017 y 2030 con el modelo de mínimos cuadrados generalizados**



Fuente: elaboración propia.

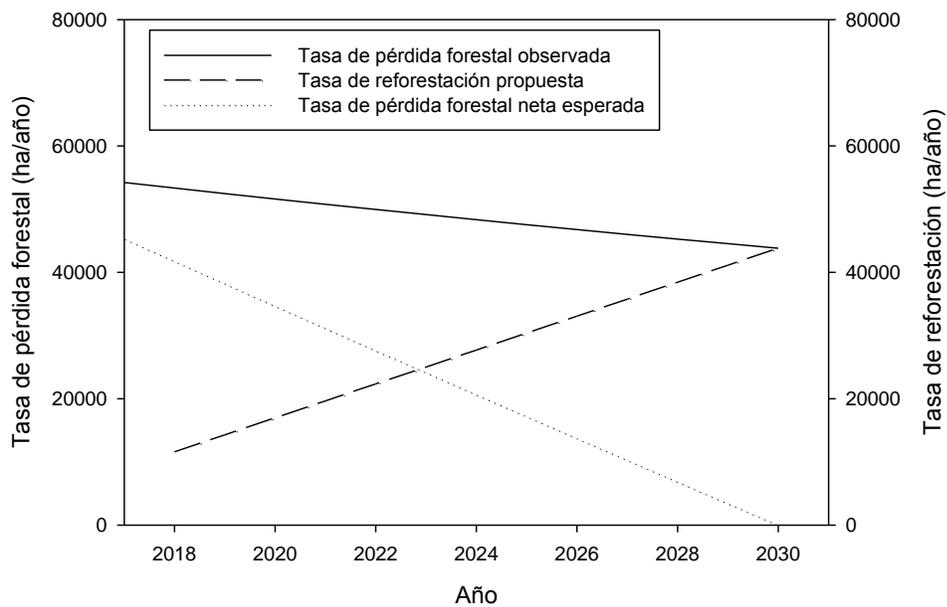
**Tabla VII. Proyección del área reforestada acumulada en Guatemala entre 2017 y 2030 con el modelo de mínimos cuadrados generalizados**

| <b>Año</b> | <b>Área reforestada (ha)</b> |
|------------|------------------------------|
| 2017       | 142,780                      |
| 2021       | 172,640                      |
| 2025       | 202,284                      |
| 2030       | 239,154                      |

Fuente: elaboración propia.

La figura 14 muestra cómo debe aumentar la tasa de reforestación para detener la pérdida de la cobertura boscosa en 2030. La línea continua es la tasa de la pérdida forestal, la cual se obtuvo al calcular la primera derivada de la función (67) con respecto al tiempo. La recta ascendente muestra la tasa de reforestación necesaria, para que en el año 2030, la tasa de reforestación sea igual a la tasa de pérdida forestal, de tal forma que la tasa de pérdida forestal neta sea cero en 2030.

Figura 14. **Tasa de reforestación propuesta para detener la pérdida de cobertura forestal en 2030**



Fuente: elaboración propia.

### 3.3. Modelos de fijación de CO<sub>2</sub> por bosques

La figura 15 muestra el comportamiento de la fijación de CO<sub>2</sub> por bosques en Guatemala con un modelo del tipo exponencial. Se muestra una tendencia descendente, la cual es modelada con la siguiente ecuación

$$y = 1984966045 \exp[-0.02(x - 1991)]$$

(Ec. 73)

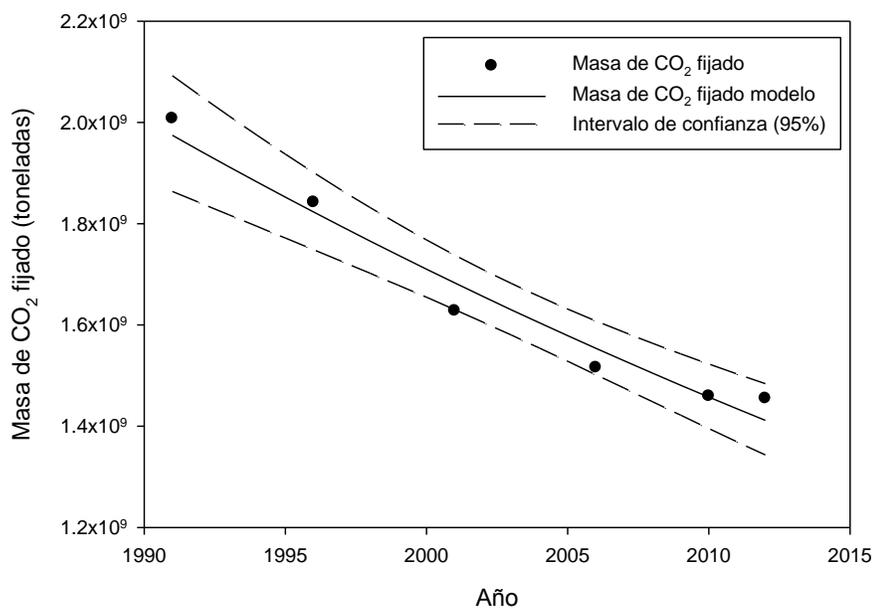
donde:

$y$  : El área forestal (ha)

$x$ : El año

El coeficiente de determinación del modelo (73) fue de 0.9704.

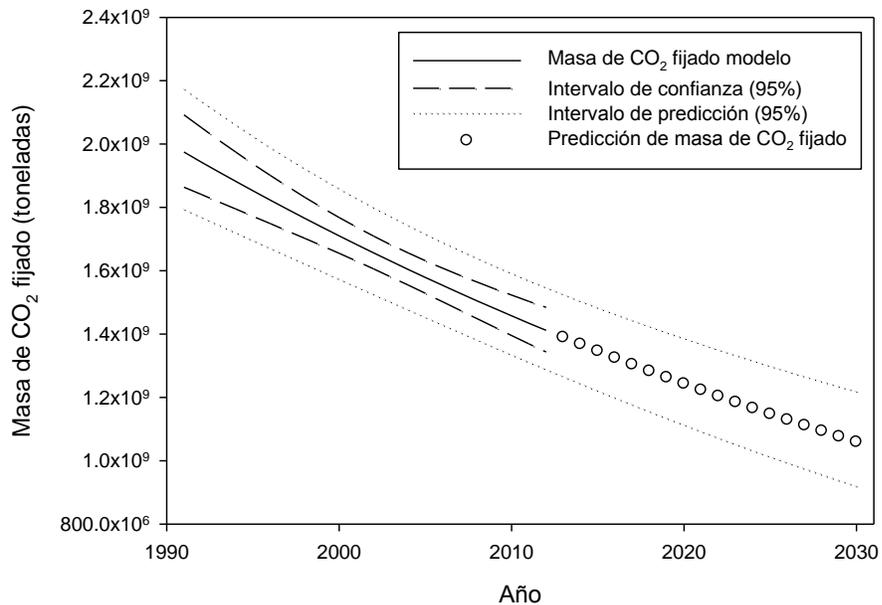
Figura 15. **Masa de CO<sub>2</sub> fijado por bosques. Modelo exponencial.**  
**Período 1991-2012**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 16 se muestra la proyección de la masa de CO<sub>2</sub> fijada por bosques al año 2030. Los valores fueron estimados a partir del modelo (68) y considerando que en Guatemala, una hectárea de bosque puede fijar 392 toneladas de CO<sub>2</sub> (Castellanos, 2011). La tabla VIII muestra algunos valores estimados para el período 2013-2030.

Figura 16. **Proyección de la masa de CO<sub>2</sub> fijado por bosques al año 2030**



Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Proyección la masa de CO<sub>2</sub> fijado por bosques. Período 2013-2030**

| <b>Año</b> | <b>Masa de CO<sub>2</sub> fijado (toneladas)</b> |
|------------|--|
| 2013       | 1,389,287,204                                    |
| 2017       | 1,303,241,189                                    |
| 2021       | 1,222,524,466                                    |
| 2025       | 1,146,806,962                                    |
| 2030       | 1,058,720,380                                    |

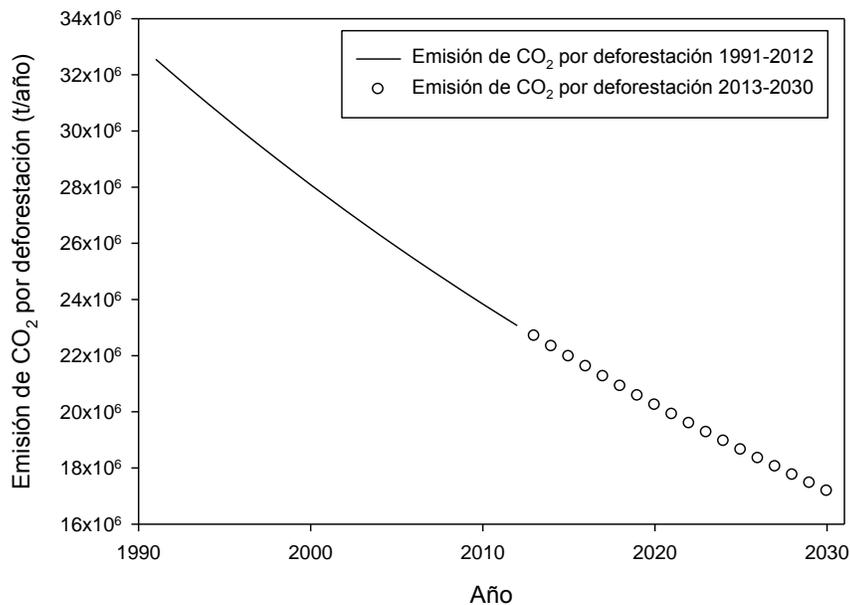
Fuente: elaboración propia.

La variación anual de la masa de CO<sub>2</sub> fijado por bosques, considerando una fijación de 392 t CO<sub>2</sub>/ha es

$$y = -32553444 \exp[-0.02(x - 1991)] \quad (\text{Ec. 74})$$

El valor absoluto de la razón de cambio de la masa de CO<sub>2</sub> fijada por bosques equivale a la emisión de CO<sub>2</sub> por deforestación y se representa en la figura 17.

Figura 17. **Tasa anual de emisión de CO<sub>2</sub> por deforestación en Guatemala. Período 1991-2030**



Fuente: elaboración propia.

### 3.4. Estimación de los ingresos por la venta de certificados de carbono

En la tabla IX se proyecta el modelo planteado en la figura 14, a partir del cual se tiene una tasa de pérdida de cobertura boscosa base. La tasa de reforestación necesaria iguala en el año 2030 la tasa anual de la pérdida de cobertura boscosa, de tal forma que en ese año, la pérdida neta de la cobertura boscosa sea cero.

Tabla IX. **Proyección de la tasa anual de pérdida de cobertura boscosa y tasa de reforestación necesaria para detener la pérdida de cobertura boscosa al 2030 bajo operación de REDD+**

| Año  | Tasa de pérdida de cobertura boscosa base (ha/año) | Tasa de reforestación (ha/año) | Pérdida neta de cobertura boscosa REDD+ (ha/año) |
|------|--|--------------------------------|--|
| 2018 | 53,334   | 11,596                         | 41,738   |
| 2019 | 52,467   | 14,280                         | 38,186   |
| 2020 | 51,613   | 16,965                         | 34,649   |
| 2021 | 50,774   | 19,649                         | 31,125   |
| 2022 | 49,948   | 22,333                         | 27,615   |
| 2023 | 49,135   | 25,017                         | 24,118   |
| 2024 | 48,336   | 27,701                         | 20,635   |
| 2025 | 47,550   | 30,385                         | 17,164   |
| 2026 | 46,776   | 33,070                         | 13,707   |
| 2027 | 46,015   | 35,754                         | 10,262   |
| 2028 | 45,267   | 38,438                         | 6,829  |
| 2029 | 44,531   | 41,122                         | 3,409  |
| 2030 | 43,806   | 43,806                         | 0  |

Fuente: elaboración propia.

La tabla X muestra proyección de la tasa base de emisión de CO<sub>2</sub>, la cual se calculó considerando que por cada hectárea de pérdida de cobertura boscosa, se emiten 392 toneladas de CO<sub>2</sub>. Ese valor de referencia se multiplicó por la tasa de pérdida de cobertura boscosa en la tabla IX para estimar las emisiones de CO<sub>2</sub>.

**Tabla X. Proyección de la tasa base de emisión de CO<sub>2</sub> por deforestación comparada con la tasa de emisión de CO<sub>2</sub> por deforestación al operar bajo REDD+ de 2018 a 2030**

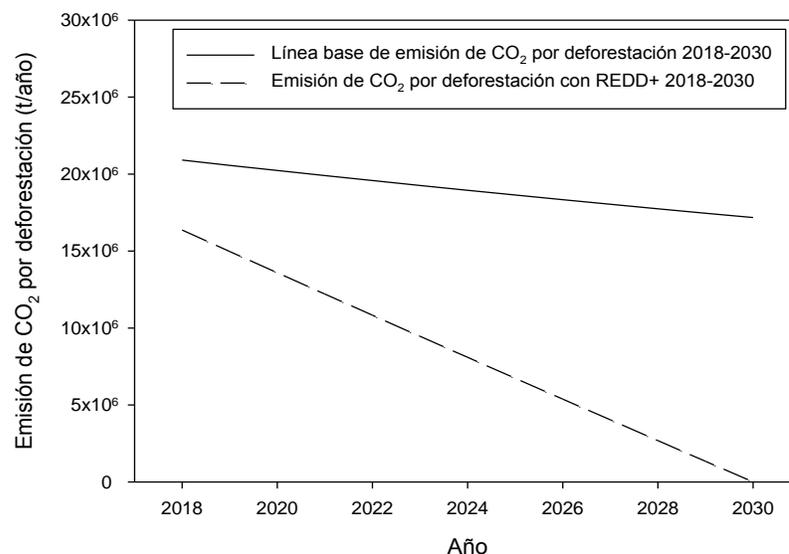
| <b>Año</b>   | <b>Emisión de CO<sub>2</sub> base (t CO<sub>2</sub>/año)*</b> | <b>Emisión de CO<sub>2</sub> con implementación de REDD+ (t CO<sub>2</sub>/año)*</b> | <b>Emisión evitada de CO<sub>2</sub> (t CO<sub>2</sub>/año)*</b> |
|--------------|---|--|--|
| 2018         | 20,906,981  | 16,361,287   | 4,545,694  |
| 2019         | 20,566,903  | 14,969,013   | 5,597,890  |
| 2020         | 20,232,357  | 13,582,270   | 6,650,087  |
| 2021         | 19,903,252  | 12,200,969   | 7,702,283  |
| 2022         | 19,579,501  | 10,825,021   | 8,754,479  |
| 2023         | 19,261,016  | 9,454,340  | 9,806,676  |
| 2024         | 18,947,711  | 8,088,839  | 10,858,872   |
| 2025         | 18,639,503  | 6,728,435  | 11,911,068   |
| 2026         | 18,336,308  | 5,373,043  | 12,963,265   |
| 2027         | 18,038,045  | 4,022,584  | 14,015,461   |
| 2028         | 17,744,634  | 2,676,976  | 15,067,657   |
| 2029         | 17,455,995  | 1,336,141  | 16,119,854   |
| 2030         | 17,172,051  | 0  | 17,172,051   |
| <b>Total</b> | <b>246,784,258</b>  | <b>105,618,919</b>   | <b>141,165,338</b>   |

Fuente: elaboración propia.

\* 392 t CO<sub>2</sub>/ha (Castellanos, 2011)

Los valores de las emisiones de CO<sub>2</sub> por deforestación mostrados en la tabla X fueron graficados para obtener la figura 18. Se observa que a medida que disminuye la tasa de pérdida de cobertura boscosa, se emitirá menos masa de CO<sub>2</sub>, hasta que es cero en 2030. Si el proyecto inicia en 2018 y continúa hasta 2030, el total de emisiones evitadas serían 141,165,338 toneladas de CO<sub>2</sub>. Considerando que se venda a \$5 por tonelada de CO<sub>2</sub> evitada, en el período 2018-2030 se obtendrían \$705,826,692 (Q5,308 millones).

Figura 18. **Proyección de la emisión base de CO<sub>2</sub> por deforestación y la emisión de CO<sub>2</sub> por deforestación al operar bajo REDD+**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Proyección de la tasa base de emisión de CO<sub>2</sub> por deforestación comparada con la tasa de emisión de CO<sub>2</sub> por deforestación al operar bajo REDD+ de 2018 a 2030**

|   |                    |
|---|--------------------|
| Emisión evitada de CO <sub>2</sub> (t CO <sub>2</sub> ) | 141,165,338        |
| Precio (\$/t CO <sub>2</sub> )                          | 5                  |
| <b>Ingreso (\$)</b>                                     | <b>705,826,692</b> |

Fuente: elaboración propia.



## 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1. Modelos de regresión de la cobertura boscosa en Guatemala

Se presentan modelos de regresión lineal para la cobertura boscosa y por clase de bosque en el período 1991-2012. El modelo de la cobertura boscosa en el tiempo fue construido con los informes de la dinámica forestal de Guatemala para los períodos 1991-2001 (Castellanos *et al.*, 2006), 2001-2006 (Castellanos *et al.*, 2011), 2006-2010 (Regalado *et al.*, 2012) y 2012 (INAB-CONAP, 2015). El modelo exponencial (67) fue calculado con el método de los mínimos cuadrados, el cual presenta un coeficiente de determinación de 0.9704.

La significancia del modelo fue verificada con un análisis de varianza, según se muestra en el apéndice 1. Las hipótesis planteadas fueron:

H<sub>0</sub>: El modelo exponencial no es significativo al 95 % de confianza.

H<sub>1</sub>: El modelo exponencial es significativo al 95 % de confianza.

Los resultados del análisis de varianza de la regresión indican que el valor p es de 0.0003. Dado que dicho valor p es menor que el nivel de significancia planteado para el estudio ( $\alpha = 0.05$ ), se rechaza la hipótesis nula y se concluye que el modelo exponencial es significativo para describir la cobertura boscosa de Guatemala al 95 % de confianza.

La significancia de los regresores del modelo también fue evaluada a un nivel de confianza del 95 % con las siguientes hipótesis:

$$H_0: \beta_i = 0$$

$$H_1: \beta_i \neq 0$$

Los resultados de la significancia de los regresores se muestran en el apéndice 2. Para ambos el valor p es menor que 0.05. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que los regresores son significativos para el modelo exponencial al 95 % de confianza. La tendencia decreciente del modelo se establece a partir del valor de  $\beta_1$ , el cual es menor que 0.

La validación de los supuestos clásicos del modelo de regresión se realizó con el análisis de los residuos. Los supuestos verificados para los residuos fueron la distribución normal, la homocedasticidad y la ausencia de autocorrelación serial (Stundenmund, 2006).

La normalidad de los residuos se evaluó con la prueba de Shapiro-Wilk, la cual está diseñada para muestras pequeñas ( $n \leq 20$ ) (Shapiro y Wilk, 1965). Las hipótesis a probar al 95 % de confianza fueron:

$H_0$ : Los residuos del modelo exponencial siguen la distribución normal.

$H_1$ : Los residuos del modelo exponencial no siguen la distribución normal.

Los resultados de la prueba se presentan en el apéndice 3. El valor p de la prueba fue de 0.68, mayor que el nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ). Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula y se concluye que los residuos del modelo exponencial siguen la distribución normal al 95 % de confianza.

El supuesto de homocedasticidad (varianza constante) se probó con la prueba de Brown-Forsythe (Kutner, 2005). Las hipótesis que se probaron al 95 % de confianza fueron:

$H_0$ : Los residuos del modelo exponencial tienen varianza constante.

$H_1$ : Los residuos del modelo exponencial no tienen varianza constante.

Los resultados de la prueba se presentan en el apéndice 4. El valor p de la prueba fue de 0.7699, mayor que el nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ). Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula y se concluye que los residuos del modelo exponencial tienen varianza constante al 95 % de confianza.

El supuesto de ausencia de autocorrelación serial se probó con la prueba de rachas (Gujarati, 2004). Las hipótesis que se probaron al 95 % de confianza fueron:

$H_0$ : Los residuos del modelo exponencial no están autocorrelacionados.

$H_1$ : Los residuos del modelo exponencial están autocorrelacionados.

Los resultados de la prueba de rachas se presentan en el apéndice 5. El valor p de la prueba es 0.4, mayor que el nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ). Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula y se concluye que los residuos del modelo exponencial no están autocorrelacionados.

Luego de probar que el modelo exponencial para la cobertura boscosa de Guatemala cumple con los supuestos del modelo de regresión clásico, se calcularon los intervalos de confianza al 95 %, los cuales se presentan en la figura 2. Las mediciones del área forestal realizadas en el período 1991-2012 están contenidas en la región del intervalo de confianza calculado.

La figura 3 muestra el comportamiento de los bosques latifoliados en el período 1991-2012, modelado con una función exponencial, según la ecuación

(68). El coeficiente de determinación del modelo (68) es 0.9755. A partir de los resultados presentados en el apéndice 6, se concluye que el modelo es significativo para describir el área de los bosques latifoliados en el país (valor p de 0.0002). Además, los resultados del apéndice 7 muestran que los dos regresores del modelo son significativos. Dado que el valor de  $\beta_1$  es menor que 0, se muestra que el área de bosques latifoliados está disminuyendo. Los resultados de las pruebas realizadas para validar los supuestos del modelo de regresión clásico indican que el modelo cumple con los supuestos de normalidad, homocedasticidad y ausencia de autocorrelación de los residuos (apéndices 8-10). El cumplimiento de los supuestos permitió calcular los intervalos de confianza del modelo.

La figura 4 muestra el comportamiento de los bosques de coníferas en el período 1991-2012, modelado con una función cuadrática, según la ecuación (69). El coeficiente de determinación del modelo (69) es 0.9978. A partir de los resultados presentados en el apéndice 11, se concluye que el modelo es significativo para describir el área de los bosques de coníferas en el país (valor p menor que 0.0001). Además, los resultados del apéndice 12 muestran que los tres regresores del modelo son significativos. En la figura se observa que el área de los bosques de coníferas está aumentando. Los resultados de las pruebas realizadas para validar los supuestos del modelo de regresión clásico indican que el modelo cumple con los supuestos de normalidad, homocedasticidad y ausencia de autocorrelación de los residuos (apéndices 13-15). El cumplimiento de los supuestos permitió calcular los intervalos de confianza del modelo.

La figura 5 muestra el comportamiento de los bosques mixtos en el período 1991-2012, modelado con una función cúbica, según la ecuación (70). El coeficiente de determinación del modelo (70) es 0.9992. A partir de los

resultados presentados en el apéndice 16, se concluye que el modelo es significativo para describir el área de los bosques mixtos en el país (valor p menor que 0.0012). Además, los resultados del apéndice 17 muestran que los cuatro regresores del modelo son significativos al 95 % de confianza. En la figura se observa que el área de los bosques mixtos está disminuyendo. Los resultados de las pruebas realizadas para validar los supuestos del modelo de regresión clásico indican que el modelo para los bosques mixtos cumple con los supuestos de normalidad, homocedasticidad y ausencia de autocorrelación de los residuos (apéndices 18-20). El cumplimiento de los supuestos permitió calcular los intervalos de confianza del modelo.

El comportamiento modelado para las clases de bosques concuerda con lo reportado en publicaciones (IARNA, 2012). Se observa una mayor tendencia de pérdida de bosques latifoliados, seguido por bosques mixtos. A diferencia de los bosques anteriores, los bosques de coníferas tienden a aumentar. Esta observación concuerda con lo reportado por Redo *et al.* en 2012. La pérdida de bosques latifoliados se puede explicar por la disminución de bosques en Petén (mayoritariamente latifoliados). Por el contrario, el aumento de coníferas, se presenta principalmente por la reforestación a través del PINFOR, en las verapaces.

La predicción del área forestal de 2013 a 2030 se realizó a través de los modelos de regresión planteados en las ecuaciones (2) a (5). El cumplimiento de los supuestos del modelo de regresión clásico permitió realizar dicha estimación y calcular los intervalos de predicción que se muestran en las figuras 6 a 9. La figura 11 presenta las proyecciones del área forestal total y por clase de bosque hasta 2030.

Los valores pronosticados al año 2030 se presentan en las tablas II-VI. De mantenerse el comportamiento observado en el período 1991-2012, el área forestal total de Guatemala para 2030 se estima en  $2.67 \times 10^6$  hectáreas. El área de los bosques latifoliados disminuirá a  $1.63 \times 10^6$  hectáreas, el área de los bosques de coníferas aumentará a  $7.06 \times 10^5$  hectáreas y el área de los bosques mixtos será de  $4.48 \times 10^5$  hectáreas. De no aumentar los esfuerzos para detener la pérdida de cobertura boscosa, el área forestal de Guatemala en 2030 será de sólo el 52.75 % del área forestal que el país tuvo en 1991.

#### **4.2. Modelos de regresión para la reforestación en Guatemala**

La figura 12 muestra el área reforestada acumulada por el PINFOR entre 1998 y 2016 y el modelo de regresión lineal. El coeficiente de determinación del modelo (71) fue de 0.9937. Los resultados del apéndice 21 muestran que el coeficiente del término lineal es significativo, pero el coeficiente del término constante no lo es (el valor p es 0.7329, mayor que el nivel de significancia de 0.05). A pesar de que el término constante no es significativo para el modelo, se mantuvo en el cálculo para garantizar el supuesto clásico que establece que la media de los residuos debe ser 0 (Stundenmund, 2006).

Los resultados de las pruebas realizadas para validar los supuestos del modelo de regresión clásico indican que el modelo sólo cumple el supuesto de normalidad (apéndice 22), pero los residuos no satisfacen los supuestos de homocedasticidad (apéndice 23) ni la ausencia de autocorrelación (apéndice 24). Dado que el modelo no cumple con los supuestos del modelo de regresión clásico, éste no es confiable para realizar predicciones del área reforestada en el tiempo. La solución a este problema estadístico se obtuvo a través del método de mínimos cuadrados generalizados.

El planteamiento del modelo se realizó al asumir que los errores están autocorrelacionados con un esquema AR(1). El cálculo del coeficiente de autocorrelación serial se realizó con el *software* EViews 9. Los coeficientes del modelo se presentan en el apéndice 25. A un nivel de significancia del 5 %, el término constante ( $\beta_0$ ) no es significativo para el modelo (valor p de 0.8231, mayor que 0.05), mientras que el término del coeficiente lineal ( $\beta_1$ ) sí es significativo para el modelo (valor p menor que 0.0001). Se observa claramente un alto coeficiente de autocorrelación entre los residuos ( $\rho = 0.8895$ ), confirmando el esquema AR(1). De acuerdo a los resultados mostrados en el apéndice 26, los residuos del modelo de regresión lineal generalizado siguen una distribución normal. El valor p de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el modelo de regresión lineal generalizado (0.8193) es mayor que el valor p reportado en el apéndice 22 (0.0877). Esto sugiere que el modelo de regresión lineal generalizado mejora la distribución normal de los residuos. Se recomienda una línea de investigación de las causas de esta situación observada.

Como era de esperarse, los resultados mostrados en el apéndice 27 indican que los residuos tienen varianza constante (valor p de 0.7717). Asimismo, en el apéndice 28 se indica que los residuos ya no presentan autocorrelación serial (valor p de 0.109). Además, se mejoró el coeficiente de determinación (0.9978). Estos resultados indican que el esquema AR(1) para el modelo lineal generalizado es efectivo para modelar la reforestación acumulada lograda por el PINFOR entre 1998 y 2016.

El modelo planteado en la ecuación (72) indica que la tasa de reforestación por el PINFOR fue de 7,320 hectáreas/año entre 1998 y 2016. El costo promedio de las áreas reforestadas fue de Q14,362/hectárea entre 1998 y 2016. En la figura 13 se muestra una proyección del área reforestada

acumulada hasta 2030, de mantenerse la tasa de reforestación del PINFOR. Se estima que a ese año se habrán reforestado un total de 239,154 hectáreas.

La función del modelo (67) fue derivada con respecto al tiempo para calcular la variación de la cobertura boscosa con respecto al tiempo. Al año 2030, la tasa de pérdida de cobertura forestal será de 43,806 hectáreas/año. Al compararlo con la tasa de reforestación actual, continuará la pérdida de cobertura boscosa en ese año. Si se busca compensar la pérdida de cobertura boscosa, se debe reforestar a una tasa mínima de 43,806 hectáreas/año para 2030. En la figura 15 se presenta un modelo de reforestación en donde a medida que se aumenta la tasa anual de reforestación, disminuye la pérdida de cobertura forestal, hasta que esta tasa de pérdida de cobertura boscosa es cero en 2030. Evidentemente, este modelo requiere el planteamiento de una política nacional que busque la conservación de los bosques y garantice el ritmo de reforestación.

#### **4.3. Modelos de fijación de CO<sub>2</sub> por bosques**

El cálculo de la fijación de CO<sub>2</sub> por bosques, se estableció a partir de la estimación de captura de carbono realizada por Castellanos en 2011. En el informe se estimó que Guatemala ha fijado un promedio de 107 toneladas de carbono por hectárea de bosque. Esto equivale a 392 toneladas de CO<sub>2</sub> absorbidas por hectárea de bosque al multiplicarlo por el factor estequiométrico (44.0098/12.011), según la relación de las masas molares del dióxido de carbono y el carbono.

El área forestal total del país en los años para los que se construyó el modelo (68) se multiplicó por el factor de toneladas de CO<sub>2</sub> absorbidas por hectárea de bosque, para obtener el modelo (73) cuya representación gráfica se

muestra en la figura 15. La función del modelo de fijación de CO<sub>2</sub> por bosques es exponencial con un coeficiente de determinación de 0.9704. El modelo es significativo (valor p menor que 0.0003) según el apéndice 29. Asimismo, ambos regresores son significativos para el modelo (valores p menores que 0.05), de acuerdo al apéndice 30. Los apéndices 31-33 muestran evidencia que el modelo de regresión del tipo exponencial cumple los supuestos del modelo clásico de regresión lineal: distribución normal, varianza constante y ausencia de autocorrelación de los residuos. Por lo tanto, el intervalo de confianza del modelo puede ser calculado y también puede ser usado para predecir la fijación de CO<sub>2</sub>, a través de bosques al año 2030 con su intervalo de predicción correspondiente.

La figura 16 muestra la predicción de la fijación de CO<sub>2</sub> por bosques al año 2030. Para ese año, se estima  $1.05 \times 10^9$  toneladas de CO<sub>2</sub> fijadas por bosques. El modelo (73) fue derivado con respecto al tiempo para calcular la variación anual del CO<sub>2</sub> fijado por bosques y se presenta en la ecuación (74) El valor absoluto de dicha variación es equivalente a la masa de CO<sub>2</sub> que se emite por causa de la deforestación. La gráfica de dichas emisiones se presenta en la figura 17, en la cual se presenta que de mantenerse la tasa de pérdida de cobertura boscosa observada en el período 1991-2012, para el año 2030 se emitirán  $1.72 \times 10^7$  toneladas de CO<sub>2</sub> únicamente por causa de pérdida de bosque. Estos resultados muestran que Guatemala está perdiendo el potencial de ingresos por la venta de certificados de carbono.

#### **4.4. Estimación de los ingresos por la venta de certificados de carbono**

En la tabla IX se presentan los valores estimados de la pérdida de cobertura boscosa para el período 2018-2030. Estos son los valores con los

que se obtuvo la figura 15 con el modelo planteado de reforestación para lograr que en el año 2030 la pérdida de cobertura boscosa sea cero. Al multiplicar los valores por el factor de 392 toneladas de CO<sub>2</sub> fijadas por hectárea de bosque, se construyó la tabla VII.

En la tabla VIII, se presenta la línea base para un proyecto REDD+ (reducción de emisiones de gases de efecto invernadero) con las emisiones anuales de CO<sub>2</sub> causadas por la deforestación. En un proyecto REDD+, se promueve la conservación de los bosques que tienen riesgo de ser deforestado. Se comparan dos escenarios: en el escenario base, se estiman las emisiones de CO<sub>2</sub> si no se buscan mecanismos para detener la pérdida de cobertura boscosa. En el escenario de operación de un proyecto REDD+, se tiene un objetivo para disminuir esa deforestación. La diferencia entre el área boscosa al conservar el bosque y la línea base (sin intervención) representará una cantidad de CO<sub>2</sub> que no fue emitido, constituyendo el potencial de venta de certificados de carbono del proyecto.

Para el período 2018-2030, se estiman en  $2.47 \times 10^8$  toneladas de emisión de CO<sub>2</sub>. Asimismo, se incluyen las emisiones anuales de CO<sub>2</sub> si se implementa el modelo de reforestación planteado. Bajo ese modelo, se estiman en  $1.06 \times 10^8$  toneladas de emisión de CO<sub>2</sub>, es decir se evitaría emitir  $1.41 \times 10^8$  toneladas de CO<sub>2</sub>. La importancia de evitar emitir esa masa de CO<sub>2</sub> radica en el potencial de la venta por certificados de carbono y a la vez, contribuye a la menor emisión de ese gas que está asociado con el cambio climático.

La figura 18 muestra la línea base de emisiones de CO<sub>2</sub> por deforestación y las emisiones con el plan de reforestación. Se observa que al año 2030, las emisiones de CO<sub>2</sub> serían de 0, ya que se detendría la pérdida de cobertura

boscosa en ese año, a partir del cual la tasa de emisión de CO<sub>2</sub> sería negativa porque se revertiría la tendencia a la pérdida de cobertura boscosa en el país.

El aprovechamiento de la operación bajo ese modelo en un proyecto REDD+ permitiría la venta de  $1.41 \times 10^8$  toneladas de CO<sub>2</sub> entre 2018 y 2030. Según los precios históricos de los certificados de CO<sub>2</sub>, en promedio se han vendido a \$5/tonelada de CO<sub>2</sub>. Esto equivale a \$705.8 millones que podrían utilizarse en planes de reforestación y conservación de bosques (tabla VIII).

Evidentemente, los ingresos por la venta de certificados de CO<sub>2</sub> dependen del precio al que se logre negociar el acuerdo de venta, el cual estará sujeto a las condiciones del mercado de certificados de CO<sub>2</sub>. Además del beneficio económico, se permitiría la conservación de la biodiversidad en el país, se garantizaría la recarga hídrica del país y se permitiría un atractivo por la mejora en la belleza escénica en las comunidades ubicadas en sus alrededores, que también obtendrían pagos por servicios ambientales.

A pesar de los esfuerzos que se han realizado con los programas de reforestación, la deforestación sobrepasa esta tasa y por lo tanto, existe pérdida de cobertura boscosa. El reto consiste en generar mecanismos que fomenten la conservación de los bosques, los cuales deben estar contemplados en la política nacional de conservación forestal y operar eficientemente. Es necesario incrementar controles de la tala ilegal de bosques y promover en las comunidades el cuidado de estos. La difusión de la posibilidad de la venta de certificados de carbono en las comunidades debe realizarse y garantizar que estas comunidades obtengan los beneficios del REDD+. Es importante tener en cuenta que al reforestar un área, el bosque que crezca no tendrá las mismas características del bosque que fue deforestado, ya que con la deforestación se perdió la biodiversidad del bosque.

Además, la eficiencia de estos mecanismos debe comprobarse a partir del monitoreo constante del área forestal del país. Es necesario incrementar la frecuencia de los informes de cobertura boscosa para generar más información, de tal forma que permitan ajustar los modelos que se presentan en esta investigación a partir de dichas publicaciones. La actualización de estos modelos debe realizarse en cada publicación para mejorar el ajuste y contribuya a la predicción del área forestal en el tiempo, para tomar decisiones expeditas. Por lo tanto, la conservación forestal debe ser un problema abordado desde diversas disciplinas y debe tratarse urgentemente si Guatemala quiere cumplir con el objetivo de detener la deforestación al año 2030 incluido en los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas.

## CONCLUSIONES

1. El área forestal de Guatemala está disminuyendo exponencialmente con una pérdida que no es compensada con la tasa de reforestación actual que se estima en un total de 239,154 hectáreas al año 2030. Conservar los bosques a través del mecanismo REDD+ permitiría la obtención de Q5,308 millones entre 2018 y 2030 que podrían invertirse en programas de conservación forestal.
2. La cobertura forestal de Guatemala en el período 1991-2012 presenta una tendencia que se describe con un modelo exponencial decreciente,  $y = 5063688.89 \exp[-0.0164(x-1991)]$ , el cual proyecta que para el año 2030 el área forestal de Guatemala será de  $2.67 \times 10^6$  hectáreas, de las cuales el 58.6 % serán bosques latifoliados, el 25.4 % serán bosques de coníferas y el 16 % serán bosques mixtos.
3. El área reforestada entre 1998 y 2016 se describe con un modelo lineal generalizado con esquema AR(1),  $y_t = 0.89y_{t-1} + 5244.03(1 - 0.89) + 7320.25[(x_t - 1998) - 0.89(x_{t-1} - 1998)]$ , el cual proyecta que de mantenerse la tasa de reforestación en ese período, al año 2030, se reforestarán 239,154 hectáreas a un costo de Q14,362/hectárea. Para detener la pérdida de la cobertura boscosa del país en el 2030, se debe reforestar a un mínimo de 43,806 hectáreas/año.

4. El modelo de regresión de la fijación de CO<sub>2</sub> por bosques es de tipo exponencial:  $y = 1984966045 \exp[-0.02(x - 1991)]$ . Se estima que de mantenerse la tasa de deforestación proyectada para 2030, el dióxido de carbono fijado por bosques habrá disminuido a  $1.06 \times 10^9$  toneladas y se emitirán  $1.72 \times 10^7$  toneladas de dicho gas.
  
5. Elevar la cobertura boscosa del país con base en las estimaciones del modelo de proyecto REDD+ permitirá la captura y venta de  $1.41 \times 10^8$  toneladas de CO<sub>2</sub> entre 2018 y 2030, a un precio de Q37.60/tonelada de CO<sub>2</sub> fijado, con un potencial de Q5,308 millones en ese período, destinados para inversión en proyectos de reforestación, mantenimiento y conservación de bosques.

## RECOMENDACIONES

1. El INAB y el INE deben actualizar frecuentemente las estadísticas de la dinámica forestal del país, de modo que los investigadores cuenten con información reciente para analizar el fenómeno de la deforestación desde un punto de vista multidisciplinario.
2. A medida que las estadísticas de la dinámica forestal del país son actualizadas, los modelos que se presentan en esta investigación deben actualizarse, para ajustar los modelos y mejorar las predicciones del área boscosa de Guatemala.
3. La aplicación de los modelos de regresión está dada a nivel generalizado de país. Para una mejor precisión y alcance, éstos pueden replicarse a nivel de departamento, de municipio o de aldea, constituyendo un reto para que el INAB aplique políticas efectivas de recuperación y protección de bosques y ejecute las asignaciones presupuestarias para los planes, programas y proyectos de reforestación de corto, mediano y largo plazo.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carreto, I., Doussinague, C., Villena, E. (2008). *Manual práctico de agroforestería*. España: Cultural.
- Castellanos, E., Monzón, C., Valencia, V., Delgado, L., Regalado, O., Corral, L., ..., Saravia, F. (2006). *Dinámica de la cobertura forestal de Guatemala durante los años 1991, 1996 y 2001 y mapa de cobertura forestal 2001*. Universidad del Valle de Guatemala, Instituto Nacional de Bosques, Consejo Nacional de Áreas Protegidas, Guatemala.
- Castellanos, E., Regalado, O., Pérez, G., Montenegro, R., Ramos, V., e Incer, D. (2011). *Mapa de cobertura forestal de Guatemala 2006 y dinámica de la cobertura forestal 2001-2006*. Universidad del Valle de Guatemala, Instituto Nacional de Bosques, Consejo Nacional de Áreas Protegidas y Universidad Rafael Landívar, Guatemala.
- Castellanos, E. (2011). *Elaboración del primer mapa nacional sobre el carbono capturado por plantaciones y bosques naturales de Guatemala. Proyecto FODECYT No. 08-2008*. Guatemala: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología, Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología, Universidad del Valle de Guatemala y Universidad Rafael Landívar.
- Congreso de la República de Guatemala. (2007). *Decreto 70-2007: Ley del Presupuesto General de ingresos y egresos del Estado para el ejercicio fiscal dos mil ocho*.

Congreso de la República de Guatemala. (2008). *Decreto 72-2008: Ley del Presupuesto General de ingresos y egresos del Estado para el ejercicio fiscal dos mil nueve.*

Congreso de la República de Guatemala. (2010). *Decreto 54-2010: Ley del Presupuesto General de ingresos y egresos del Estado para el ejercicio fiscal dos mil once.*

Congreso de la República de Guatemala. (2011). *Decreto 33-2011: Ley del Presupuesto General de ingresos y egresos del Estado para el ejercicio fiscal 2012.*

Congreso de la República de Guatemala. (2012). *Decreto 33-2012: Ley del Presupuesto General de ingresos y egresos del Estado para el ejercicio fiscal dos mil trece.*

Congreso de la República de Guatemala. (2014). *Decreto 22-2014: Ley del Presupuesto General de ingresos y egresos del Estado para el ejercicio fiscal dos mil quince.*

Congreso de la República de Guatemala. (2015). *Decreto 14-2015: Ley del Presupuesto General de ingresos y egresos del Estado para el ejercicio fiscal dos mil dieciséis.*

Daniel, W. (2006). *Bioestadística. Base para el análisis de las ciencias de la salud.* México: Limusa Wiley.

Farfán, M., Rodríguez-Tapia, G. y Mas, J. (2016). Análisis jerárquico de la intensidad de cambio de cobertura/uso de suelo y deforestación (2000-2008) en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, México. *Investigaciones Geográficas*, Boletín, (90), Instituto de Geografía, UNAM, México, p. 89-104.

Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO- (2002). *Estado de la información forestal en Guatemala*. Chile.

Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO- (2016). *2016 State of the World's Forests. Forests and agriculture: Land-use challenges and opportunities*. Roma, Italia.

Gómez-Echeverry, L. (2002). *Cambio climático y desarrollo*. San José, Costa Rica: Copieco de San Pedro, S.A.

Grijpma, P. (2008). *Producción forestal*. México: Trillas.

Gujarati, D. (2004). *Econometría*. Cuarta edición. México: McGraw-Hill Interamericana.

IARNA, URL (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar). (2012). *Análisis sistémico de la deforestación en Guatemala y propuesta de políticas para revertirla*. Guatemala. Serie técnica No. 38.

INAB-CONAP (2015). *Mapa forestal por tipo y subtipo de bosque, 2012. Informe técnico*. Guatemala.

Instituto Nacional de Bosques. (2015). *Informe de labores 2015*.

Instituto Nacional de Estadística. (2011). *Encuesta Nacional de Condiciones de Vida 2011*.

Instituto Nacional de Estadística. (2015). *Compendio estadístico ambiental 2014*.

Kutner, M., Nachtsheim, C, Neter, J., y Li, W. (2005). *Applied linear models*. Quinta edición. Estados Unidos de América: McGraw Hill/Irwin.

Johnson, R. y Wickern, D. (2007). *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Sexta edición. Estados Unidos: Pearson Prentice Hall.

Mendenhall, W., Scheaffer, R. y Wackerly, D. (1986). *Estadística matemática con aplicaciones*. México: Grupo editorial Iberoamérica, S.A. de C.V.

Montgomery, D y Runger, G. (2006). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*. México: Limusa Wiley.

Nabuurs, G. y Mohren, G. (1993). Carbon fixation through forestation activities: A study of the carbon sequestering potential of selected forest types, commissioned by the Foundation Face. *Institute for Forestry and Nature Research*, Holanda.

- Nabuurs, G. y Schelhaas, M. (2002). Carbon profiles of typical forest types across Europe assessed with CO2FIX. *Ecological indicators*, 1, p. 213-223.
- Naciones Unidas. (1998). *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*.
- Naciones Unidas. (2015a). *Convención Marco sobre el cambio climático. Aprobación del Acuerdo de París*.
- Naciones Unidas. (2015b). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015.
- Osorio, P., Mas, J., Guerra, F. y Maass, M. (2015). Análisis y modelación de los procesos de deforestación: un caso de estudio en la cuenca del río Coyuquilla, Guerrero, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín*, (88), Instituto de Geografía, UNAM, México, p. 60-74.
- Pearce, D. (2002). *Cómo pueden beneficiarse los países en desarrollo por las políticas de control del cambio climático*. En L. Gómez-Echeverri (Ed.), *Cambio climático y desarrollo* (pp. 231 - 244). San José, Costa Rica: Copieco de San Pedro, S.A.
- Redo, D., Grau, H., Aide, M. y Clark, M. Asymmetric forest transition driven by the interaction of socioeconomic development and environmental heterogeneity in Central America. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 109 (2012), 8839-8844. doi: 10.1073/pnas.1201664109

Regalado, O., Villagrán, X., Pérez, G., Castellanos, E., Martínez, G., e Incer, D. (2012). *Mapa de cobertura forestal de Guatemala 2010 y Dinámica de la cobertura forestal 2006-2010*. Instituto Nacional de Bosques, Consejo Nacional de Áreas Protegidas, Universidad del Valle de Guatemala y Universidad Rafael Landívar, Guatemala.

Richards, K. (2004). A Review of Forest Carbon Sequestration Cost Studies: A Dozen Years of Research. *Climatic Change*, 63 (1),p. 1-48.

Shapiro, S. S. y Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrica Trust*, 52 (1965), p. 591-611.

Siegel, S. y Castellan, N. (1970). *Estadística no paramétrica aplicada a las ciencias de la conducta*. México: Editorial Trillas, S.A. de C.V.

Stewart S. y Sands, P. (2002). Aspectos institucionales y legales del comercio de emisiones. En L. Gómez-Echeverri (Ed.), *Cambio climático y desarrollo* (pp. 247 - 268). San José, Costa Rica: Copieco de San Pedro, S.A

Studenmund, A. (2006). *Using econometrics*. Pearson International Edition.

Walpole, E., Myers, R., Myers, S. y Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. México: Pearson educación.

Shapiro, S. S. y Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrica Trust*, 52, p. 591-611´

USAID (1991). Plan de acción forestal para Guatemala.

## APÉNDICES

### Modelos de regresión de la cobertura boscosa en Guatemala

#### Apéndice 1. Análisis de varianza del modelo de la cobertura boscosa de Guatemala en función del tiempo. Período 1991-2012

| Fuente    | gl | Suma de cuadrados     | Cuadrado medio        | F <sub>prueba</sub> | Valor p |
|-----------|----|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------|
| Regresión | 1  | $1.63 \times 10^{12}$ | $1.63 \times 10^{12}$ | 130.9195            | 0.0003  |
| Residuo   | 4  | $4.98 \times 10^{10}$ | $1.24 \times 10^{10}$ |                     |         |
| Total     | 5  | $1.68 \times 10^{12}$ |                       |                     |         |

Fuente: elaboración propia.

#### Apéndice 2. Coeficientes de regresión del modelo de la cobertura boscosa de Guatemala. Período 1991-2012

$$\text{Modelo: } y = \beta_0 \exp[-\beta_1(x - 1991)]$$

(Ec. 75)

| Coeficiente | Estimación | Error estándar | t       | Valor p |
|-------------|------------|----------------|---------|---------|
| $\beta_0$   | 5063688.89 | 88993.0098     | 56.8998 | <0.0001 |
| $\beta_1$   | 0.0164     | 0.0014         | 11.5713 | 0.0003  |

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 3. Prueba de Shapiro-Wilk para la normalidad de los residuos del modelo de la cobertura boscosa de Guatemala. Período 1991-2012**

| Residuos   | n | W*   | Valor p | $\alpha$ | Conclusión          |
|------------|---|------|---------|----------|---------------------|
| Área total | 6 | 0.94 | 0.6800  | 0.05     | No rechazar $H_0$ . |

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 4. Prueba de Brown-Forsythe para la homogeneidad de varianza de los residuos del modelo de la cobertura boscosa de Guatemala. Período 1991-2012**

| Residuos   | n | $t_{BF}^*$ | Valor p | $\alpha$ | Conclusión          |
|------------|---|------------|---------|----------|---------------------|
| Área total | 6 | 0.3130     | 0.7699  | 0.05     | No rechazar $H_0$ . |

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 5. Prueba de rachas para la autocorrelación de los residuos del modelo de la cobertura boscosa de Guatemala. Período 1991-2012**

| Residuos   | $n_1$ | $n_2$ | v | Valor p | $\alpha$ | Conclusión          |
|------------|-------|-------|---|---------|----------|---------------------|
| Área total | 2     | 4     | 3 | 0.4     | 0.05     | No rechazar $H_0$ . |

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 6. Análisis de varianza del modelo del área de bosques de latifoliados en Guatemala en función del tiempo. Período 1991-2012**

| Fuente    | gl | Suma de cuadrados     | Cuadrado medio        | $F_{prueba}$ | Valor p |
|-----------|----|-----------------------|-----------------------|--------------|---------|
| Regresión | 1  | $2.63 \times 10^{12}$ | $2.63 \times 10^{12}$ | 159.4762     | 0.0002  |
| Residuo   | 4  | $6.60 \times 10^{10}$ | $1.65 \times 10^{10}$ |              |         |
| Total     | 5  | $2.70 \times 10^{12}$ |                       |              |         |

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 7. Coeficientes de regresión del modelo del área de bosques latifoliados en Guatemala. Período 1991-2012**

$$\text{Modelo: } y = \beta_0 \exp[-\beta_1(x-1991)]$$

(Ec. 75)

| Coeficiente | Estimación | Error estándar | t       | Valor p |
|-------------|------------|----------------|---------|---------|
| $\beta_0$   | 4496639.69 | 105263.74      | 42.7178 | <0.0001 |
| $\beta_1$   | 0.026      | 0.002          | 12.7173 | 0.0002  |

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 8. Prueba de Shapiro-Wilk para la normalidad de los residuos del modelo del área de bosques latifoliados en Guatemala. Período 1991-2012**

| Residuos          | n | W*   | Valor p | $\alpha$ | Conclusión          |
|-------------------|---|------|---------|----------|---------------------|
| Área latifoliados | 6 | 0.97 | 0.8949  | 0.05     | No rechazar $H_0$ . |

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 9. Prueba de Brown-Forsythe para la homogeneidad de varianza de los residuos del modelo del área de bosques latifoliados en Guatemala. Período 1991-2012**

| Residuos          | n | $t_{BF}^*$ | Valor p | $\alpha$ | Conclusión          |
|-------------------|---|------------|---------|----------|---------------------|
| Área latifoliados | 6 | 0.1696     | 0.8735  | 0.05     | No rechazar $H_0$ . |

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 10. Prueba de rachas para la autocorrelación de los residuos del modelo del área de bosques latifoliados en Guatemala. Período 1991-2012**

| Residuos          | $n_1$ | $n_2$ | $v$ | Valor p | $\alpha$ | Conclusión          |
|-------------------|-------|-------|-----|---------|----------|---------------------|
| Área latifoliados | 3     | 3     | 3   | 0.3     | 0.05     | No rechazar $H_0$ . |

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 11. Análisis de varianza del modelo del área de bosques de coníferas en Guatemala en función del tiempo. Período 1991-2012**

| Fuente    | gl | Suma de cuadrados  | Cuadrado medio     | $F_{prueba}$ | Valor p |
|-----------|----|--------------------|--------------------|--------------|---------|
| Regresión | 2  | $6.11 \times 10^9$ | $3.05 \times 10^9$ | 695.3312     | <0.0001 |
| Residuo   | 3  | $1.32 \times 10^7$ | $4.39 \times 10^6$ |              |         |
| Total     | 5  | $6.12 \times 10^9$ |                    |              |         |

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 12. Coeficientes de regresión del modelo del área de bosques de coníferas en Guatemala. Período 1991-2012**

$$\text{Modelo: } y = \beta_0 + \beta_1(x - 1991) + \beta_2(x - 1991)^2$$

(Ec. 76)

| Coeficiente | Estimación | Error estándar | t        | Valor p |
|-------------|------------|----------------|----------|---------|
| $\beta_0$   | 347475.032 | 1975.4449      | 177.5146 | <0.0001 |
| $\beta_1$   | 15887.7745 | 440.3395       | -36.0807 | <0.0001 |
| $\beta_2$   | 643.2705   | 19.859         | 32.3918  | <0.0001 |

Fuente: elaboración propia.

## Validación de los supuestos del modelo clásico del modelo de regresión lineal

### Apéndice 13. Prueba de Shapiro-Wilk para la normalidad de los residuos del modelo del área de bosques de coníferas en Guatemala. Período 1991-2012

| Residuos          | n | W*   | Valor p | $\alpha$ | Conclusión          |
|-------------------|---|------|---------|----------|---------------------|
| Área de coníferas | 6 | 0.98 | 0.9397  | 0.05     | No rechazar $H_0$ . |

Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 14. Prueba de Brown-Forsythe para la homogeneidad de varianza de los residuos del modelo del área de bosques de coníferas en Guatemala. Período 1991-2012

| Residuos       | n | $t_{BF}^*$ | Valor p | $\alpha$ | Conclusión          |
|----------------|---|------------|---------|----------|---------------------|
| Área coníferas | 6 | 2.3512     | 0.0784  | 0.05     | No rechazar $H_0$ . |

Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 15. Prueba de rachas para la autocorrelación de los residuos del modelo del área de bosques de coníferas en Guatemala. Período 1991-2012

| Residuos       | $n_1$ | $n_2$ | v | Valor p | $\alpha$ | Conclusión          |
|----------------|-------|-------|---|---------|----------|---------------------|
| Área coníferas | 3     | 3     | 6 | >0.9999 | 0.05     | No rechazar $H_0$ . |

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 16. Análisis de varianza del modelo del área de bosques mixtos en Guatemala en función del tiempo. Período 1991-2012**

| Fuente    | gl | Suma de cuadrados     | Cuadrado medio        | F <sub>prueba</sub> | Valor p |
|-----------|----|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------|
| Regresión | 3  | 1.27×10 <sup>11</sup> | 4.24×10 <sup>10</sup> | 810.5867            | 0.0012  |
| Residuo   | 2  | 1.04×10 <sup>8</sup>  | 5.22×10 <sup>7</sup>  |                     |         |
| Total     | 5  | 1.27×10 <sup>11</sup> |                       |                     |         |

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 17. Coeficientes de regresión del modelo del área de bosques mixtos en Guatemala. Período 1991-2012**

$$\text{Modelo: } y = \beta_0 + \beta_1(x - 1991) + \beta_2(x - 1991)^2 + \beta_3(x - 1991)^3$$

(Ec. 77)

| Coeficiente | Estimación | Error estándar | t        | Valor p |
|-------------|------------|----------------|----------|---------|
| $\beta_0$   | 194297.415 | 7153.9028      | 27.1596  | 0.0014  |
| $\beta_1$   | 81169.0328 | 3383.4672      | 23.9899  | 0.0017  |
| $\beta_2$   | -4519.9424 | 405.9723       | -11.1336 | 0.008   |
| $\beta_3$   | 66.81      | 12.7797        | 5.2278   | 0.0347  |

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 18. Prueba de Shapiro-Wilk para la normalidad de los residuos del modelo del área de bosques mixtos en Guatemala. Período 1991-2012**

| Residuos       | n | W*   | Valor p | $\alpha$ | Conclusión                   |
|----------------|---|------|---------|----------|------------------------------|
| Área de mixtos | 6 | 0.95 | 0.95    | 0.05     | No rechazar H <sub>0</sub> . |

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 19. Prueba de Brown-Forsythe para la homogeneidad de  
varianza de los residuos del modelo del área de bosques mixtos en  
Guatemala. Período 1991-2012**

| Residuos       | n | $t_{BF}^*$ | Valor p | $\alpha$ | Conclusión          |
|----------------|---|------------|---------|----------|---------------------|
| Área de mixtos | 6 | 1.0328     | 0.3601  | 0.05     | No rechazar $H_0$ . |

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 20. Prueba de rachas para la autocorrelación de los residuos del  
modelo del área de bosques mixtos en Guatemala. Período 1991-2012**

| Residuos    | $n_1$ | $n_2$ | v | Valor p | $\alpha$ | Conclusión          |
|-------------|-------|-------|---|---------|----------|---------------------|
| Área mixtos | 3     | 3     | 5 | 0.9     | 0.05     | No rechazar $H_0$ . |

Fuente: elaboración propia.

## Modelos de regresión para la reforestación en Guatemala

### Apéndice 21. Coeficientes de regresión del modelo de regresión lineal para la reforestación por el PINFOR. Período 1998-2016

$$\text{Modelo: } y = \beta_0 + \beta_1 x$$

(Ec. 77)

| Coeficiente | Estimación | Error estándar | t       | Valor p |
|-------------|------------|----------------|---------|---------|
| $\beta_0$   | -550.5304  | 1586.8921      | -0.3469 | 0.7329  |
| $\beta_1$   | 7826.7233  | 150.6211       | 51.963  | <0.0001 |

Fuente: elaboración propia.

### Validación de los supuestos del modelo clásico del modelo de regresión lineal para la reforestación por el PINFOR

### Apéndice 22. Prueba de Shapiro-Wilk para la normalidad de los residuos del modelo de regresión lineal de la reforestación por el PINFOR. Período 1998-2016

| Residuos              | n | W*   | Valor p | $\alpha$ | Conclusión          |
|-----------------------|---|------|---------|----------|---------------------|
| Área de reforestación | 6 | 0.89 | 0.0877  | 0.05     | No rechazar $H_0$ . |

Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 23. Prueba de Brown-Forsythe para la homogeneidad de varianza de los residuos del modelo de regresión lineal de la reforestación por el PINFOR. Período 1998-2016

| Residuos              | n  | $t_{BF}^*$ | Valor p | $\alpha$ | Conclusión       |
|-----------------------|----|------------|---------|----------|------------------|
| Área de reforestación | 19 | 2.1098     | 0.0005  | 0.05     | Rechazar $H_0$ . |

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 24. Prueba de rachas para la autocorrelación de los residuos del modelo de regresión lineal de la reforestación por el PINFOR. Período 1998-2016**

| Residuos           | $n_1$ | $n_2$ | $v$ | Valor p | $\alpha$ | Conclusión       |
|--------------------|-------|-------|-----|---------|----------|------------------|
| Área reforestación | 7     | 12    | 4   | 0.00030 | 0.05     | Rechazar $H_0$ . |

Fuente: elaboración propia.

**Validación de los supuestos del modelo clásico del modelo de regresión lineal generalizado para la reforestación por el PINFOR**

**Apéndice 25. Coeficientes de regresión del modelo de regresión lineal generalizado para la reforestación por el PINFOR. Período 1998-2016**

$$\text{Modelo: } y_t = \rho y_{t-1} + \beta_0(1-\rho) + \beta_1[(x_t - 1998) - \rho(x_{t-1} - 1998)]$$

(Ec. 78)

con

$$x_t \geq 1998$$

| Coeficiente | Estimación | Error estándar | t        | Valor p |
|-------------|------------|----------------|----------|---------|
| $\beta_0$   | 5244.026   | 23045.87       | 0.2275   | 0.8231  |
| $\beta_1$   | 7320.254   | 1218.402       | 6.008078 | <0.0001 |
| $\rho$      | 0.889494   | 0.154956       | 5.740300 | <0.0001 |

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 26. Prueba de Shapiro-Wilk para la normalidad de los residuos del modelo de regresión lineal generalizado de la reforestación por el PINFOR. Período 1998-2016**

| Residuos              | n  | W*   | Valor p | $\alpha$ | Conclusión          |
|-----------------------|----|------|---------|----------|---------------------|
| Área de reforestación | 18 | 0.96 | 0.8193  | 0.05     | No rechazar $H_0$ . |

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 27. Prueba de Brown-Forsythe para la homogeneidad de varianza de los residuos del modelo de regresión lineal generalizado de la reforestación por el PINFOR. Período 1998-2016**

| Residuos              | n  | $t_{BF}^*$ | Valor p | $\alpha$ | Conclusión          |
|-----------------------|----|------------|---------|----------|---------------------|
| Área de reforestación | 19 | 0.2952     | 0.7717  | 0.05     | No rechazar $H_0$ . |

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 28. Prueba de rachas para la autocorrelación de los residuos del modelo de regresión lineal generalizado de la reforestación por el PINFOR. Período 1998-2016**

| Residuos           | $n_1$ | $n_2$ | v | Valor p | $\alpha$ | Conclusión          |
|--------------------|-------|-------|---|---------|----------|---------------------|
| Área reforestación | 9     | 9     | 7 | 0.109   | 0.05     | No rechazar $H_0$ . |

Fuente: elaboración propia.

## Modelos de fijación de CO<sub>2</sub> por bosques

### Apéndice 29. Análisis de varianza del modelo de la fijación de CO<sub>2</sub> por bosques en Guatemala en función del tiempo. Período 1991-2012

| Fuente    | gl | Suma de cuadrados     | Cuadrado medio        | F <sub>prueba</sub> | Valor p |
|-----------|----|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------|
| Regresión | 1  | 2.50×10 <sup>17</sup> | 2.50×10 <sup>17</sup> | 130.9195            | 0.0003  |
| Residuo   | 4  | 7.65×10 <sup>15</sup> | 1.91×10 <sup>15</sup> |                     |         |
| Total     | 5  | 2.58×10 <sup>17</sup> |                       |                     |         |

Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 30. Coeficientes de regresión del modelo de la cobertura boscosa de Guatemala. Período 1991-2012

$$\text{Modelo: } y = \beta_0 \exp[\beta_1(x - 1991)]$$

(Ec. 76)

| Coefficiente | Estimación | Error estándar | t       | Valor p |
|--------------|------------|----------------|---------|---------|
| $\beta_0$    | 1984966045 | 34885260       | 56.8998 | <0.0001 |
| $\beta_1$    | -0.0164    | 0.0014         | 11.5713 | 0.0003  |

Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 31. Prueba de Shapiro-Wilk para la normalidad de los residuos del modelo de la fijación de CO<sub>2</sub> por bosques. Período 1991-2012

| Residuos                    | n | W*   | Valor p | $\alpha$ | Conclusión                   |
|-----------------------------|---|------|---------|----------|------------------------------|
| Fijación de CO <sub>2</sub> | 6 | 0.94 | 0.6800  | 0.05     | No rechazar H <sub>0</sub> . |

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 32. Prueba de Brown-Forsythe para la homogeneidad de  
varianza de los residuos del modelo de la fijación de CO<sub>2</sub> por bosques.**

**Período 1991-2012**

| Residuos                    | n | $t_{BF}^*$ | Valor p | $\alpha$ | Conclusión                   |
|-----------------------------|---|------------|---------|----------|------------------------------|
| Fijación de CO <sub>2</sub> | 6 | 0.3130     | 0.7699  | 0.05     | No rechazar H <sub>0</sub> . |

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 33. Prueba de rachas para la autocorrelación de los residuos del  
modelo de la fijación de CO<sub>2</sub> por bosques. Período 1991-2012**

| Residuos                    | $n_1$ | $n_2$ | v | Valor p | $\alpha$ | Conclusión                   |
|-----------------------------|-------|-------|---|---------|----------|------------------------------|
| Fijación de CO <sub>2</sub> | 2     | 4     | 3 | 0.4     | 0.05     | No rechazar H <sub>0</sub> . |

Fuente: elaboración propia.



## ANEXOS

### Anexo 1. Área de la cobertura boscosa de Guatemala

| <b>Año</b> | <b>Área forestal (ha)</b> |
|------------|---------------------------|
| 1991       | 5,121,630                 |
| 1996       | 4,699,730                 |
| 2001       | 4,152,052                 |
| 2006       | 3,866,380                 |
| 2010       | 3,722,595                 |
| 2012       | 3,711,366                 |

Fuentes: INAB, UVG, URL

### Anexo 2. Porcentaje de bosques latifoliados en Guatemala

| <b>Año</b> | <b>Porcentaje ( %)</b> |
|------------|------------------------|
| 1991       | 89.47                  |
| 2003       | 78.17                  |
| 2012       | 74.22                  |

Fuentes: FAO, INAB, UVG, URL

### Anexo 3. Porcentaje de bosques de coníferas en Guatemala

| <b>Año</b> | <b>Porcentaje ( %)</b> |
|------------|------------------------|
| 1991       | 6.77                   |
| 2003       | 6.18                   |
| 2012       | 8.03                   |

Fuentes: FAO, INAB, UVG, URL

#### **Anexo 4. Porcentaje de bosques mixtos en Guatemala**

| <b>Año</b> | <b>Porcentaje ( %)</b> |
|------------|------------------------|
| 1991       | 3.77                   |
| 2003       | 15.65                  |
| 2012       | 14.07                  |

Fuentes: FAO, INAB, UVG, URL