

Análisis estocástico multivariante de emisión de CO₂ como factor de captura de carbono y desarrollo sostenible para Colombia¹

Multivariate Stochastic Analysis CO₂ emission factor for carbon sequestration and sustainable development for Colombia

James Alberto Jiménez-Martínez* Luis Miguel Mejía**

*Gerente investigación, desarrollo e innovación ecoflora agro SAS

** Ingeniero agrónomo, MSc desarrollo sostenible y medio ambiente. docente Universidad La Gran Colombia-Armenia.

Resumen

El presente trabajo se soporta en el análisis multivariante para la evaluación de emisión de CO₂ como factor de captura de carbono y desarrollo sostenible en Colombia, dado que en la actualidad, se ha indagado y realizado estudios que hacen referencia al control de emisiones contaminantes que causan daño al entorno y se convierten en un reto planetario. Como respuesta a este reto se crean los MDL (Mecanismos de Desarrollo Limpio) que son Uno de los tres mecanismos de flexibilidad para la reducción de gases efecto invernadero establecidos en el Protocolo de Kioto. MDL es un mecanismo diseñado para promover la inversión en proyectos que reduzcan o capturen emisiones de gases efecto invernadero en países en vía de desarrollo.

En este sentido, utilizando los MDL y con el ánimo de reducir el CO₂ en la atmosfera, se ha desarrollado una nueva estrategia que disminuya el impacto generado, siendo esta denominada Captura de Carbono. No obstante se requiere de métodos de medición e indicadores de emisión de CO₂ que sean significativos y permitan la toma de decisiones frente a las dinámicas generadas, siendo el Análisis Multivariante una alternativa que permite la comprensión de la captura de Carbono como Factor de Desarrollo Sostenible para Colombia, con base en la determinación de los factores asociados a la captura de carbono fundamentado en su impacto ambiental y económico y soportado en herramientas estadísticas como son el análisis de componentes principales y los modelos de regresión lineal múltiple.

Palabras clave: Captura de carbono, emisión de CO₂, componentes principales, regresión múltiple

Abstract

This work is supported in the multivariate analysis to evaluate CO₂ emission factor for carbon sequestration and sustainable development in Colombia, as at present, has been investigated and studies that refer to control pollutant emissions cause damage to the environment and becomes a global challenge. In response to this challenge CDM (Clean Development Mechanism) that are "One of the three flexibility mechanisms for reducing greenhouse gases set in the Kyoto Protocol are created. CDM is a mechanism designed to promote investment in projects that reduce or capture greenhouse gas emissions in developing countries. In this sense, using the MDL and with the aim of reducing the CO₂ in the atmosphere, has developed a new strategy to decrease the impact generated, this being called Carbon Capture. However it requires measurement methods and indicators of CO₂ emissions that are meaningful and allow decisions against the generated dynamics, being the Multivariate Analysis an alternative that allows the understanding of the capture of carbon as a Factor of Sustainable Development Colombia, based on the identification of factors associated with carbon sequestration based on their environmental and economic impact and supported by statistical tools such as principal component analysis and multiple linear regression models.

Keywords: Carbon Capture, emission of CO₂, Principal Components, Multiple Regression

Recibido: 07/06/2014

Revisado: 19/07/2014

Aceptado: 10/09/2014

Correspondencia de autor:

jjimenez@ecofloragro.com

© 2014 Universidad La Gran Colombia. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia *Creative Commons Attribution License*, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que el autor original y la fuente se acrediten.

Cómo citar:

Jiménes-Martínez. (2014) Análisis estocástico multivariante de emisión de CO₂ como factor de captura de carbono y desarrollo sostenible para Colombia. *UG-Ciencia* 20. 64-71

1. Grupo de investigación Gerencia de la tierra, Artículo derivado del proyecto comportamiento de captura de carbono.

Introducción

Cuando se abordan temas como cambio climático y contaminación, se abren espacios de reflexión, análisis y exploración con el fin de encontrar un camino claro hacia el desarrollo sostenible, ante esta realidad se han creado medios y mecanismos como respuesta a este reto planetario, como son los llamados MDL (Mecanismos de Desarrollo Limpio) que son

“Uno de los tres mecanismos de flexibilidad para la reducción de gases efecto invernadero establecidos en el Protocolo de Kioto. MDL es un mecanismo diseñado para promover la inversión en proyectos que reduzcan o capturen emisiones de gases efecto invernadero en países en vía de desarrollo con base en el acuerdo de Kioto (Narvaez y Triviño, 2011),

No obstante, para el alcance de los mecanismos anteriormente mencionados se ha planteado el presente estudio, cuyo objetivo gira en torno al análisis estocástico multivariante de emisión de CO₂ como factor de captura de carbono y desarrollo sostenible para Colombia, con el fin de comprender el comportamiento de las diferentes variables que intervienen en dicha dinámica.

Por otro lado, Greenfacts (2012) sostiene que la captura de carbono es la “extracción y almacenamiento de carbono de la atmósfera en sumideros de carbono (como los océanos, los bosques o la tierra) a través de un proceso físico o biológico como la fotosíntesis”, denominado ciclo natural de carbono (IPCC, 2003).

Como mecanismo de desarrollo sostenible, la captura de carbono se basa en equiparar las cargas en cuanto a captura y emisiones de CO₂ por parte de las empresas, es decir, si una empresa emite dos toneladas de CO₂ al año, aumentando de esta forma la huella de carbono en la atmósfera, esa misma cantidad, es decir dos toneladas de CO₂, debe ser capturada en biomásas vegetales (Herrera y Del Valle, 2001), para de esta manera evitar que más dióxido de carbono llegue a la atmósfera y empeore la situación ambiental. El dióxido de carbono es fijado (Alpizar, 1996) en biomásas producidas por especies vegetales las cuales poseen características específicas para realizar dicho proceso. En el caso de Colombia, la fijación de dióxido de carbono en biomásas vegetales ha sido estudiada con el fin de conocer las características representativas para la captura (Ministerio del Medio Ambiente, 2000), siendo lo anterior la base que sustenta el presente estudio, el cual gira en torno al uso de herramientas estadísticas multivariantes, como son los análisis

factoriales de componentes principales y los modelos de regresión lineal múltiple, con el fin de determinar los parámetros significativos de captura de carbono a nivel mundial, el análisis de la dinámica de los factores de relevancia para Colombia en cuanto a captura de carbono y la comprensión de dicha dinámica de captura de carbono en el país con base en su impacto ambiental y económico.

Materiales y métodos

El presente trabajo de investigación se desarrolló bajo un enfoque empírico analítico y con énfasis descriptivo y correlativo de variables, soportado en información secundaria proveniente de estadísticas de medición de CO₂ del Banco Mundial (Banco Mundial, 2012). Se llevó a cabo el análisis estadístico de las variables por medio de Análisis Factoriales de Componentes Principales a nivel de América, los cuales son sistemas de análisis multivariante aplicado para evaluar la semejanza entre individuos con atributos analizados como variables y permite determinar además una tipología de tales individuos qué grupos de variables están correlacionadas y que son, de naturaleza cuantitativa, donde el sistema de análisis crea las contribuciones a la inercia (varianza) por parte de los individuos, donde el valor acumulado debe ser superior al 50% y define a su vez el número de planos factoriales, lo cual es corroborado en el histograma de valores propios a través de sus codos.

En dicho análisis de componentes principales, el plano factorial genera una hiperesfera que determina no sólo la variabilidad, sino la calidad de los vectores generados y la correlación entre estos, determinando comportamientos de las variables cuantitativas, las cuales son indicadoras de comportamiento del conjunto de variables correlacionadas.

Dichos análisis estadísticos fueron procesados con el *software Spad Win 3.5* del Programa para la Investigación Estadística de la Unión Europea, *Presta*. Por otro lado, con base en las variables que generan significancia se realizó Regresión Lineal Múltiple para el caso específico de Colombia basándose en el uso del *software Statgraphics Plus 5.1*, donde se llevó a cabo un método *Forward* para alcanzar la parsimonia del modelo (modelo significativo con el menor número de variables posible).

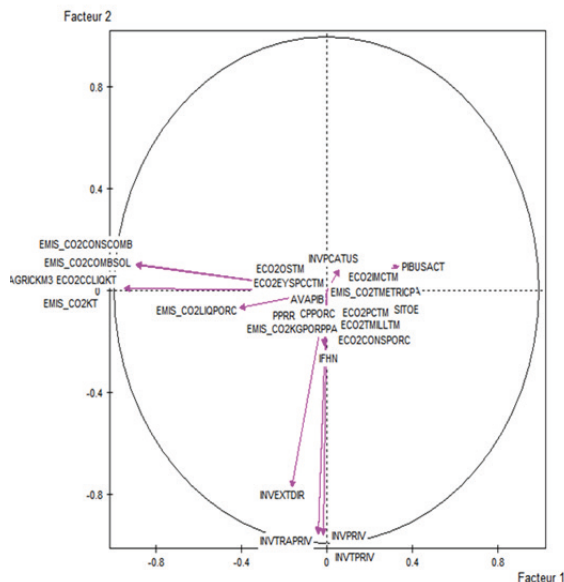
Resultados

Aspectos económicos

Cuando se realizó el análisis de componentes principales con base en las variables asociadas al componente econó-

mico, se detectó que el análisis de dos planos factoriales explica el 57,04% de la información (datos no mostrados), lo cual los hace significativos, donde el plano 1 indica correlación directa de tierras agrícolas por kilómetro cuadrado con respecto a variables como emisiones de CO₂ por emisiones de combustibles a gas, emisiones de CO₂ del consumo de combustible líquido (kilotoneladas) y emisiones de CO₂ del consumo de combustibles sólidos (kilotoneladas), apreciándose que el uso de las tierras con vocación agrícola se liga a estas variables posiblemente por el uso de fuentes para producción agrícola de naturaleza química como son fertilizantes, herbicidas, entre otros productos; además, el plano 2 está asociado con inversión extranjera directa, entrada neta de capital (% del producto interno bruto, PIB), Inversión en energía con participación privada (US\$ a precios actuales), Inversión en telecomunicaciones con participación privada (US\$ a precios actuales) e inversión en transporte con participación privada (US\$ a precios actuales), lo cual denota que la inversión privada en proyectos es un componente que podría suscitar al incremento de los problemas de emisiones mencionados anteriormente y se puede apreciar en el respectivo Plano Factorial de Variables de Cambio Climático en función de Variables Económicas (Figura 1).

Figura 1. Variables de Cambio Climático en función de Variables Económicas.



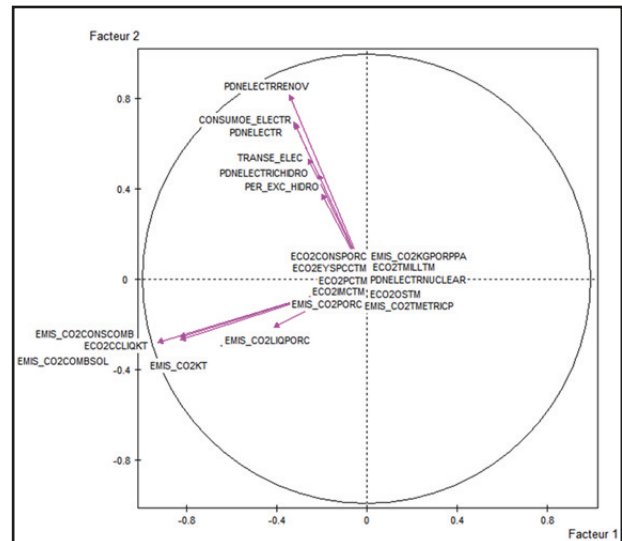
Fuente: elaboración propia, 2013

Es de resaltar que las variables anteriormente mencionadas son aquellas que presentan mayor calidad como indicadores para el tema de calentamiento global, dada la proyección de los vectores cerca de la hiperesfera, consolidando aún más lo mencionado con antelación con respecto a las correlaciones, resaltando su potencial como medios de evaluación de cambio climático para América.

Aspectos tecnológicos

Desde el punto de vista tecnológico, el análisis de componentes principales soportado en dos planos factoriales explican el 57,94% de la información (histograma de valores propios, datos no mostrados), lo cual los hace significativos, donde el plano 1 indica una correlación directa de las variables emisiones de CO₂ por emisiones de combustibles a gas, emisiones de CO₂ del consumo de combustible líquido (kilotoneladas), emisiones de CO₂ del consumo de combustibles sólidos (kilotoneladas), indicando que desde el punto de vista tecnológico solo los aspectos de emisiones denotan significancia con respecto a alteraciones de cambio climático para América Latina, mientras que el factor 2 se asocia con la producción de electricidad y consumo de energía eléctrica, apreciándose que el consumo de energía eléctrica así como su producción son aspectos que presionan hacia la generación de emisiones de CO₂ (Figura 2).

Figura 2: Aspectos Tecnológicos que influyen en la emisión de CO₂



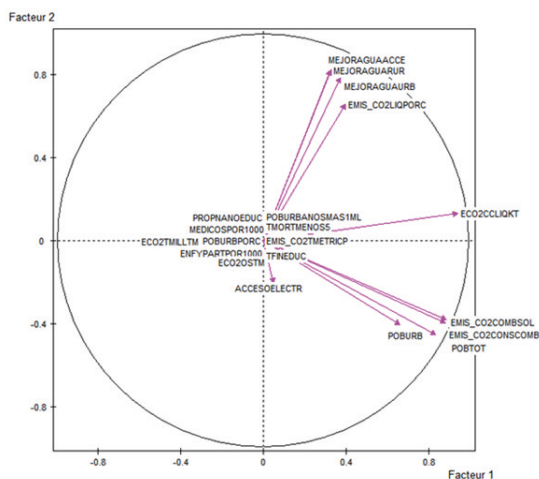
Fuente: elaboración propia, 2013

Resaltándose que dichas variables presentan el potencial indicador de medición de cambio climático para el caso del continente bajo análisis.

Aspectos sociales

Cuando se realizó el análisis de componentes principales con base en las variables asociadas al componente económico se detecta en el histograma de valores propios que el análisis de dos planos factoriales explican: el 67,84% de la información (datos no mostrados), lo cual los hace significativos, donde el plano 1 indica que las emisiones de CO₂ por emisiones de combustibles a gas, emisiones de CO₂ del consumo de combustible líquido (kilotoneladas) y emisiones de CO₂ del consumo de combustibles sólidos (kilotoneladas) se asocian con la población total y la población urbana en correlación directa, donde se podría inferir que a medida que la población total y en especial la urbana se incrementa, estas emisiones podrán aumentar de manera significativa. Por otro lado, se correlacionan con la mejora en el suministro de agua en el sector urbano y rural; no obstante, se aprecia que la accesibilidad y la mejora en el suministro de agua para los sectores urbano y rural son aquellos que explican el plano factorial 2, indicando que la accesibilidad al agua es un componente fundamental que es afectado por diferentes condiciones de cambio climático, como respuesta a la dinámica de las variables de población y emisión de CO₂ mencionadas anteriormente, donde tales emisiones pueden afectar a estos suministros significativamente (Figura 3).

Figura 3. Aspectos tecnológicos que influyen en la emisión de CO₂

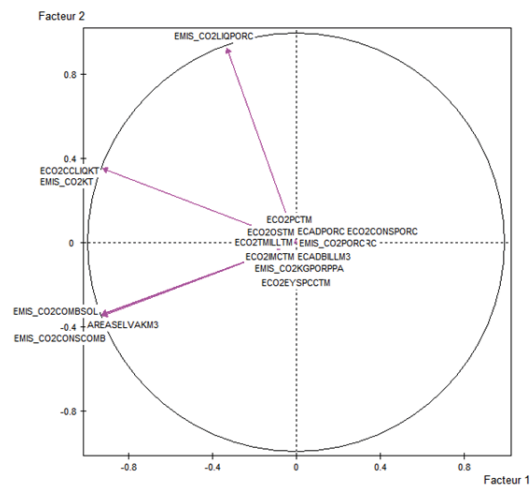


Fuente: elaboración propia, 2013

Aspectos ambientales

Con respecto a los aspectos ambientales, en el análisis de componentes principales se detecta que el histograma de valores propios gira en torno a dos planos factoriales que explican el 98% de la información (datos no mostrados), lo cual los hace significativos, donde el plano 1 indica correlación directa de las variables de emisiones de CO₂ por emisiones de combustibles a gas, emisiones de CO₂ del consumo de combustible líquido (kilotoneladas), emisiones de CO₂ del consumo de combustibles sólidos (kilotoneladas) en correlación con área de la selva en km², denotándose la potencialidad de las zonas de selva como zonas de mitigación de CO₂, así como sistemas de captura de carbono, abriendo espacio a procesos de mecanismos de desarrollo limpio con base en la estimación de la tasa de acumulación de biomasa y su proporcionalidad con respecto a la capacidad que tiene dichos ecosistemas en América para potenciales manejos como reservas de producción de oxígeno (Figura 4).

Figura 4. Aspectos ambientales que influyen en la emisión de CO₂



Fuente: elaboración propia, 2013

Modelos de emisión de CO₂

Con base en las variables indicadoras principales como variables respuesta y tomando como variables explicatorias a aquellas variables económicas, sociales, tecnológicas y ambientales, a partir de la aplicación de un método *Forward* con el fin de alcanzar la parsimonia de dichos modelos y evaluando la fiabilidad y validez de los mismos con pruebas de supuestos estadísticos en el análisis de varianza, se

obtuvieron los siguientes modelos que pueden explicar las dinámicas existentes con respecto a cambio climático para América.

Emisiones de CO₂ del consumo de combustible líquido:

El presente modelo es significativo (p-valor=0,0469), como se aprecia en el análisis de varianza Tabla 1, (Ver anexo). se determinó que las emisiones de CO₂ a partir de combustibles líquidos depende principalmente de las variables producción de electricidad en kWh, producción de electricidad a partir de fuentes renovables, el consumo de energía eléctrica en kWh, la población total y la inversión en energía con participación privada.

Modelo de regresión

Emisión CO₂ consumo de combustible líquido =
 $-1,43373E8 + 0,0219418 * \text{Producción_de_electricidad_kWh} - 0,00721166 * \text{Producción_electricidad_partir_de_fuentes_renovables} - 0,0180605 * \text{Consumo_de_energía_eléctrica_kWh} +$

$0,0331779 * \text{Población_total} - 0,00456642 * \text{Inversión_en_energía_con_participación}$

Fuente: elaboración propia, 2013

Emisiones de CO₂ del consumo de combustibles sólidos:

El modelo de emisiones de CO₂ de combustibles sólidos gira en torno a las variables tierras agrícolas en Km², producción eléctrica a partir de petróleo, la producción de electricidad en kWh, el Consumo de energía eléctrica en kWh y la Población total, siendo dicho modelo significativo (p-valor=0,0307) como se aprecia en el respectivo análisis de varianza Tabla 2. (ver anexo.)

Modelo de regresión

Emisiones de CO₂ del consumo de combustibles sólidos =
 $-1,26722E8 + 246,834 * \text{Tierras_agrícolas_Km2} - 0,00533667 * \text{Producción_electricidad_partir_de_petróleo} - 0,00263609 * \text{Producción_de_electricidad_kWh} +$

$0,00389808 * \text{Consumo_de_energía_eléctrica_kWh} + 0,00594665 * \text{Población_total}$

Fuente: elaboración propia, 2013

Emisión de CO₂ por consumo de combustible a gas:

El presente modelo es significativo (p-valor=0,0245), como se aprecia en el análisis de varianza Tabla 3 (Ver anexo.) se determinó que las emisiones de CO₂ a partir de combustibles a gas dependen principalmente de las variables Tierras agrícolas en Km², la producción eléctrica a partir de carbón en porcentaje, la producción eléctrica a partir de fuentes hídricas en porcentaje, la producción eléctrica a partir de gas natural, producción eléctrica a partir de petróleo, producción de electricidad en kWh, producción eléctrica a partir de fuentes renovables, el Uso de energía en kilotoneladas, consumo de energía eléctrica en kWh y la población urbana en porcentaje del total.

Modelo de regresión

Emisión de CO₂ por consumo de combustible a gas =
 $-4,41619E8 + 1183,51 * \text{Tierras_agrícolas_Km2} - 0,00334591 * \text{Producción_electricidad_partir_de_carbón_porcentaje} + 0,00364522 * \text{Producción_electricidad_partir_de_hidricas_porcentaje} +$

$0,0214142 * \text{Producción_electricidad_partir_de_gas_natural} - 0,0175042 * \text{Producción_electricidad_partir_de_petróleo_porcentaje} -$

$0,0116731 * \text{Producción_de_electricidad_kWh} + 0,00687428 * \text{Producción_electricidad_partir_de_fuentes_renovables} +$

$0,310875 * \text{Uso_de_energía_kt_de_equivalente} + 0,00558827 * \text{Consumo_de_energía_eléctrica_kWh} - 3734,96 * \text{Población_urbana_del_total}$

Fuente: elaboración propia, 2013

Emisiones de CO₂ del consumo de combustibles sólidos (kilotoneladas)

Con respecto a la emisión de CO₂ del consumo de combustibles sólidos (kilotoneladas), el presente modelo es significativo (p-valor=0,0333), como se aprecia en el análisis de varianza Tabla 4 (Ver anexo.) y se determinó que dichas emisiones de CO₂ gira en torno de las variables uso de energía kg de equivalente, tierras agrícolas en km², producción de electricidad a partir de carbón en porcentaje, producción eléctrica a partir de fuentes hídricas en porcentaje, producción de electricidad a partir de gas natural, producción de

electricidad a partir de petróleo en porcentaje, producción de electricidad en kWh, producción de electricidad a partir de fuentes renovables, consumo de energía eléctrica en kWh, la población urbana en porcentaje del total, la Población total, Inversión en energía con participación privada y la Inversión en telecomunicaciones con participación privada.

Modelo de regresión

Emisiones de CO₂ del consumo de combustibles sólidos = -8,84815E8 + 0,0167366*Uso_de_energía_kg_de_equivalente + 932,178*Tierras_agrícolas_Km² + 0,00462211*Producción_electricidad_partir_de_carbón_porcentaje- 0,00616003*Producción_electricidad_partir_de_hídricas_porcentaje- 0,044048*Producción_electricidad_partir_de_gas_natural+

0,00609697*Producción_electricidad_partir_de_petróleo_porcentaje+ 0,00242649*Producción_de_electricidad_kWh -

0,015343*Producción_electricidad_partir_de_fuentes_renovables+ 0,0263218*Consumo_de_energía_eléctrica_kWh +

3625,09*Población_urbana_%_del_total + 0,0126144*Población__total - 0,0397828*Inversión_en_energía_con_participación- 0,00692579*Inversión_en_telecomunicaciones

Fuente: elaboración propia, 2013

Discusión

Las variables indicadoras de emisión de CO₂ que conllevan al análisis de cambio climático a nivel de América son la emisión de CO₂ por consumo de combustible a gas, emisiones de CO₂ del consumo de combustibles sólidos (kilotoneladas), emisiones de CO₂ del consumo de combustible líquido (kilotoneladas) y emisiones de CO₂ del consumo de combustibles sólidos (kilotoneladas); es decir, que es el consumo de combustible de diferente naturaleza el factor determinante para la región, lo cual se aprecia en los análisis de componentes principales y se corrobora con los respectivos modelos de regresión múltiple.

Se aprecia además, que las variables económicas que se asocian con cambio climático son las tierras agrícolas en Km², inversión extranjera directa, entrada neta de capital, inversión en energía con participación privada, inversión en te-

lecomunicaciones con participación privada e inversión en transporte con participación privada, mientras que las variables tecnológicas de mayor relevancia son la producción de electricidad, producción de electricidad a partir de fuentes renovables y el consumo de energía eléctrica. Con respecto al componente social las variables de mayor significancia son las poblaciones urbana y rural, así como la mejora en el suministro de agua a nivel urbano y rural. Sin embargo, sólo se apreció una variable significativa para el ámbito ambiental y es aquella correlacionada con el área de selvas en Km², observándose la importancia del manejo sostenible de los recursos renovables como medios para potenciales soluciones con respecto al cambio climático adverso.

Conclusiones

Con el presente estudio se observó que los diferentes modelos presentan significancia estadística y pueden ser usados como medios para el pronóstico de emisiones de CO₂ a partir de las cuatro diferentes fuentes energéticas fundamentales con base en el análisis de componentes principales.

No obstante, la producción de electricidad, así como el consumo de energía eléctrica y la población total del país son variables comunes asociadas a la emisión de CO₂, lo cual abre espacio para mayor estudio y debate con respecto a la gestión y regulación de dichos aspectos; además, el área en selvas en km² es una variable significativa para América en general, pero no denota efecto significativo dentro del modelamiento estadístico para Colombia, lo cual no la hace menos importante, sino que requiere de mayor número de datos para que sea mayor su comprensión correlativa con otras variables.

Referencias bibliográficas

- Alpizar, W (1996). Proceso metodológico para la cuantificación de carbono de la biomasa en pie en bosque natural y su estimación de no emisión y fijación. OCIC, mimeo. Clough, B.F., P. Dixon & O. Dalhaus, 1997. Allometric relationships for estimating biomass in multi-stemmed mangrove trees. *Australian Journal of Botany* 45: 1023-1031.
- Herrera M.A, del Valle J., Orrego, S (2001, octubre). *Biomasa de la vegetación herbácea y leñosa pequeña y necromasa en bosque tropicales primarios y secundarios de Colombia*. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la captura de carbono en los ecosistemas forestales. Valdivia, Chile.

Ministerio del Medio Ambiente (2000). *Estudio de Estrategia Nacional para la implementación del MDL en Colombia*. Bogotá.

Narvaez, D; Triviño, L. (2011). Ecoparque de Guayaquil, una propuesta de recolección de residuos en Guayaquil. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación.

Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T. [Taka], Krug, T.[Thelma], Kruger, D., Pipatti, R., L Buendia, L.,

Miwa, K, Ngara, T[Todd] y Wagner, F. [Eds.] (2003). *Good practice guidance for land use, land-use change and forestry*. Kamiyamaguchi: Institute for Global Environmental Strategies. Recuperado de: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_files/GPG_LULUCF_FULL.pGL

Datos Banco Mundial (s.f). Recuperado el 2 de Junio de 2012.<http://datos.bancomundial.org/>

GreenFacts, Facts on health and the environment (s.f). Recuperado el 25 de enero de 2012.www.greenfacts.org

Anexos

Tabla 1. Análisis de varianza y modelo de regresión lineal para la variable emisiones de CO_2 del consumo de combustible líquido

<u>Análisis de Varianza</u>					
Fuente	Sumas de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Prueba F	Valor-p
Model	1,82018E15	5	3,64035E14	3,28	0,0469
Residual	1,2215E15	11	1,11046E14		
Total (Corr.)	3,04168E15	16			

Tabla 2. Análisis de varianza y modelo de regresión lineal para la variable emisiones de CO_2 del consumo de combustibles sólidos

<u>Análisis de Varianza</u>					
Fuente	Sumas de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Prueba F	Valor-p
Model	1,82642E14	5	3,65283E13	3,69	0,0332
Residual	1,08904E14	11	9,9004E12		
Total (Corregido)	2,91546E14	16			

Tabla 3. Análisis de varianza y modelo de regresión lineal para la variable emisiones de CO_2 del consumo de combustibles sólidos

<u>Análisis de Varianza</u>					
Fuente	Sumas de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Prueba F	Valor-p
Model	3,08894E14	10	3,08894E13	5,51	0,0245
Residual	3,36425E13	6	5,60709E12		
Total (Corr.)	3,42536E14	16			

Tabla 4. Análisis de varianza y modelo de regresión lineal para la variable emisiones de CO_2 del consumo de combustibles sólidos (kilotoneladas):

<u>Análisis de Varianza</u>					
Fuente	Sumas de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Prueba F	Valor-p
Model	6,53547E15	14	4,66819E14	29,48	0,0333
Residual	3,1669E13	2	1,58345E13		
Total (Corr.)	6,56714E15	16			