

# **PODER CALORÍFICO DE CARBONES COLOMBIANOS A PARTIR DE ANÁLISIS PRÓXIMO**

EDWARD GALLEGO CARMONA  
CODIGO: 0825045  
JOSÉ VICENTE REALPE SALCEDO  
CÓDIGO: 0733172

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA QUÍMICA  
SANTIAGO DE CALI  
2015

# **PODER CALORÍFICO DE CARBONES COLOMBIANOS A PARTIR DE ANÁLISIS PRÓXIMO**

EDWARD GALLEGO CARMONA  
JOSÉ VICENTE REALPE SALCEDO

Este trabajo se presenta como requisito de Proyecto de Grado para optar por el  
título de INGENIERO QUÍMICO

Director:  
JUAN MANUEL BARRAZA BURGOS, Ing. Químico. M.Sc. Ph.D.

Codirector:  
FRANCISCO JOSÉ VELASCO, Ing. Químico, M.Sc.

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA QUÍMICA  
SANTIAGO DE CALI  
2015

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Santiago de Cali, Lunes 9 de Febrero de 2015

## DEDICATORIA

*A Dios por brindarme sabiduría y permitirme alcanzar esta meta. A mi madre y mi hermana, los motores de mi vida, por su apoyo incondicional y su esfuerzo. A mi padre, que aunque no esté con nosotros, es mi impulso para salir adelante. A mi familia, mis amigos y profesores por toda su ayuda en este proceso de formación.*

*Jose Realpe*

*A mis padres y hermanos, por su amor incondicional y apoyo constante, y a la vida por permitir encontrarme con personas tan interesantes, que de una u otra manera moldean mi destino.*

*Edward Gallego*

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo de grado no se habría podido realizar sin la colaboración de muchas personas que nos han brindado su ayuda y sus conocimientos. Queremos agradecerles a todos ellos su acompañamiento incondicional para desarrollar satisfactoriamente este proyecto.

A Dios y la Virgen, por acompañarnos en este proceso, siendo nuestras guías y por permitirnos vivir esta experiencia enriquecedora, llena de enseñanzas importantes para nuestras vidas y formación profesional.

Queremos expresar nuestros infinitos agradecimientos a nuestros padres, por su apoyo incondicional, por ser nuestros motores para salir adelante, por su esfuerzo, por enseñarnos los valores que nos hacen ser grandes personas y excelentes profesionales.

A nuestros hermanos, gracias por darnos su cariño y estar siempre presentes en los momentos de dificultad. Gracias por su comprensión durante esta etapa en nuestras vidas, por sus consejos y por brindarnos la fortaleza para seguir luchando por nuestros sueños.

Nuestro más sincero agradecimiento a nuestras familias y amigos, aquí en la ciudad de Cali, por acogernos en sus hogares y brindarnos ese apoyo importante para poder realizar nuestros estudios. Gracias por su paciencia y sus consejos para nuestras vidas.

Estamos especialmente agradecidos con nuestro director, el profesor Juan Manuel Barraza, con su gran calidad científica y humana, nos brindó su apoyo, su tiempo y dedicación. Gracias por compartirnos su valioso conocimiento, orientándonos en este proceso. Al ingeniero Francisco Velasco queremos agradecerle por su colaboración y por la información necesaria para el desarrollo de este trabajo.

Al Laboratorio de Combustión Combustibles, a sus profesores y colaboradores, quienes nos brindaron la información fundamental para este proyecto y nos dieron su apoyo con amabilidad, muchas gracias.

A todos nuestros amigos y compañeros con quienes compartimos a lo largo de esta trayectoria y con quienes, unidos, luchamos por sacar esta gran meta adelante. Gracias por su incondicional apoyo.

## CONTENIDO

|                                                                   | pág. |
|-------------------------------------------------------------------|------|
| INTRODUCCIÓN .....                                                | 11   |
| 1 MARCO TEÓRICO.....                                              | 13   |
| 1.1 ANTECEDENTES .....                                            | 13   |
| 1.2 CARBÓN .....                                                  | 15   |
| 1.2.1 Generalidades .....                                         | 15   |
| 1.3 PODER CALORÍFICO .....                                        | 15   |
| 1.4 ANÁLISIS PRÓXIMO .....                                        | 16   |
| 1.4.1 Parámetros determinados en el Análisis Próximo .....        | 17   |
| 1.4.2 Tipos de carbón.....                                        | 18   |
| 1.4.3 El carbón en Colombia .....                                 | 20   |
| 1.4.4 Calidades del Carbón Colombiano .....                       | 20   |
| 1.5 ANÁLISIS DE REGRESIÓN .....                                   | 21   |
| 1.5.1 Regresión Lineal .....                                      | 22   |
| 1.5.2 Regresión No Lineal .....                                   | 24   |
| 1.5.3 Significado de linealidad.....                              | 26   |
| 1.6 ESTIMADORES ESTADÍSTICOS .....                                | 27   |
| 1.6.1 El coeficiente de determinación (R <sup>2</sup> ).....      | 27   |
| 1.6.2 Suma de Residuales .....                                    | 27   |
| 1.6.3 Error promedio absoluto (MAE por sus siglas en inglés)..... | 28   |

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.6.4 Error promedio absoluto porcentual (MAE% por sus siglas en inglés) .....                              | 28 |
| 1.6.5 Error estándar estimado .....                                                                         | 28 |
| 1.6.6 Suma de cuadrados del error (SSE por sus siglas en inglés) .....                                      | 28 |
| 1.7 AJUSTE DE CURVAS .....                                                                                  | 29 |
| 2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....                                                                            | 30 |
| 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....                                                                              | 34 |
| 3.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS .....                                                                 | 34 |
| 3.2 CORRELACIONES ENTRE EL PODER CALORÍFICO Y LOS PARÁMETROS<br>DEL ANÁLISIS PRÓXIMO .....                  | 35 |
| 3.3 DESARROLLO DE LOS MODELOS .....                                                                         | 38 |
| 3.3.1 Obtención de las ecuaciones .....                                                                     | 39 |
| 3.3.2 Pre-selección de las mejores correlaciones .....                                                      | 41 |
| 3.3.3 Determinación de la mejor correlación para cada estructura .....                                      | 43 |
| 3.3.4 Determinación de la mejor correlación para cada estructura a través del<br>método de “Stepwise” ..... | 46 |
| 3.3.5 Correlaciones seleccionadas .....                                                                     | 48 |
| 4 CONCLUSIONES .....                                                                                        | 53 |
| 5 RECOMENDACIONES .....                                                                                     | 55 |
| BIBLIOGRAFÍA .....                                                                                          | 56 |
| ANEXOS .....                                                                                                | 60 |



## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                | pág. |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figura 1. Formas típicas para el modelo de decaimiento exponencial y crecimiento exponencial.....                                                              | 255  |
| Figura 2. Relación de Humedad contra el Poder Calorífico Superior de las muestras evaluadas.....                                                               | 366  |
| Figura 3. Relación de la Materia Volátil contra el Poder Calorífico Superior de las muestras evaluadas.....                                                    | 366  |
| Figura 4. Relación de la Ceniza contra el Poder Calorífico Superior de las muestras evaluadas.....                                                             | 377  |
| Figura 5. Relación del Carbono Fijo contra el Poder Calorífico Superior de las muestras evaluadas.....                                                         | 377  |
| Figura 6. Gráfico de selección por Error Promedio Absoluto (MAE). ....                                                                                         | 433  |
| Figura 7. Gráfico de selección por Error Estándar Estimado (SEE).....                                                                                          | 433  |
| Figura 8. Gráfico de selección por Suma de Cuadrados del Error (SSE) .....                                                                                     | 444  |
| Figura 9. Gráfico de selección por Error Promedio Absoluto Porcentual (MAE%).<br>.....                                                                         | 444  |
| Figura 10. Poder Calorífico Real vs. Poder Calorífico Predicho con modelo de dos variables 2M-2 (Humedad-Ceniza). ....                                         | 499  |
| Figura 11. Poder Calorífico Real vs. Poder Calorífico Predicho con modelo de dos variables 3M-4 (Materia Volátil-Humedad-Carbono Fijo). ....                   | 499  |
| Figura 12. Poder Calorífico Real vs. Poder Calorífico Predicho con modelo de cuatro variables 4M.....                                                          | 50   |
| Figura 13. Poder Calorífico Superior Real vs. Poder Calorífico Superior estimado con la correlación escogida 3M-1, para datos no incluidos en el ajuste.. .... | 511  |

## LISTA DE TABLAS

pág.

|                                                                                                                 |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tabla 1. Clasificación de los carbones.....                                                                     | 199  |
| Tabla 2. Estructura de los modelos basada en el número y las combinaciones de las variables independientes..... | 311  |
| Tabla 3. Estadística descriptiva de los datos usados para modelar el poder calorífico del Carbón .....          | 344  |
| Tabla 4. Ecuaciones obtenidas mediante el software para cada una de las estructuras. ....                       | 4040 |
| Tabla 5. Correlaciones que mejor se ajustan a los datos, seleccionadas para cada subestructura modelo. ....     | 422  |
| Tabla 6. Resultados obtenidos por medio del método de selección paso a paso “Stepwise” .....                    | 47   |

## INTRODUCCIÓN

Las características del carbón varían en función de su grado de carbonificación, que depende principalmente del tiempo y de ciertas condiciones de terreno. El carbón se clasifica por rangos, esto es de acuerdo a su grado de metamorfismo. Estos rangos permiten realizar estimaciones amplias del comportamiento del carbón en minería, preparación y uso. Los criterios de clasificación del carbón se basan principalmente en el carbono fijo, la materia volátil y el poder calorífico superior (PCS).

El PCS, también conocido como *Higher Heating Value (HHV)*, indica la cantidad útil de energía de un carbón, y por lo tanto, su valor como combustible (Patel et al., 2007). EL PCS se mide experimentalmente usando una bomba calorimétrica. Sin embargo, ingenieros, investigadores y en general quienes están interesados con el poder calorífico, desean determinarlo con un método fácil, económico y rápido dentro de una tolerancia aceptable. Por otro lado, la humedad, la materia volátil, la ceniza y el carbón fijo se determinan por análisis próximo, lo cual es comparativamente más económico que la bomba calorimétrica (Majumder et al., 2008).

Actualmente, la demanda mundial de energía se obtiene de combustibles fósiles, tales como fuel oil, gas natural y carbón. Entre estos, el carbón tiene mayor disposición de reservas mundiales y es una fuente crucial de energía para muchos países, la cual es transformada a calor y potencia eléctrica por medio de diferentes tecnologías (Akkaya, 2009). Por lo tanto, determinar su calidad y valor, es una tarea importante que depende de conocer sus propiedades físicas y químicas.

Colombia es el país con mayores reservas de carbón en América Latina, con recursos potenciales de 16.436 millones de toneladas y posicionado como el cuarto exportador de carbón térmico en el mundo y el décimo productor mundial (UPME, 2012) concentrando así, casi la mitad de la actividad minera en el país. Comprender, conocer y determinar con facilidad las propiedades físicas y químicas del carbón colombiano, es por lo tanto una tarea de suma importancia para la economía y la industria colombiana.

En todo el mundo, y durante muchos años, se ha buscado determinar una forma confiable para predecir el PCS del carbón y de muchos otros combustibles. No obstante, muchos de ellos se basan en datos de análisis último, el cual es un método de difícil ejecución. Es debido a esta razón que en los últimos años ha aumentado el interés por desarrollar correlaciones en base al análisis próximo, usando diferentes medios para construir un modelo fiable y que responda a un tipo

de carbón o a su región de procedencia, aunque la literatura hasta ahora estudiada sugiere que una correlación general lleva consigo un aumento en la desviación con respecto al valor experimental.

En este trabajo, se desarrolló una correlación que permite estimar el PCS a partir de los datos de análisis próximo de un número considerable de muestras (aproximadamente 1000) de carbones colombianos, y de esta manera, reducir los costos y simplificar la labor de determinarlo experimentalmente.

## 1 MARCO TEÓRICO

Este capítulo tratará sobre el análisis de regresión, algunos estimadores estadísticos para la evaluación de curvas de regresión, así como los métodos de ajuste de dichas curvas. También se incluye el análisis próximo del carbón, que en general resumen las propiedades físico-químicas de este mineral, y también cómo las variables de respuesta de esos análisis se pueden relacionar con el poder calorífico del carbón. Se muestra el fundamento teórico de las bases de la clasificación del carbón y la de los análisis que se utilizan para su caracterización.

El enfoque se centrará en dos métodos de análisis, uno estadístico y el otro de caracterización de las propiedades físico-químicas, con el fin de comprender la forma en que el PCS del carbón se relaciona con su humedad, ceniza, materia volátil y carbono fijo.

### 1.1 ANTECEDENTES

En los últimos años, varias correlaciones se han desarrollado para predecir el poder calorífico del carbón. Pero mucho antes, Goutal (1902) propuso una correlación (1) tomando en cuenta la materia volátil y el carbono fijo en base libre de ceniza:

$$HHV = 82FC + \alpha VM \quad (1)$$

Donde FC y VM denotan carbono fijo y materia volátil respectivamente y  $\alpha$  es una constante que depende del valor de materia volátil y tiene diferentes valores según el contenido de ésta última. HHV es el valor del poder calorífico superior en kcal/kg. En esta correlación se asume que el carbono fijo de diferentes carbones es de composición fija y por lo tanto de poder calorífico fijo. La composición y poder calorífico de la materia volátil difiere entre carbones y se asume que depende de la naturaleza del carbón. Estas suposiciones limitan el uso de esta correlación.

Schuster (1951), propuso una correlación (2) para el PCS basada en materia volátil pero en base libre de ceniza. Sin embargo, dicha correlación se veía limitada por el requerimiento de tener las muestras en base libre de ceniza, lo cual necesitaba un proceso de preparación de la muestra. Por otro lado, la

dependencia de únicamente un parámetro, en este caso la materia volátil, no refleja de manera adecuada el poder calorífico del carbón.

$$\text{HHV} = 4.183 \times 10^{-3} [8000 + \text{VM}(70 - 1.65\text{VM})] \quad (2)$$

Kucukbayrak et al. (1991) por su parte, tuvieron en cuenta la materia volátil y las cenizas para estimar el poder calorífico de los lignitos. Su ecuación (3) asume que el PCS era función polinómica de la materia volátil (VM) y de la ceniza (A):

$$\text{HHV} = 76.56 - 1.3(\text{VM} + \text{A}) + 7.03 \times 10^{-3} (\text{VM} + \text{A})^2 \quad (3)$$

De esta manera, se ha intentado desarrollar modelos que predican el comportamiento del PCS de diferentes combustibles tales como desechos orgánicos, materiales lignocelulósicos, carbones de rangos específicos o carbones vegetales a partir de análisis próximos. No obstante, dichas correlaciones han tenido limitaciones importantes que restringen su uso a carbones o combustibles con cualidades específicas.

Más recientemente, algunos autores han propuesto modelos no convencionales para predecir el PCS. Entre estos, Patel et al (2007) usó una metodología de redes neuronales artificiales (ANN por sus siglas en inglés). La complejidad de estos modelos limita su aplicabilidad (Majumder et al., 2007), además de haberse encontrado que dicha técnica no es mejor o muy diferente de la regresión, como una herramienta común y entendida, en la predicción de relaciones poco complicadas entre análisis próximo y PCS (Mesroghli et al., 2009).

Se puede observar en la literatura que la mayoría de los modelos que predican de mejor manera el PCS se basan en datos de análisis últimos. Es el caso de Channiwala y Parikh (2002) quienes desarrollaron un modelo unificado de datos de análisis últimos de diferentes combustibles sólidos, líquidos y gaseosos bajo un amplio rango. Su modelo podía estimar el PCS de varios combustibles con un error absoluto promedio de 1.45%. No obstante, se debe tener en cuenta que el análisis último no solo requiere equipos complejos, sino también personal altamente entrenado, además de un costo superior al método de la bomba calorimétrica en la mayoría de los casos.

En el trabajo realizado por Chehreh y Makaremi (2013), se logró desarrollar una ecuación para predecir el PCS a partir de parámetros de análisis próximo con un

factor de correlación o coeficiente de determinación  $R^2 = 0.98$  usando regresión multivariable (MR). Esto permite mostrar, que es posible desarrollar un modelo capaz de predecir el PCS por medio de un método no muy complicado. Trabajos como éstos, no han sido desarrollados a la fecha en Colombia, hasta donde se tiene conocimiento.

## 1.2 CARBÓN

**1.2.1 Generalidades.** El carbón es el resultado de la transformación física y química de la materia orgánica vegetal, que ha sido enterrada gracias a los procesos geológicos derivados de los movimientos de las placas tectónicas a lo largo de millones de años y que han propiciado las condiciones adecuadas de presión y temperatura para el desarrollo del proceso. La mayor parte del carbón está compuesta de carbono (C), pero también están presentes elementos como el hidrógeno (H), oxígeno (O), azufre (S) y nitrógeno (N), sustancias tales como el agua ( $H_2O$ ) y componentes inorgánicos como algunos minerales.

Un aspecto muy importante es determinar las cantidades de los componentes principales del carbón. El procedimiento para calcular estas características es llamado *Análisis Último*. De los elementos químicos presentes en el carbón, el carbono y el hidrógeno son los combustibles predominantes. El carbono constituye entre un 25% y un 95% en peso del total de una muestra, mientras que el contenido de hidrógeno varía alrededor del 5% para muestras con un porcentaje en peso de carbono menor o igual al 90%, o disminuye a alrededor del 2%, generalmente para muestras con porcentajes mayores al 95% en peso de carbono (Radovic, L.R. y Schobert, H.H., 1992).

Otros parámetros como el nitrógeno, se mantienen en un rango entre el 1%-2%, generalmente en todo tipo de muestras. El contenido de oxígeno tiene un comportamiento inversamente proporcional al contenido de carbono: a mayores cantidades de carbono, el porcentaje en peso de oxígeno será menor. Este comportamiento se refleja en la capacidad de una muestra de carbón para incinerarse, es decir, muestras con mayores contenidos de oxígeno, se podrán quemar con mayor facilidad y mayor rapidez.

## 1.3 PODER CALORÍFICO

El poder calorífico de cualquier combustible es definido como la energía liberada por unidad de masa o volumen (dependiendo del estado de la materia) cuando el

combustible es completamente quemado (Boundy, B. et al, 2011). Al ser un indicador del contenido de energía, éste es considerado uno de los parámetros más importantes para la evaluación de materiales como el carbón.

Se debe tener en cuenta que el poder calorífico no es un parámetro que forma parte del análisis último y el análisis próximo, pero es una función de la composición del carbón, que es determinada a través de dichos análisis (Speight, J.G., 1994). De esta manera, el valor de los parámetros como la humedad o la ceniza tienen una influencia negativa en el valor del poder calorífico. Para el análisis del carbón, la determinación del poder calorífico se realiza en una bomba calorimétrica utilizando el método isotérmico (ASTM D3286) o el método adiabático (ASTM D2015).

El valor del poder calorífico depende de las condiciones bajo las que se esté asumiendo la presencia del agua en la combustión final de los productos. De esta forma, se tienen dos tipos de poder calorífico: el poder calorífico superior y el poder calorífico inferior.

El poder calorífico superior (HHV, *Higher Heating Value* por su nombre en inglés) hace referencia a la cantidad total de calor, asumiendo las condiciones bajo las cuales el agua presente en la reacción es condensada. De esta manera, al condensar el vapor de agua contenido en los gases de combustión se está incluyendo su aporte de los calores sensible y latente en el valor total del poder calorífico.

El poder calorífico inferior (LHV, *Lower Heating Value* por su nombre en inglés) es medido bajo las condiciones en las cuales el agua presente después de la combustión permanece como vapor y, al no ser condensado, su calor latente no es incluido en el valor final del poder calorífico (Boundy, B. et al, 2011). Entre mayor sea el contenido de humedad en una muestra de carbón, mayor será la diferencia entre los valores del HHV y LHV (Trossero, M.A. y Horta Nogueira, L., 2001).

## **1.4 ANÁLISIS PRÓXIMO**

El análisis próximo constituye una serie de pruebas destinadas a medir algunas características que ayudan a predecir el desempeño del carbón, en el momento en que éste sea manipulado y quemado. Las pruebas practicadas están establecidas rigurosamente bajo una serie de condiciones que se pueden encontrar en las normas de la ASTM D3172.



Los resultados del análisis próximo pueden utilizarse para:

- Determinar el rango de carbón (lignito, bituminoso, sub-bituminoso o antracita).
- Indicar la razón entre sus contribuyentes combustibles y no combustibles.
- Suministrar la base para su compra y venta.

**1.4.1 Parámetros determinados en el Análisis Próximo.** Son cuatro las características medidas por el análisis próximo: Humedad, Materia Volátil, Carbono Fijo y Ceniza; se usarán sus siglas en inglés por conveniencia.

*Humedad (M, por su nombre Moisture en inglés).* Es un constituyente que puede definirse como “indeseable”, ya que su presencia disminuye el Poder Calorífico y su aporte en peso en la composición del carbón aumenta los costos de transporte. El contenido de humedad varía en un rango que va desde el 5% al 70%, dependiendo del tipo de carbón, estando presente en la mayoría de carbones, debido a su procedencia del suelo. Es un factor determinante en contratos de compraventa, en evaluación y control de procesos industriales, así como una condición favorable cuando de manejo y pulverización del carbón se trata.

*Materias volátiles (VM, Volatile Matter por su nombre en inglés).* Con los procesos de secado destinados a remover el contenido de humedad de muestras de carbón, se obtiene una pérdida de peso adicional a la de la Humedad. Dicho material extraído es conocido como Materia Volátil. Debido a esto, el porcentaje de Materia Volátil se mide en ausencia de humedad y ceniza. El rango en el cual oscila este parámetro va desde 2% hasta el 50%, dependiendo de las propiedades de la muestra de carbón a la que se le esté realizando la prueba.

La presencia de altos contenidos de Materia Volátil en el carbón se refleja en muestras fáciles y con una mayor rapidez para quemarse si se comparan con muestras con un menor contenido y una amplia variabilidad en los porcentajes de Materia Volátil. Los valores del poder calorífico son influenciados por ésta variación, generalmente se observa que a mayores porcentajes de Materia Volátil, el Poder Calorífico será menor.

*Carbono fijo (FC, Fixed Carbon por su nombre en inglés).* En las pruebas de Análisis Próximo, una vez se ha removido el contenido de Humedad y Materia Volátil, la sustancia de color negro que permanece, o que no se vaporizó, se llama Carbono Fijo. Su porcentaje en peso puede oscilar en un rango superior al 25%, hasta llegar a valores altos aproximados al 98%.

Algunas características evidencian el contenido de Carbono Fijo. Muestras con altas concentraciones (las antracitas, por ejemplo), pueden ser difíciles de incinerar, pero el tiempo de combustión es más largo respecto a ejemplares con condiciones contrarias.

*Ceniza (A, Ash por su nombre en inglés).* Es el residuo no combustible, conformado por materia inorgánica que el carbón obtiene durante su proceso de formación sedimentaria. Algunos componentes de las cenizas son la caliza, hierro, aluminio, sílice y otro tipo de elementos en concentraciones por debajo de las 1000 ppm (zinc, cobre, boro, arsénico) (Bowen, B.H. e Irwin, M.W., 2008). La presencia de este tipo de minerales es indeseable y a mayores cantidades de ceniza producida en la combustión del carbón, peor será la calidad del combustible. La presencia de minerales puede aprovecharse en algunos casos para extraerlos, pero también implican la generación de gases tóxicos durante la incineración del carbón.

**1.4.2 Tipos de carbón.** El rango del carbón está determinado de acuerdo al tiempo de formación y a las condiciones de presión y temperatura bajo las cuales se ha sometido a lo largo de dicho tiempo. El proceso mediante el cual se cambia desde la primera etapa (turba) hasta llegar a los de mejor rango (antracitas), se conoce como carbonificación.

Los depósitos más jóvenes están conformados por la materia vegetal parcialmente descompuesta, que ha sufrido una transformación física y química para convertirse en *turba*. La turba es el estado inicial en el proceso de carbonificación y se caracteriza por sus altos contenidos de humedad y bajos contenidos de carbono fijo (Gonzalez Roman, F., et al., 2009)

Los *lignitos* son una variedad de carbón, de calidad intermedia, que se encuentran entre un estado de transición entre la turba y los sub-bituminosos. Su aspecto es similar al de la madera y tienen contenidos altos de humedad, así como de materia mineral y de material volátil, lo cual hace que posean un bajo poder calorífico (UPME, 2012).

Con el aumento del tiempo y la influencia de las condiciones presión-temperatura, los lignitos pierden su estructura leñosa y un gran porcentaje de la humedad que varía entre un 17% y 20% (Buelna Quijada, G., 1995). Este tipo de carbones se conocen como *sub-bituminosos*, que aún se incluyen entre los carbones de baja calidad por su menor poder calorífico comparado con los carbones bituminosos, debido a una baja composición en carbono (entre 35% y 45%) y a que tiene un elevado contenido de material volátil (UPME, 2005). Para el caso de los carbones *bituminosos*, en ésta fase del ciclo, han adquirido mayor dureza debido al aumento

del porcentaje de carbono fijo y a la disminución de parámetros como la humedad y la materia volátil, por lo que se consideran de alta calidad.

Finalmente, los carbones de la mejor calidad son llamados *antracitas*, caracterizados por su alto contenido de carbono (86% al 98%), bajo contenido de materia volátil y poder calorífico superior a 32.6 MJ/Kg (14.000 BTU/lb). Aunque se inflama con más dificultad que otros carbones, la antracita libera una gran cantidad de energía al quemarse y desprende poco humo y hollín. Se usa como combustible en generación de calor o vapor en la industria térmica, también se usa en la fabricación de goma sintética, colorantes y purificación de agua para consumo humano (filtros) (UPME, 2005).

De acuerdo a la norma ASTM D388, la clasificación se hace acorde al porcentaje de carbono fijo y al valor del poder calorífico superior calculado en base libre de humedad y materia mineral. Los carbones de alto rango se clasifican a partir del carbono fijo en base seca; los de bajo rango se clasifican de acuerdo a su poder calorífico superior en base húmeda (ASTM D388, 2012). La clasificación de acuerdo a la norma ASTM D388, se presenta en la tabla 1:

Tabla 1. Clasificación de los carbones (*Fuente: UPME, 2012*).

| Tipo            | Carbono Fijo (%) | Materia Volátil (%) | Humedad (%) | Poder Calorífico (Btu/lb) | Poder Calorífico (MJ/Kg) | Poder Calorífico (Kcal/Kg) |
|-----------------|------------------|---------------------|-------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Antracita       | 86 - 98          | 1                   | < 15        | > 14.000                  | > 32,6                   | > 7.780                    |
| Bituminoso      | 45 - 86          | 32                  | 15 – 20     | 10.500 – 14.000           | 24,5 – 32,6              | 5.800 – 7.780              |
| Sub-bituminoso  | 35 - 45          | 50                  | 20 – 30     | 7.800 – 10.500            | 18,2 – 24,5              | 4.300 – 7.780              |
| Lignito y Turba | 25 - 35          | 96                  | > 30        | 4.000 – 7.800             | 9,3 – 18,2               | 2.200 – 4.300              |

**1.4.3 El carbón en Colombia.** En el contexto latinoamericano, Colombia es el país con las mayores reservas de carbón suficientes para abastecer el mercado interno y participar, a gran escala, en el mercado internacional por más de 90 años. Colombia cuenta con recursos potenciales de 16.436 millones de toneladas (Mt), de los cuales 6.508 Mt son medidas (a diciembre de 2011), 4.571 Mt son indicadas, 4.237 Mt son inferidas y 1.1209 Mt son recursos hipotéticos (UPME, 2012).

La gran importancia del sector carbonífero en la economía nacional, se debe a que representa aproximadamente la mitad de la actividad minera del país y alrededor del 2% del producto interno bruto, ubicándose como el segundo producto de exportación nacional con proyecciones para alcanzar las exportaciones de petróleo, principal producto de la industria colombiana. Todo esto, es gracias a las grandes inversiones que se realizaron en la década de los 80 para incrementar la producción de carbón térmico en el país (UPME, 2012).

Las reservas de carbón se encuentran distribuidas en las tres cordilleras: Oriental, Central y Occidental. La zona norte del país es la región con las mayores reservas, específicamente en los departamentos del Cesar y La Guajira; éste último departamento corresponde a la zona donde se encuentra localizada la mina más grande, conocida como El Cerrejón y sobre la cual se extrae la mayor parte del carbón producido en el país. El Cerrejón es la mina a cielo abierto más grande del mundo, con un potencial de recursos estimado alrededor de los 3 billones de toneladas métricas (Tewalt, S.J., et al., 2006).

El 95% de las reservas se ubica en los departamentos de La Guajira, Cesar, Córdoba, Norte de Santander, Cundinamarca, Boyacá, Antioquia, Valle del Cauca y Cauca.

**1.4.4 Calidades del Carbón Colombiano.** El carbón producido en Colombia se conoce por ser de buena calidad, con unas reservas suficientes para participar en el mercado global por largo tiempo. Generalmente, el carbón producido es de tipo bituminoso y sub-bituminoso, aunque es destacable la presencia de yacimientos de carbón de tipo antracítico.

El carbón colombiano se caracteriza por tener bajos contenidos de humedad y, por lo tanto, altos valores de poder calorífico. Igualmente, el porcentaje de generación de ceniza varía en un rango del 2 – 21%, pero la gran mayoría presentan un porcentaje en peso bajo (alrededor del 6% promedio). También es destacable la baja presencia de azufre en la composición del carbón colombiano, lo que le brinda el beneficio de ser menos contaminante y de fácil incineración.

En Colombia, el carbón bituminoso de mejor calidad se encuentra ubicado en la cordillera Oriental, siendo adecuado para el uso térmico y metalúrgico. Los carbones de tipo antracítico también pueden encontrarse y están destinados al consumo interno y a la exportación. En la región correspondiente a la cordillera Occidental, son los carbones de tipo bituminoso y sub-bituminoso los que predominan, específicamente en regiones como la de Antioquia, Valle del Cauca y Cauca. Finalmente, para la región que abarca a la cordillera Central, se encuentra yacimientos de carbón tipo bituminoso, especialmente en zonas carboníferas como la de Antioquia y el Eje cafetero (Departamento de Caldas), y en menor medida en regiones como el Huila y Tolima.

## **1.5 ANÁLISIS DE REGRESIÓN**

El análisis de regresión es un método estadístico que permite estimar la relación entre un conjunto de variables independientes y una variable dependiente (variable respuesta). Existen dentro de éste campo diversas técnicas para el modelado y análisis en la relación entre una variable dependiente y una o más variables independientes, siendo el método de mínimos cuadrados el más conocido.

La forma más temprana de regresión fue justamente el método de mínimos cuadrados, el cual fue publicado por Legendre en 1805 y por Gauss en 1809 (Legendre, A.M, 1805; Gauss, C.F., 1809). Tanto Legendre como Gauss aplicaron el método al problema de determinar, desde observaciones astronómicas, las orbitas de cuerpos alrededor del sol. Gauss publicó un desarrollo más profundo de la teoría de mínimos cuadrados en 1821 (Gauss C.F, 1821)

El análisis de regresión es una técnica que puede usarse en diferentes ámbitos de estudio, pero en general se puede decir que en cualquier sistema en el cual cantidades cambian, es de interés examinar el efecto que alguna variable ejerce (o aparenta ejercer) sobre otras. Puede haber de hecho, una relación funcional simple entre variables; en la mayoría de los casos esta parece ser la excepción más que la regla. A menudo existe una relación que es muy complicada para comprender o describir en términos simples. En este caso, podemos desear aproximar a esta relación funcional por medio de alguna función matemática simple, como una polinomial, la cual contiene las variables apropiadas y la cual se puede graduar o aproximar a la verdadera función en unos rangos limitados para las variables involucradas.

Incluso donde no haya una relación física sensible entre variables, se puede desear relacionarlas por algún tipo de ecuación matemática. Mientras que la

ecuación pueda parecer sin significado físico, puede, sin embargo, ser extremadamente valiosa para predecir los valores de algunas variables conociendo las otras, tal vez bajo ciertas condiciones específicas (Draper, S., 1998).

Las aplicaciones que se le dan a los análisis de regresión ocurren en casi todos los campos del conocimiento, tanto en ingeniería, química, física, ciencias económicas, biológicas y de la salud, como también ciencias sociales. El análisis de regresión ayuda a entender cómo cambia el valor de la variable dependiente cuando cualquiera de las variables independientes toma diferentes valores; en últimas, el objetivo es estimar una función a partir de las variables independientes, llamándose de esta manera, función de regresión, y permite predecir los valores que podrá tomar la variable dependiente a partir de los valores que asuman las variables independientes.

Los análisis de regresión también se usan para identificar cuál de las variables independientes tienen un efecto o están relacionadas con la dependiente, lo que es importante para simplificar modelos que pueden permanecer dentro del límite de tolerancia de precisión con la menor cantidad de parámetros y variables posibles. Su utilidad se puede resumir en la descripción de datos, donde continuamente se usan ecuaciones para resumir un conjunto de datos, en la estimación de parámetros y para la predicción y estimación de fenómenos.

Los modelos o tipos de regresión, pueden clasificarse en dos grupos generales: la *regresión lineal* y la *regresión no lineal*.

**1.5.1 Regresión Lineal.** A menudo, en la práctica, se requiere resolver problemas que incluyen conjuntos de variables cuando se sabe que existen algunas relaciones inherentes entre ellas. Por ejemplo, en una situación industrial se puede saber que el contenido de alquitrán en el flujo saliente de un proceso químico se relaciona con la temperatura de entrada. Puede ser de interés desarrollar un método de predicción: es decir, un procedimiento para estimar el contenido de alquitrán para varios niveles de temperatura de entrada a partir de la información experimental. El aspecto estadístico del problema se convierte entonces en lograr la mejor estimación de la relación entre las variables (Walpole, R., 1998).

En general la regresión lineal es un método que se aproxima a modelar la forma en que se relaciona una variable dependiente escalar  $Y$ , y una o más variables independientes  $X$ . En el caso de haber solo una variable independiente, la regresión se llama Regresión Lineal Simple, para más de una variable independiente, se llama Regresión Lineal Múltiple.

En los modelos lineales, los datos son modelados usando funciones predictoras y los parámetros desconocidos de modelo se hallan a partir de los datos. Éste tipo de regresión, fue el primer tipo de análisis de regresión en usarse y estudiarse con rigor. Esto se debe a que los modelos que dependen linealmente de sus parámetros desconocidos, son más fáciles de resolver que los modelos no lineales.

Los usos o aplicaciones más prácticas de la regresión lineal caen en dos grandes categorías: Dado un modelo que encaje con un grupo de datos Y y X, y dado un nuevo dato de X solamente, se puede predecir Y. El otro uso, es cuantificar la fuerza con que se relaciona una variable independiente X entre un grupo  $X_i$ , con la variable dependiente Y.

La Regresión Lineal Simple es de la forma:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_i X_i + \varepsilon \quad (4)$$

Donde  $\beta_0$  y  $\beta_i$  son llamados los parámetros del modelo y  $\varepsilon$  es una cantidad que representa el incremento por el cual cualquier valor individual de  $Y_i$  puede salirse de la línea de regresión (Draper, S., 1998), es en otras palabras una perturbación aleatoria y es lo que le da su carácter estocástico.

La regresión lineal múltiple, es el caso en que más de una variable independiente se relaciona con la dependiente, y es de la forma:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \beta_3 X_{i3} + \cdots + \beta_p X_{ip} + \varepsilon \quad (5)$$

Para definir el mejor modelo de regresión se realizan pruebas de significancia para cada coeficiente de regresión. Esta prueba permite determinar si se incluye o no, una variable regresora al modelo, dado que su aporte sea significativo, la inclusión de cada variable al modelo implica un aumento en la suma de cuadrados de la regresión y una disminución en la suma de cuadrados del error; el aumento en la suma de cuadrados de la regresión debe ser significativo para que se justifique incluir dicha variable, ya que al incorporar una variable que no debe ser considerada, se puede aumentar la suma de cuadrados del error en el modelo.

Se plantea una hipótesis para probar la significancia de un coeficiente de regresión como

$$H_0 = \beta_j = 0 ;$$

$$H_1 = \beta_j \neq 0 ;$$

Cuando no hay razones para rechazar la hipótesis nula, esto indica que la variable regresora no es significativa al modelo y se puede eliminar.

Prueba estadística para contrastar la hipótesis nula es la prueba t-student, y la hipótesis nula se rechaza si:

$$|t_{\text{calculado}}| > t_{(\alpha/2, n-k-1)}$$

**1.5.2 Regresión No Lineal.** En éste caso, sigue siendo una forma de análisis de regresión, en la cual los datos experimentales se modelan por una función que es una combinación no lineal de los parámetros del modelo, y que dependen de una o más variables independientes. En el caso de la regresión lineal, los modelos considerados son funciones lineales de los parámetros (Rawlings, J.O., et al., 1998). En la Regresión no Lineal, se incluyen varios modelos matemáticos útiles. Los modelos lineales deben ser vistos como una aproximación de primer orden de la verdadera relación entre variables. Es un problema de inferencia, desde el punto de vista estadístico, para un modelo tipo:

$$Y_i = f(x, \theta) \tag{6}$$

Debe cumplirse la condición que  $f$  sea no lineal con respecto a algunos parámetros desconocidos  $\theta$ . El objetivo o idea principal consiste en obtener los valores de estos parámetros asociados con la mejor curva de ajuste, en donde habitualmente se usa el método de mínimos cuadrados. Los modelos no lineales, se usan usualmente, debido a que son más realistas en algún sentido o debido a que la forma funcional del modelo permite a la respuesta ser mejor caracterizada tal vez con menos variables (Rawlings, 1998).

Las regresiones no lineales incluyen funciones tales como las funciones exponenciales, las funciones logarítmicas, las funciones trigonométricas, las funciones de potencias, las funciones Gaussianas y las curvas de Lorenz.



Un ejemplo, podría ser la función de decaimiento exponencial, donde la concentración de una droga en el flujo sanguíneo se mide en diferentes tiempos fijos después de administrarse. La variable de respuesta es la concentración y la independiente es el tiempo. Si se asume que la razón a la cual la droga deja el flujo sanguíneo es proporcional a la concentración promedio de la droga en el flujo sanguíneo en ese momento, la derivada de la concentración con respecto al tiempo sería:

$$\frac{\partial \varepsilon(Y)}{\partial t} = -\beta \varepsilon(Y) \quad (7)$$

Integrando la ecuación e imponiendo la condición que la concentración al inicio es  $\alpha$ :

$$\varepsilon(Y) = \alpha e^{-\beta t} \quad (8)$$

La ecuación de decaimiento exponencial se presenta en la figura 1. También se observa el caso de crecimiento exponencial,

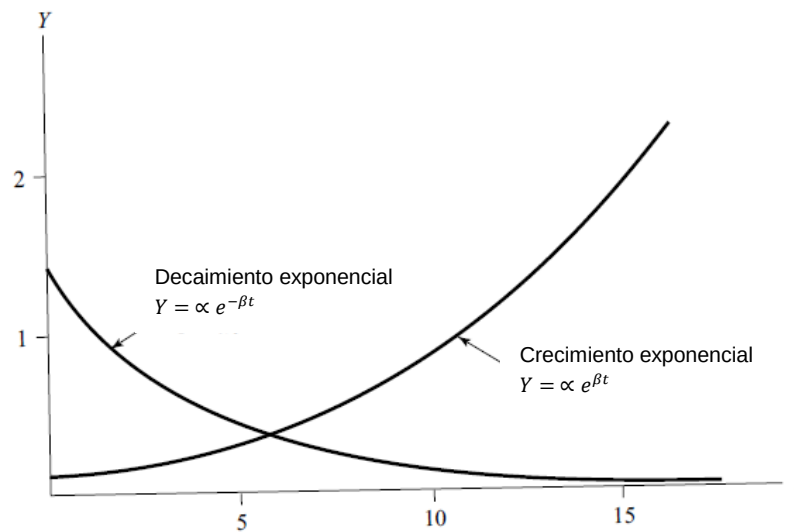


Figura 1. Formas típicas para el modelo de decaimiento exponencial y crecimiento exponencial. (Fuente: RAWLINGS, J.O., et al. (1998) p. 488.)

**1.5.3 Significado de linealidad.** Las clases de funciones más utilizadas en análisis de regresión son las siguientes:

**i) Polinomiales**

**a) Lineales**

$$f(x, a) = a_0 + a_1x \quad (9)$$

**b) Cuadráticas**

$$f(x, a) = a_0 + a_1x + a_2x^2 \quad (10)$$

**c) En general de grado menor o igual a m**

$$f(x, a) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m \quad (11)$$

**ii) Potenciales**

$$f(x, a) = a_0x^{a_1} \quad (12)$$

**iii) Exponenciales**

$$f(x, a) = a_0(a_1)^x \quad (13)$$

**iv) Logarítmicas**

$$f(x, a) = a_0 + a_1 \ln x \quad (14)$$

Para exponer la diferencia entre regresión lineal y no lineal, y aclarar confusiones comunes, es recomendable observar el caso de la regresión polinomial.

$$f(x) = ax^2 + bx + c \quad (15)$$

En este caso,  $f$  no es lineal en función de  $x$ , pero sí lo es en función de los parámetros  $a$ ,  $b$  y  $c$ . A esto se denomina “lineal” dentro del contexto de la regresión estadística. La regresión polinomial es un caso de regresión lineal, es decir, regresión lineal múltiple. Luego, cuando se dice que un modelo es lineal o no lineal, se refiere a linealidad o no linealidad en los parámetros. El valor de la potencia más alta de una variable predictora en el modelo, se llama el orden del modelo. La ecuación 12 es una ecuación lineal de segundo orden (Draper, S., 1998).

La linealización es otro método que se usa para transformar algunos problemas de regresión no lineal en lineales. Sin embargo, debe realizarse con cuidado ya que la influencia de los datos en el modelo cambia.

## 1.6 ESTIMADORES ESTADÍSTICOS

**1.6.1 El coeficiente de determinación ( $R^2$ ).** Representa la proporción de varianza de  $Y$  explicada por las variables implicadas en el modelo de regresión ajustado a los datos ( $X$  en el modelo de regresión lineal simple). En cuanto que es una razón, este coeficiente oscilará siempre entre 0 y 1, de modo que cuanto más próximo sea  $R^2$  a 1, indicará mejor bondad de ajuste del modelo de regresión a la distribución conjunta de las variables. Si  $R^2$  es igual a 1, la distribución de errores es simétrica.

**1.6.2 Suma de Residuales.** Dado un modelo de regresión asociado a un conjunto de variables independientes  $X$ , y una variable dependiente  $Y$ , la predicción del valor de  $Y$  (variable respuesta), definida por los valores de  $X$  determinados por un individuo  $X_i$ , probablemente no será exacta, se asocia a dicha predicción un error. Este error se denomina como error de predicción o residual ( $E_i$ ) y queda definido, por tanto, como la diferencia entre el valor real de un sujeto en la variable  $Y$  ( $Y_i$ ) y su valor predicho según la ecuación de regresión ( $\hat{Y}_i$ ):

$$E_i = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i) \quad (16)$$

**1.6.3 Error promedio absoluto (MAE por sus siglas en inglés).** El error absoluto se define como la diferencia hallada entre cada valor real medido y el valor obtenido a partir del modelo. Se calcula un error absoluto para cada dato, obteniéndose tantos errores como datos se involucren y se llega a una medida de error promedio a partir de ese conjunto de valores de error obtenido.

$$\text{Error Promedio Absoluto} = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i|}{n} \quad (17)$$

Donde n es el número de datos.

**1.6.4 Error promedio absoluto porcentual (MAE% por sus siglas en inglés).** Es una medida que ayuda a observar porcentualmente el error de desviación del valor calculado con respecto al valor real.

$$\text{Error promedio absoluto} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{Y}_i - Y_i}{Y_i} \right| 100\% \quad (18)$$

**1.6.5 Error estándar estimado.** El error estándar es el error asociado a la aleatoriedad del valor en un dato, este es un error dado por la variación aleatoria en un valor al repetir una prueba en las mismas condiciones. Por lo tanto es necesaria una medida de la variabilidad de un valor estimado respecto al valor real. Esta variabilidad se mide en términos de la desviación estándar del estimador, la cual recibe el nombre de error estándar. El error estándar de la estimación mide la dispersión de los valores observados alrededor de la línea de regresión. En este caso P es el número de parámetros o variables dentro del modelo de regresión.

$$\text{Error Estandar Estimado} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - p}} \quad (19)$$

**1.6.6 Suma de cuadrados del error (SSE por sus siglas en inglés).** El método de SSE permite evaluar la magnitud de los errores de predicción. Se constituye como el método más popular a la hora de estimar los coeficientes de la ecuación de regresión. Así, para este método, conocido como método de los

mínimos cuadrados ordinarios, la mejor recta de regresión, de entre todas las posibles, será aquélla para la que la SSE sea mínima

$$SSE = \sum_{i=1}^n E_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (20)$$

## 1.7 AJUSTE DE CURVAS

Para poder determinar los parámetros que mejor se ajusten al modelo, se usa habitualmente el método de mínimos cuadrados, en el cual se busca minimizar la suma cuadrada de los residuos, siendo los residuos, la diferencia entre los datos experimentales y los datos arrojados por la función elegida. Existen otros métodos de análisis numéricos enmarcados dentro la optimización matemática, que si bien son útiles en casos específicos, no encajan dentro del alcance del presente proyecto.

El método general más usado para ajuste de curvas es el de mínimos cuadrados, tanto para regresiones lineales, como para no lineales, donde la principal diferencia radica en que para la regresión no lineal se requiere un proceso iterativo, mientras tanto, para la regresión lineal se pueden usar métodos directos.

Entre los diferentes métodos de estimación, se encuentran las diferentes variaciones del método de mínimos cuadrados, como lo son: mínimos cuadrados ordinarios, generalizados, por porcentaje, entre otros; y alternativas como lo son la regresión lineal bayesiana o el estimador de Theil-Sen

Existen a su vez algoritmos para resolver regresiones no lineales. Estos algoritmos fueron necesarios debido a que hacía falta conocer los valores iniciales adecuados para comenzar el proceso iterativo sin riesgo excesivo de caer en divergencia. El más importante de ellos es el de Levenberg-Marquardt.

## 2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Los datos utilizados para el desarrollo del proyecto se tomaron de los resultados de pruebas de análisis próximo y del poder calorífico superior recopilados en el Laboratorio de Combustión y Combustibles de la Universidad del Valle. Las muestras de carbón provienen de diversas regiones de Colombia.

Los carbones utilizados en el presente estudio fueron analizados entre los años 2008 a 2012, recopilándose la información para un total de 959 muestras. Para este propósito, 801 datos se analizaron para el desarrollo de las correlaciones, mientras que 158 se aplicaron en la validación de las mejores correlaciones.

Se tomaron como variables de entrada independientes la humedad (M), ceniza (A), materia volátil (VM) y carbono fijo (FC), mientras que la variable dependiente o de respuesta fue el poder calorífico superior (HHV).

En el presente estudio, se utilizó la misma estructura de modelos realizada por Akkaya 2009, para encontrar correlaciones entre el poder calorífico superior (HHV) y las variables independientes ya establecidas usando muestras de carbón colombiano.

Cada estructura de modelos involucró diferentes configuraciones basadas en las posibles combinaciones de las variables independientes. La tabla 2 muestra las estructuras y sub-estructuras consideradas en el desarrollo de este estudio. El primer caso consistió en modelos con dos variables de entrada por ejemplo:  $HHV = f(M, A)$  o  $HHV = f(VM, FC)$ , mientras que en el segundo caso los modelos utilizaron tres variables tales como  $HHV = f(M, A, VM)$  o  $HHV = f(A, VM, FC)$ . El último caso correspondió a un modelo con cuatro variables,  $HHV = f(A, M, VM, FC)$ .

Tabla 2. Estructura de los modelos basada en el número y combinaciones de las variables independientes (Fuente: AKKAYA, (2009) p. 167)

| NOMBRES Y ABREVIATURAS DE LOS MODELOS          | VARIABLES INDEPENDIENTES |   |    |    |
|------------------------------------------------|--------------------------|---|----|----|
|                                                | M                        | A | VM | FC |
| Modelos de dos variables independientes (2M)   |                          |   |    |    |
| 2M-1                                           |                          | + |    | +  |
| 2M-2                                           | +                        | + |    |    |
| 2M-3                                           | +                        |   |    | +  |
| 2M-4                                           |                          | + | +  |    |
| 2M-5                                           |                          |   | +  | +  |
| 2M-6                                           | +                        |   | +  |    |
| Modelos de tres variables independientes (3M)  |                          |   |    |    |
| 3M-1                                           |                          | + | +  | +  |
| 3M-2                                           | +                        | + |    | +  |
| 3M-3                                           | +                        | + | +  |    |
| 3M-4                                           | +                        |   | +  | +  |
| Modelo de cuatro variables independientes (4M) |                          |   |    |    |
| 4M-1                                           | +                        | + | +  | +  |

La relación lineal o no lineal entre el poder calorífico superior y cada una de las componentes del análisis próximo se evaluó a partir de los datos experimentales de las muestras de carbón organizados en una base de datos, creada con el fin de brindar facilidad para el manejo de la información.

Cada una de las variables independientes se graficó respecto al poder calorífico, con el fin de apreciar el comportamiento de sus correlaciones. El comportamiento difuso entre algunas variables independientes, como la humedad y la materia volátil, con respecto al poder calorífico, hizo que fuese necesario utilizar métodos de regresión no lineal, los cuales, en algunos casos, pueden producir mayor precisión al momento de establecer una correlación.

El procedimiento se realizó haciendo uso del software DataFit<sup>1</sup>. Para probar el software, se realizaron pruebas de ingeniería inversa usando ecuaciones

<sup>1</sup> El software especializado denominado DataFit<sup>®</sup> descrito por Akkaya, A.V. (2009), permite realizar ajuste de curvas a datos ingresados por el usuario, así como la representación gráfica de los modelos planteados.

conocidas con datos creados a partir de ellas. El objetivo consistió en ingresar dichos datos y hacer un proceso de regresión en el software con el fin de obtener la correlación original de la cual surgieron los datos. De esta manera, el programa arrojó una lista de ecuaciones ordenadas de acuerdo a su exactitud, basándose en la suma residual de los cuadrados. Sin embargo, la ecuación original, sobre la que se obtuvieron los datos ingresados al programa, quedó en un puesto cercano al veinte (20) en el orden de las correlaciones que calculó el programa. A partir de lo anterior, se entendió el comportamiento del programa, su método de concordancia entre datos y modelos, y su forma de ordenar las ecuaciones según el criterio seleccionado.

Las ecuaciones 21 y 22 son las *funciones merito* usadas por el programa DataFit para la regresión lineal y la no lineal respectivamente.

$$x^2 = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{y_i - \sum_{k=1}^M a_k f_k(x_i)}{\sigma_i} \right\}^2 \quad (21)$$

$$x(a)^2 = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{y_i - y(x_i; a)}{\sigma_i} \right\}^2 \quad (22)$$

Donde,  $\sum_{k=1}^M a_k f_k(x_i)$  representa la forma general de un modelo de regresión lineal por mínimos cuadrados y el término  $y(x_i; a)$  la representación de un modelo no lineal.

El principio básico tras el Análisis de Regresión fue escoger un método de medición de concordancia entre los datos y un modelo de regresión con una selección particular de variables. Esta medida de concordancia se llama *Función Merito* y está acomodada de tal manera que valores pequeños de ésta representan una concordancia cercana entre los datos recolectados y el modelo de regresión. Las variables se ajustan iterativamente (en el caso de la regresión no lineal) para así minimizar la *Función Merito*. Una vez que la Función Merito ha sido minimizada es posible determinar que tan bien el modelo describe los datos.

Dados los resultados obtenidos haciendo uso de DataFit también se usó otro programa conocido como "R", un paquete estadístico que contiene herramientas para analizar datos y generar gráficos. Es un software programable para generar todos los posibles modelos de regresión haciendo combinaciones de las distintas variables, corroborando los resultados obtenidos con DataFit. Igualmente,



haciendo uso de este programa se evaluó la significancia de cada variable al modelo seleccionado y la significancia del modelo completo. El software R permite determinar el mejor modelo mediante el método de regresión **Stepwise**, presente en el paquete R. Dicho método se utilizó para constatar el mejor modelo que predice el poder calorífico del carbón mediante las variables en estudio.

La evaluación y la determinación de los mejores modelos resultantes de la ejecución del software DataFit para cada tipo de estructura (2M, 3M y 4M), se realizó a través de los siguientes criterios: error promedio absoluto (MAE), error promedio absoluto porcentual (MAE%), error estándar del estimado (SEE) y la suma de cuadrados del error (SSE).

A través de éstos criterios de selección, los valores de los residuales fueron iguales a partir de los modelos con tres variables. Por lo tanto, se seleccionó el mejor modelo usando un método paso a paso alternativo, aprovechando el Software R, que incluye dentro de su paquete el método de regresión **Stepwise**. El método de **Stepwise**, usa el criterio del AIC<sup>2</sup> para definir la variable que debe ser incluida en el modelo, el menor AIC define la mejor variable a incluir. AIC mide la desviación del modelo con la realidad, por lo que cuanto menor es el valor, más plausible es el modelo (Seoane, 2013). De esta manera, se seleccionaron los mejores modelos para predecir el poder calorífico del carbón a través de las variables en estudio.

Obtenidos los mejores modelos de regresión de cada sub estructura, se determinó el coeficiente de determinación  $R^2$  de la variable predicha con respecto a la real. Éste criterio permitió determinar qué tan ajustados se encuentran los datos al modelo encontrado.

---

<sup>2</sup> Criterio de Información de Akaike (AIC): Este criterio permite evaluar la bondad de ajuste del modelo a los datos. Este criterio se usa para seleccionar el mejor modelo en un conjunto de ellos.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo, se presentan los resultados de las correlaciones de las variables independientes respecto a la variable dependiente obtenidas mediante la ejecución del programa DataFit y seleccionadas por medio de los estimadores estadísticos usados para determinar las correlaciones con mejor ajuste. Una vez determinada la ecuación que mejor predice el valor del poder calorífico, se presenta el desempeño de dicho modelo, graficando una serie de datos (159), no incluidos en el desarrollo de la correlación, con el fin de validar el modelo.

#### 3.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

Los datos utilizados para el desarrollo de este proyecto se presentan en la Tabla 7 adjunta en los anexos. Inicialmente se realizó un análisis estadístico simple con los datos obtenidos para cada una de los parámetros de interés (M, A, FC, VM y HHV) correspondientes a las 961 muestras recopiladas. Los resultados de este análisis estadístico se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Estadística descriptiva de los datos usados para modelar el poder calorífico del Carbón

| VARIABLES                 | ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LAS VARIABLES |        |       |          |                     |
|---------------------------|------------------------------------------|--------|-------|----------|---------------------|
|                           | Máximo                                   | Mínimo | Rango | Promedio | Desviación Estándar |
| <b>Independientes</b>     |                                          |        |       |          |                     |
| Humedad (%)               | 23.6                                     | 0.5    | 23.1  | 4.92     | 3.1                 |
| Ceniza (%)                | 49.7                                     | 0.2    | 49.5  | 20.4     | 9.7                 |
| Materia Volátil (%)       | 73.4                                     | 3.1    | 70.3  | 33.2     | 7.7                 |
| Carbono Fijo (%)          | 86.6                                     | 10.5   | 76.1  | 41.5     | 10.4                |
| <b>Dependiente</b>        |                                          |        |       |          |                     |
| Poder Calorífico (BTU/Lb) | 15785                                    | 4809   | 10976 | 10454.2  | 1854.8              |

Como se observa en la Tabla 3, el parámetro con el valor promedio más bajo es la Humedad (4,92%). La desviación estándar para esta variable indica que la mayor cantidad de datos se ajustan o están cercanos al 5% (promedio) y sus valores son similares entre todas las muestras, encontrándose un bajo porcentaje de humedad

en todos los casos. Para el caso de la Ceniza, los resultados oscilan alrededor del 20%. Los porcentajes de Carbono Fijo y Materia Volátil, generalmente oscilan en rangos más altos que los porcentajes de Ceniza y Humedad (Radovic, L.R. y Schobert, H.H., 1992). La mayor variabilidad se presenta entre los porcentajes de Carbono Fijo, cuyos valores oscilan entre porcentajes mayores al 80% y cercanos al 10% en el límite inferior, pero la mayoría se mantienen cercanos al 40%.

Teniendo en cuenta la Tabla 1, acorde con la clasificación por rangos de la norma ASTM D388, 2012 y con base en los valores promedio del poder calorífico, la materia volátil y el carbono fijo, resumidos en la Tabla 3, se puede inferir de manera general que las muestras evaluadas y recopiladas pueden incluirse dentro de los rangos del tipo bituminoso y, la mayor parte, en los de tipo subbituminoso, acordes con la clasificación general que da el estudio realizado por el Ministerio de Minas y Energía de la Republica de Colombia, que clasifica a los carbones colombianos como de tipo bituminoso y subbituminoso, en su gran mayoría (UPME, 2014).

### **3.2 CORRELACIONES ENTRE EL PODER CALORÍFICO Y LOS PARÁMETROS DEL ANÁLISIS PRÓXIMO**

Como se expuso en la sección 2, los parámetros Humedad (M), Ceniza (A), Materia Volátil (VM) y Carbono Fijo (FC), se toman como las variables independientes y el Poder Calorífico Superior (HHV) como la variable dependiente o de respuesta.

En las Figuras 2 a 5 se presentan las gráficas de los valores experimentales de HHV en función de cada uno de los parámetros del análisis próximo.

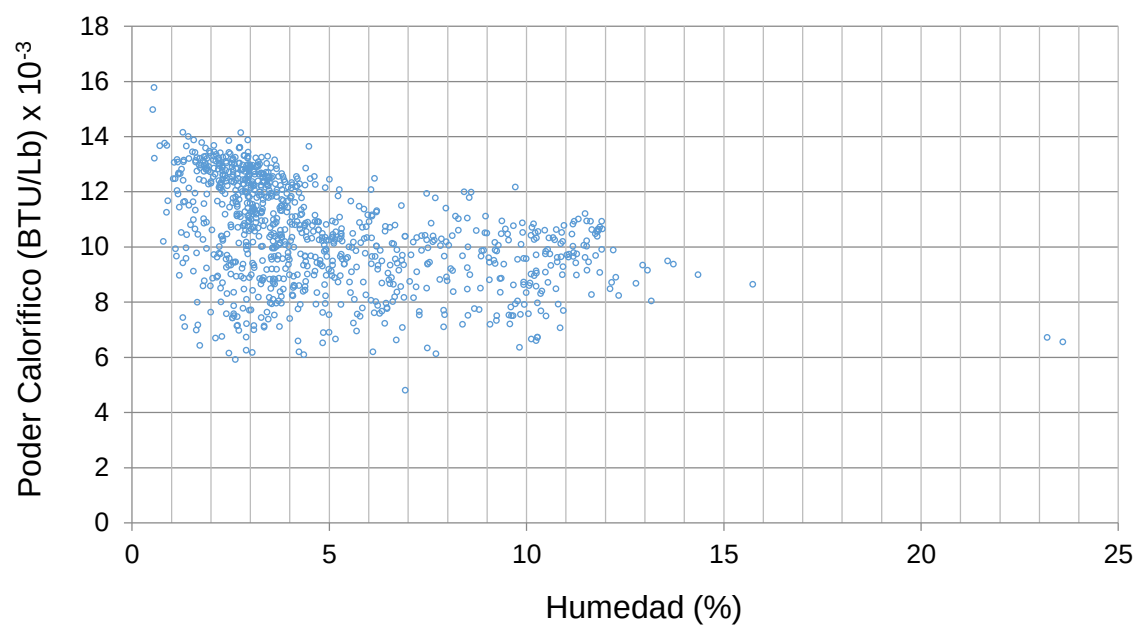


Figura 2. M vs. HHV de las muestras.

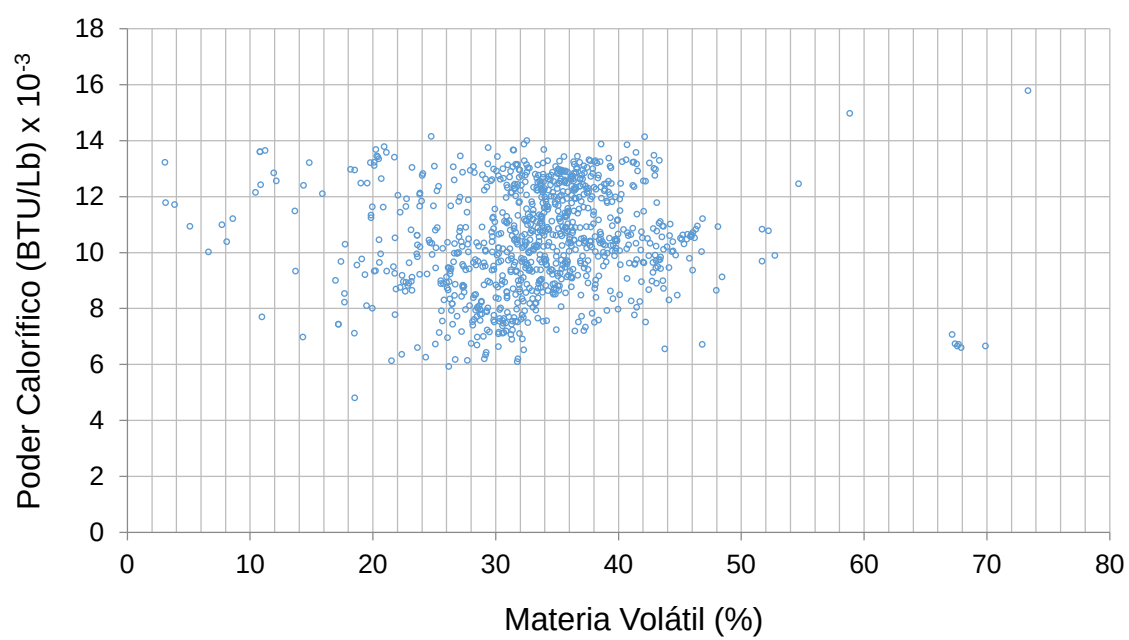


Figura 3. VM vs. HHV de las muestras.

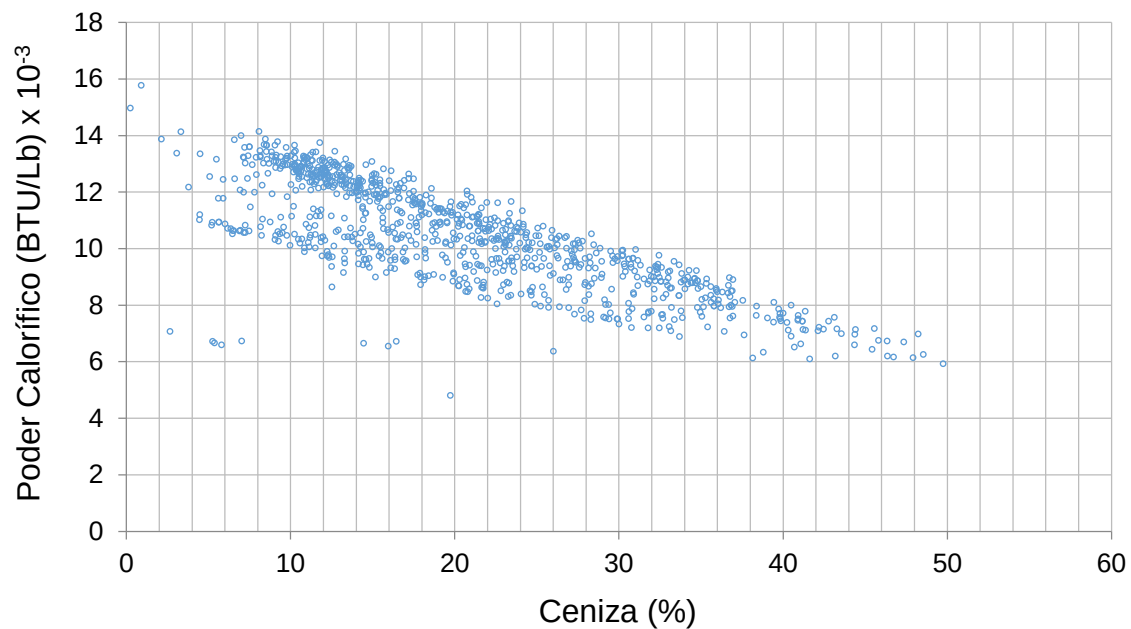


Figura 4. A vs. HHV de las muestras

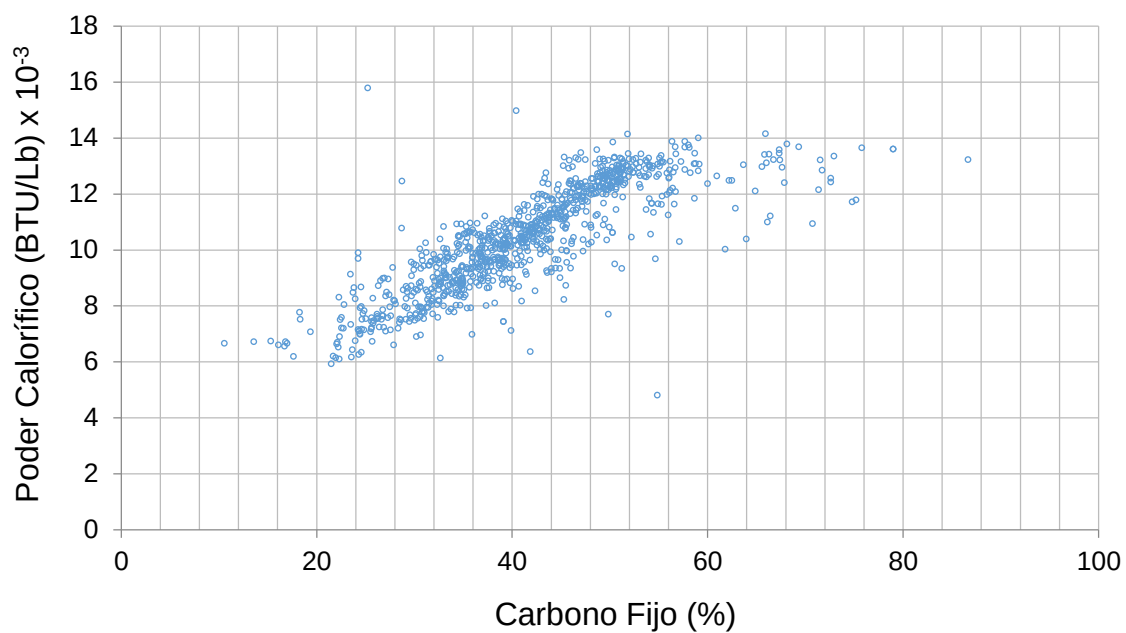


Figura 5. FC vs. HHV de las muestras.

De acuerdo con los resultados presentados en las Figuras 2 a 5, se observa en la Figura 4 que existe una correlación acentuada entre el poder calorífico y la ceniza generada. Los valores mayores de ceniza influyen en la disminución del Poder Calorífico de las muestras de carbón. Akkaya (2009) encontró que la correlación entre el poder calorífico y la ceniza no mostró ningún tipo de tendencia para muestras de carbones provenientes de Turquía (de diferentes propiedades que las colombianas), por lo que menciona la dependencia no lineal entre estos dos parámetros. En nuestro caso, para los ejemplares de carbón colombiano, la influencia del porcentaje de ceniza es de efecto considerable sobre el poder calorífico y es determinante para definir la calidad del carbón.

Otra fuerte correlación que se observó se presenta entre el carbono fijo y el poder calorífico (Figura 5). La tendencia entre estos dos parámetros está relacionada con el tipo de carbón y con las características que identifican el rango al que las muestras pertenecen. Estas muestras con valores mínimos de humedad y bajos porcentajes de ceniza, han pasado en su proceso de carbonificación por una etapa en la que pierden humedad y adquieren una mayor dureza causada por una mayor concentración del carbono fijo, traduciéndose en valores mayores de poder calorífico.

La Figura 2 no presenta una clara correlación entre los valores de humedad y poder calorífico. Sin embargo, es notorio que la mayoría de los datos se concentran en una zona menor al 5%, donde se identifica que los valores del poder calorífico más altos se dan en esa zona. Akkaya (2009) observó una disminución del poder calorífico con el incremento del porcentaje de humedad, usando rangos de humedad entre el 6% y el 50%. En el caso del presente trabajo, la mayoría de las muestras se concentran en torno a un porcentaje promedio cercano al 5%, por lo que no se puede esperar una tendencia marcada.

Una situación similar a la ceniza ocurre entre la materia volátil y el poder calorífico (Figura 3). La mayor parte de los datos se concentraron en una zona cercana al rango 30- 40%, por lo que no hay una tendencia clara. La mayoría de valores del poder calorífico se ubicaron por encima de los 8000 BTU/Lb.

### **3.3 DESARROLLO DE LOS MODELOS**

De acuerdo a la configuración de las estructuras indicada en la Tabla 2, se definieron un total de 11 modelos: seis modelos de dos variables, cuatro de tres variables y uno con las cuatro variables obtenidas a partir del análisis próximo. Las estructuras de los modelos son los siguientes:

- Estructura 2M: Abarca seis modelos resultantes de las combinaciones posibles entre los parámetros M, A, VM y FC, para formar correlaciones en función de dos variables. Ejemplo:  $HHV=f(M, A)$ .
- Estructura 3M: Incluye cuatro modelos producto de las combinaciones posibles para formar correlaciones en función de tres variables. Ejemplo:  $HHV=f(M, A, VM)$ .
- Estructura 4M: Abarca el último modelo en función de las cuatro variables:  $HHV=f(M, A, VM, FC)$ .

**3.3.1 Obtención de las ecuaciones.** Un total de 801 datos, de los 959 obtenidos se consideraron para el desarrollo de las correlaciones. Siguiendo el orden de cada estructura planteada, acorde con la Tabla 2, se ingresaron los datos al software DataFit.

Por ejemplo, si se toma la sub-estructura 2M-2 ( $HHV= f(M, A)$ ) de la estructura 2M, los datos que se ingresaron al software corresponden a los 801 valores de la Humedad (%M) y Ceniza (%A), con su respectivo Poder Calorífico (HHV en BTU/Lb). De la misma manera funcionó para las otras sub estructuras.

Tabla 4. Ecuaciones obtenidas mediante el software para cada una de las estructuras.

| Estructuras |              | Modelo    |                                        | Suma de residuales   | Error estándar estimado | Suma de cuadrados del residuo |              |
|-------------|--------------|-----------|----------------------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------|
| 2M          | VM, M        | Ec. 1     | $a+bVM+cVM^2+dVM^3+e\ln(M)$            | -1,1E-07             | 1453,7                  | 1682162716,0                  |              |
|             |              | Ec. 2     | $a+bVM+cVM^2+dVM^3+eM$                 | 8,2E-08              | 1491,6                  | 1771001595,0                  |              |
|             |              | Ec. 3     | $a+bVM+cVM^2+dVM^3+e/M$                | 1,2E-06              | 1567,8                  | 1956631911,0                  |              |
|             | VM, FC       | Ec. 1     | $ab^{VM}.FC^c$                         | 1952,7               | 519,8                   | 215629035,6                   |              |
|             |              | Ec. 2     | $a+bVM+cVM^2+dFC+eFC^2$                | 4,6E-09              | 525,2                   | 219549965,2                   |              |
|             |              | Ec. 3     | $a+bVM+cVM^2+dVM^3+eFC$                | -1,7E-06             | 525,2                   | 219568134,4                   |              |
|             | VM, A        | Ec. 1     | $a+bVM+cVM^2+Dvm^3+eA$                 | -2,9E-07             | 887,8                   | 627362248,7                   |              |
|             |              | Ec. 2     | $a+b\ln(VM)+c\ln(VM)^2+d\ln(VM)^3+eA$  | -1,5E-07             | 894,3                   | 636647802,5                   |              |
|             |              | Ec. 3     | $a+VM+cVM^2+dA+A^2$                    | -3,5E-09             | 896,7                   | 639969604,0                   |              |
|             | M, FC        | Ec. 1     | $a+b/M+cFC+dFC^2+eFC^3$                | 2,9E-07              | 980,6                   | 765381289,2                   |              |
|             |              | Ec. 2     | $a+b/M+c\ln(FC)+d\ln(FC)^2+e\ln(FC)^3$ | -6,2E-08             | 982,9                   | 769148421,6                   |              |
|             |              | Ec. 3     | $a+b\ln(M)+c\ln(M)^2+dFC+eFC^2$        | 4,5E-11              | 984,4                   | 771302907,4                   |              |
|             | M, A         | Ec. 1     | $a+b\ln(M)+c\ln(M)^2+dA+eA^2$          | -7,3E-08             | 520,8                   | 215907491,4                   |              |
|             |              | Ec. 2     | $a+bM+cM^2+dA+eA^2$                    | -2,7E-08             | 522,1                   | 217006056,3                   |              |
|             |              | Ec. 3     | $a+bM+c\ln(A)+d\ln(A)^2+e\ln(A)^3$     | -5,8E-08             | 532,7                   | 225910954,9                   |              |
|             | A, FC        | Ec. 1     | $a+bA+cA^2+dFC+eFC^2$                  | -3,7E-10             | 699,3                   | 389282994,0                   |              |
|             |              | Ec. 2     | $a+b\ln(A)+c\ln(A)^2+dFC+eFC^2$        | 1,1E-07              | 702,6                   | 392939561,8                   |              |
|             |              | Ec. 3     | $a+b\ln(A)+cFC+dFC^2+eFC^3$            | -6,7E-06             | 710,8                   | 402166632,2                   |              |
|             | 3M           | VM, M, FC | Ec. 1                                  | $aVM+bM+cFC+d$       | 1,8E-09                 | 502,1                         | 200883612,8  |
|             |              |           | Ec. 2                                  | $\exp(aVM+bM+cFC+d)$ | -1778,5                 | 518,1                         | 213908677,9  |
|             |              |           | Ec. 3                                  | $aVM+bM+cFC$         | -14017,6                | 522,2                         | 217571140,8  |
|             |              | VM, A, M  | Ec. 1                                  | $aVM+bA+cM+d$        | -8,8E-09                | 502,1                         | 200883612,8  |
|             |              |           | Ec. 2                                  | $\exp(aVM+bA+cM+d)$  | 10796,1                 | 524,5                         | 219218502,8  |
|             |              |           | Ec. 3                                  | $aVM+bA+cM$          | 360249,8                | 2785,7                        | 6192723193,0 |
| A, FC, M    |              | Ec. 1     | $aA+bFC+cM+d$                          | -2,5E-09             | 502,1                   | 200883612,8                   |              |
|             |              | Ec. 2     | $\exp(aA+bFC+cM+d)$                    | -1778,5              | 518,1                   | 213908677,9                   |              |
|             |              | Ec. 3     | $aA+bFC+cM$                            | 95513,8              | 1359,7                  | 1475406421,0                  |              |
| VM, A, FC   |              | Ec. 1     | $aVM+bA+cFC+d$                         | 3,4E-10              | 502,1                   | 200883612,8                   |              |
|             |              | Ec. 2     | $\exp(aVM+bA+cFC+d)$                   | 10796,1              | 524,5                   | 219218502,8                   |              |
|             |              | Ec. 3     | $aVM+bA+cFC$                           | -7493,8              | 613,7                   | 300584838,7                   |              |
| 4M          | M, VM, A, FC | Ec. 1     | $aM+bVM+cA+dFC+e$                      | 256,9                | 502,4                   | 200876680,8                   |              |
|             |              | Ec. 2     | $aM+bVM+cA+Dfc$                        | -1,9E-10             | 502,1                   | 200883612,8                   |              |
|             |              | Ec. 3     | $\exp(aM+bVM+cA+dFC+e)$                | -1838,5              | 518,4                   | 213905268,1                   |              |

Las ecuaciones presentadas en la tabla 4 corresponden a las obtenidas del proceso de resolución de las estructuras planteadas, ingresando los datos al software DataFit. Todas las ecuaciones se truncaron a los cinco parámetros a, b, c, d y e. Algunos valores obtenidos a partir de la suma de residuales están muy



alejados del valor ideal que es 0 (por ejemplo para la subestructura 2M (VM, FC) cuyo valor fue de 1952,6555). Esta situación se presenta debido a la naturaleza de la ecuación que, como se mencionó en la sección 1.6.2, es equivalente a la sumatoria de los errores de predicción (entre el valor real y su valor predicho, ver ecuación 16). En estos casos, al no tener sus datos distribuidos de manera simétrica tanto hacia arriba como hacia debajo de la tendencia central (datos reales), sino principalmente hacía un lado (arriba o abajo) de los datos respecto al real, el resultado de la suma de residuales es un número de grandes valores (negativo o positivo). Por este tipo de situaciones, el criterio de selección para obtener las mejores ecuaciones es la suma de cuadrados del residuo, en donde dada la forma de la ecuación, cada sumatoria es siempre positiva y la función de ella es permitir evaluar la magnitud de los errores de predicción

**3.3.2 Pre-selección de las mejores correlaciones.** En la tabla 4 se muestran, para cada sub estructura, los tres primeros modelos seleccionados por el software Datafit que mejor se ajustan a los datos. El criterio de selección se basó en el estadístico de la suma cuadrada de residuos (RSS), de menor a mayor. Por lo tanto, las ecuaciones número 1, son las de menor RSS, mientras que las numero 3, tienen el valor mayor.

Se puede observar que a pesar de que el programa usó modelos no lineales (por ejemplo las funciones exponenciales en el caso de las estructuras con tres variables), ninguno de ellos fue mejor que los modelos lineales disponibles en cuanto a la dependencia del parámetro. Por lo tanto, de los modelos disponibles dentro del programa, los que mejor pudieron modelar los datos, fueron modelos de tipo lineal.

Una situación diferente ocurrió con la estructura de 4 variables independientes 4M. En este punto, no se seleccionó la ecuación con el menor valor del RSS, (la numero 1 ordenada por el software), ya que haciendo una verificación sobre los parámetros a, b, c, d y e, de la ecuación, sus valores son de gran magnitud, no deseable para trabajar cómodamente. Con esta situación, se pasó a verificar la ecuación 2 y, observando que la diferencia entre el estadístico criterio RSS entre las ecuación 1 y 2 no presentaba una diferencia significativa, se seleccionó la segunda, con unos valores para los factores a, b, c, d y e, mucho más cómodos en magnitud para su manejo; el resto de las estructuras no presentó este inconveniente. Todas las correlaciones ofrecidas por el software cuentan con parámetros de fácil manejo.

Las ecuaciones seleccionadas para cada subestructura, están indicadas en la tabla 5.

Tabla 5. Correlaciones que mejor se ajustan a los datos, seleccionadas para cada subestructura modelo.

| ESTRUCTURA MODELO |                  | VARIABLES INDEPENDIENTES |                |                |                | MEJOR ECUACIÓN DEL MODELO ENCONTRADA  |
|-------------------|------------------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------------|
| Estructura        | Sub - Estructura | X <sub>1</sub>           | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | X <sub>4</sub> |                                       |
| 2M                | 2M-1             | A                        | FC             | -              | -              | $a + bA + cA^2 + dFC + eFC^2$         |
|                   | 2M-2             | M                        | A              | -              | -              | $a + b\ln(M) + c\ln(M)^2 + dA + eA^2$ |
|                   | 2M-3             | M                        | FC             | -              | -              | $a + b/M + c*FC + d*FC^2 + eFC^3$     |
|                   | 2M-4             | MV                       | A              | -              | -              | $a + bMV + cMV^2 + d*MV^3 + eA$       |
|                   | 2M-5             | MV                       | FC             | -              | -              | $(ab^{MV})(FC^c)$                     |
|                   | 2M-6             | MV                       | M              | -              | -              | $a + bMV + cMV^2 + dMV^3 + e\ln(M)$   |
| 3M                | 3M-1             | MV                       | A              | FC             | -              | $aMV + bA + cFC + d$                  |
|                   | 3M-2             | A                        | FC             | M              | -              | $aA + bFC + cM + d$                   |
|                   | 3M-3             | MV                       | A              | M              | -              | $aMV + bA + cM + d$                   |
|                   | 3M-4             | MV                       | M              | FC             | -              | $aMV + bM + cFC + d$                  |
| 4M                | 4M-1             | M                        | MV             | A              | FC             | $aM + bMV + cA + dFC$                 |

La tabla 5 resume la forma general de las ecuaciones seleccionadas. La mayoría de las subestructuras se ajustaron a un modelo de dependencia de tipo lineal. Únicamente la ecuación 2M-5 se seleccionó como una de tipo no lineal.

El valor de los términos a, b, c, d y e, no se especifican en la tabla 5 para un mejor entendimiento de las estructuras, pero se obtuvieron a través de la ejecución del software. Es evidente la similitud de las formas generales entre las ecuaciones de las estructuras 3M y 4M. Esta situación se relaciona al hecho de que la cuarta variable es una combinación lineal de las otras, teniendo en cuenta que las 4 variables sumadas resultan en un 100% de la composición de cada una de las muestras de carbón. En las secciones siguientes se le hará énfasis a esta situación.

Las once estructuras definidas se sometieron a un análisis a través de estimadores estadísticos con el fin de seleccionar la correlación con el mejor ajuste para cada una de las estructuras 2M, 3M y 4M.

### 3.3.3 Determinación de la mejor correlación para cada estructura.

Cada una de las correlaciones se analizó con base en el error promedio absoluto (MAE), error promedio absoluto porcentual (MAE%), error estándar del estimado (SEE) y la suma de cuadrados del error (SSE). El resultado de cada uno de estos estimadores estadísticos para cada uno de los once modelos obtenidos y, resumidos en la tabla 5 se presentan en las figuras 6, 7 y 8.

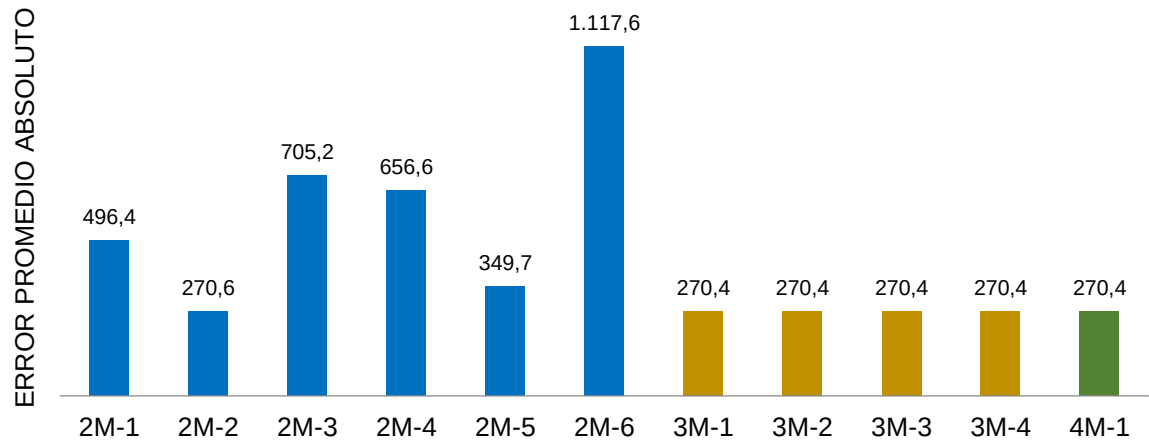


Figura 6. Error Promedio Absoluto (MAE) de las correlaciones

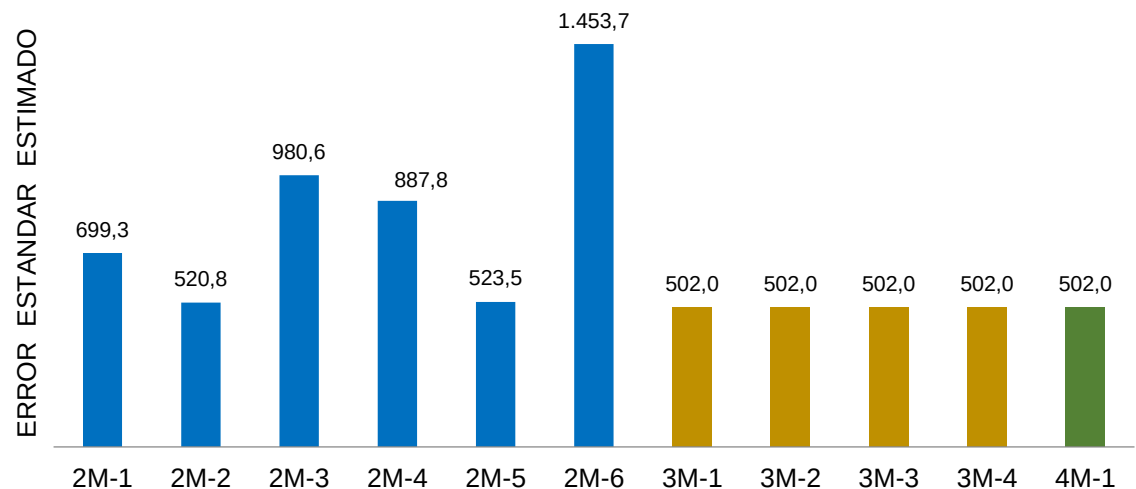


Figura 7. Error Estándar Estimado (SEE) de las correlaciones.

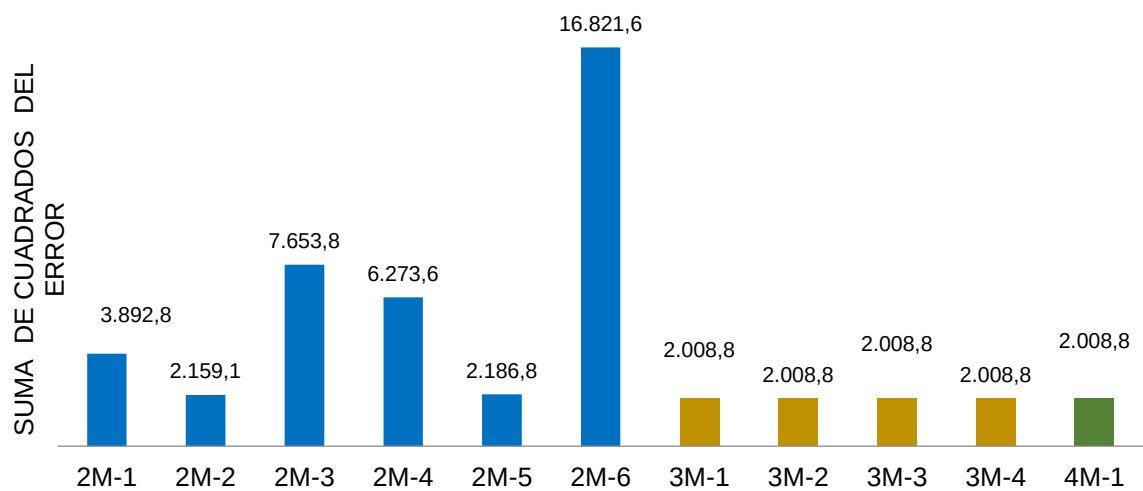


Figura 8. Suma de Cuadrados del Error (SSE)<sup>1</sup> de las correlaciones

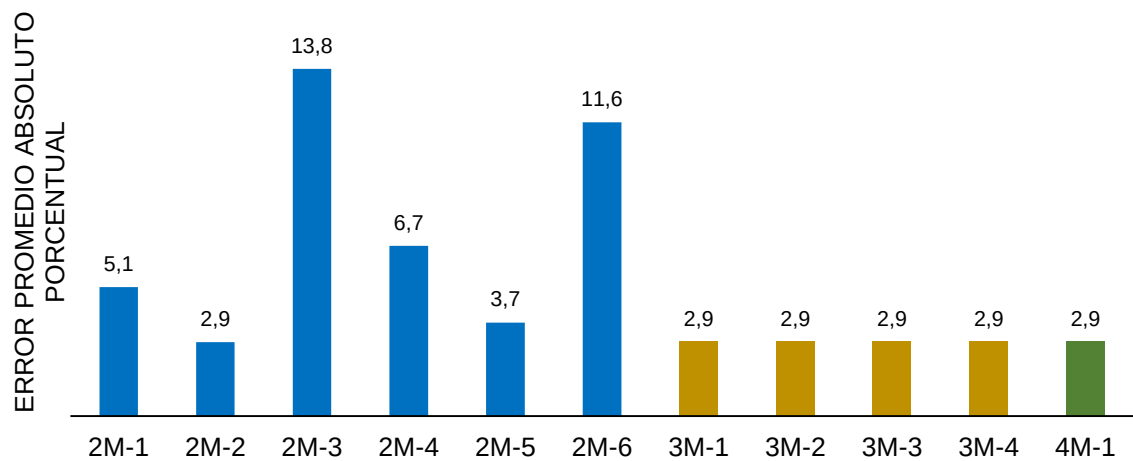


Figura 9. Error Promedio Absoluto Porcentual (MAE%) de las correlaciones.

<sup>1</sup> Se le hizo una reducción en la escala a los valores graficados para el SSE, ya que los obtenidos son de gran magnitud, dificultando el manejo de los datos. Los altos resultados iniciales, se deben a la cantidad de datos que se emplearon para su cálculo.

La elección del mejor modelo para cada una de las estructuras 2M, 3M y 4M, se realizó en base al valor más bajo obtenido de los estimadores estadísticos. En el caso del primer grupo compuesto por modelos de dos variables, la correlación 2M-2, en función de la humedad y la ceniza, presenta el más bajo error promedio absoluto. Comparando con las figuras 7, 8 y 9, la ecuación 2M-2 también presenta el mínimo valor de SEE, SSE y MAE%.

Para la estructura 3M se esperaba obtener un comportamiento en los estimadores estadísticos similar al obtenido a la estructura 2M. Sin embargo, se obtuvo el mismo valor en los cuatro métodos de evaluación para las subestructuras de 3M. Los mismos resultados abarcaron la estructura 4M. De esto se deduce que no existe una diferencia significativa entre los modelos compuestos por más de dos variables. Esto se explica porque las variables independientes (humedad, materia volátil, carbono fijo y ceniza) representan un porcentaje en peso de la composición del carbón. Los cuatro parámetros combinados equivalen a un 100% de una muestra de carbón, por tanto tres variables explican la cuarta variable, sin importar la combinación que de ellas se haga.

Similares resultados se encontraron en el trabajo de Cordero 2001, quien propuso un modelo para predecir el poder calorífico usando variables de análisis próximo en base seca, obteniendo su mejor modelo a través de dos variables independientes y no de tres (materia volátil, carbono fijo y ceniza). Cordero 2001 mostró que la ausencia de la tercera variable se debe a que está incorporada en las restantes.

Con respecto a la magnitud de los valores en cada uno de los estimadores estadísticos mostrados en las figuras 6 a 9, su importancia no radica en su magnitud, sino en la posibilidad de poder compararlos con las demás subestructuras dentro de cada figura. Los altos valores para el criterio SSE, se debe a la cantidad de datos ingresados (801). Los otros estimadores estadísticos como el MAE y el SEE, tienen comportamientos similares ya que en esencia sus fórmulas también lo son. El error promedio absoluto porcentual (MAE%), permite vislumbrar la desviación del modelo propuesto con respecto a los datos. Pero una vez más, esos estimadores estadísticos son una guía para seleccionar los mejores modelos y analizarlos más a fondo.

**3.3.4 Determinación de la mejor correlación para cada estructura a través del método de “Stepwise”.** Dado que los resultados de los estimadores estadísticos son iguales para las estructuras 3M y 4M, se seleccionó el mejor modelo usando el método paso a paso, *Stepwise*, haciendo uso del Software R.

El método *Stepwise* usa el criterio del AIC<sup>1</sup> para definir la variable que debe incluirse en el modelo: el menor valor de AIC define la mejor variable a incluir. Este método es comúnmente usado para hacer predicciones de varias variables independientes de manera que examina la influencia de dichas variables para predecir el valor de la variable dependiente (Freed, M.N., 1991).

La tabla 6, indican los resultados obtenidos a través del método *Stepwise*. En ella se presentan los valores del criterio AIC para cada una de las variables en cada paso.

El método *Stepwise*, parte de un modelo nulo, es decir sin ninguna variable independiente en la ecuación de regresión y se añade como primera de ellas a la que presente un mayor coeficiente de correlación (mayor ajuste correspondiente a un menor AIC) -en valor absoluto- con la variable dependiente, calculándose el valor del AIC al incluir cada variable.

En el paso 1, el menor AIC obtenido corresponde al carbono fijo, por lo tanto es la primera variable incluida al modelo. El carbono fijo es, por lo tanto la variable que presenta una mayor correlación con el poder calorífico superior.

En el segundo paso se incluyeron y se probaron una a una las tres variables restantes y, a través de los cálculos del AIC, se determinó que la segunda variable en incluirse es la materia volátil con el menor valor de AIC. La materia volátil, por lo tanto es la que presenta una mayor correlación parcial con la variable dependiente (poder calorífico superior) con el carbono fijo ya incluido en el modelo, también como variable independiente. Por lo tanto, a través del *Stepwise*, la ecuación 2M-5, en función de la materia volátil y el carbono fijo, sería la que mejor se ajusta a los datos. Sin embargo, vale la pena mencionar que a través del estadístico del error promedio absoluto (MAE) de la figura 6, la subestructura 2M-2, en función de la ceniza y la humedad, fue la seleccionada con base al menor valor de MAE (que a la vez concuerdan con los otros criterios SSE, SEE y MAE%). Si se observan las figuras 6, 7, 8 y 9, la correlación 2M-2 tiene valores más bajos en los criterios estadísticos, pero son muy cercanos a los de la ecuación 2M-5 por lo que, en teoría, los dos modelos se ajustan adecuadamente.

<sup>1</sup>Criterio de Información de Akaike (AIC): Este criterio permite evaluar la bondad de ajuste del modelo a los datos. Este criterio se usa para seleccionar el mejor modelo en un conjunto de ellos.

Tabla 6. Resultados obtenidos por medio del método de selección paso a paso “Stepwise”.

| PASO 0                                                   |              |
|----------------------------------------------------------|--------------|
| Start:                                                   | AIC=12095.94 |
| Poder Calorífico ~ 1                                     |              |
| PASO 1                                                   |              |
|                                                          | AIC          |
| Carbono Fijo                                             | 11211        |
| Ceniza                                                   | 11276        |
| Humedad                                                  | 11934        |
| <none>                                                   | 12096        |
| Materia Volátil                                          | 12097        |
| Step:                                                    |              |
|                                                          | AIC=11210.95 |
| Poder Calorífico ~ Carbono Fijo                          |              |
| PASO 2                                                   |              |
|                                                          | AIC          |
| Materia Volátil                                          | 10223        |
| Ceniza                                                   | 10658        |
| Humedad                                                  | 11210        |
| <none>                                                   | 11211        |
| Carbono Fijo                                             | 12096        |
| Step:                                                    |              |
|                                                          | AIC=10223.18 |
| Poder Calorífico ~ Carbono Fijo + Materia Volátil        |              |
| PASO 3                                                   |              |
|                                                          | AIC          |
| Ceniza                                                   | 9966.3       |
| Humedad                                                  | 9966.3       |
| <none>                                                   | 10223.2      |
| Materia Volátil                                          | 11210.9      |
| Carbono Fijo                                             | 12097        |
| Step:                                                    |              |
|                                                          | AIC=9966.33  |
| Poder Calorífico ~ Carbono Fijo+ Materia Volátil+ Ceniza |              |
| PASO 4                                                   |              |
|                                                          | AIC          |
| <none>                                                   | 9966.3       |
| Ceniza                                                   | 10223.2      |
| Materia Volátil                                          | 10657.5      |
| Carbono Fijo                                             | 11003        |

Se observa que en el paso tres, se probaron las dos variables restantes (humedad y ceniza) y ambas presentan el mismo valor de AIC, lo cual indica que cualquiera de las dos puede incluirse al modelo. Se eligió incluir la ceniza dado que la suma de cuadrados que corresponde a ese modelo en la tabla 4 es más pequeña que la suma de cuadrados que corresponde al modelo que incluye la humedad; en el siguiente paso se corrobora que el AIC obtenido es el menor que se puede obtener. Para esto se prueban las variables incluidas en el modelo, omitiendo la variable humedad que se descarta desde el paso tres, y se verifica que el AIC del modelo obtenido es el más pequeño, por tanto se define este como el mejor modelo.

**3.3.5 Correlaciones seleccionadas.** Las ecuaciones finales seleccionadas de cada sub estructura son la 2M-2, la 3M-1 y la 4M-1, las cuales son dadas con sus respectivos parámetros en las ecuaciones 23, 24 y 25.

- Estructura 2M: Modelo 2M-2

$$HHV = 14780,0579 - 63,9901 * \ln(M) - 565,7525 * \ln(M)^2 - 117,1990 * (A) - 1,0500 * (A)^2 \quad (23)$$

- Estructura 3M: Modelo 3M-1

$$HHV = 266,4842 * (MV) + 121,1410 * (A) + 299,3702 * (FC) - 13304,5646 \quad (24)$$

- Estructura 4M: Modelo único 4M-1

$$HHV = -133,0456 * (M) + 133,4385 * (MV) - 11,9047 * (A) + 166,3246 * (FC) \quad (25)$$

Donde el poder calorífico superior, HHV, está dado en BTU/Lb y las variables independientes Humedad (M), Ceniza (A), Materia Volátil (VM) y Carbono Fijo (FC), están dadas en porcentaje peso (%).

Las Figuras 10, 11 y 12 representan el valor del poder calorífico superior predicho a través de las ecuaciones 2M-2, 3M-1 y 4M-1, versus los valores reales.



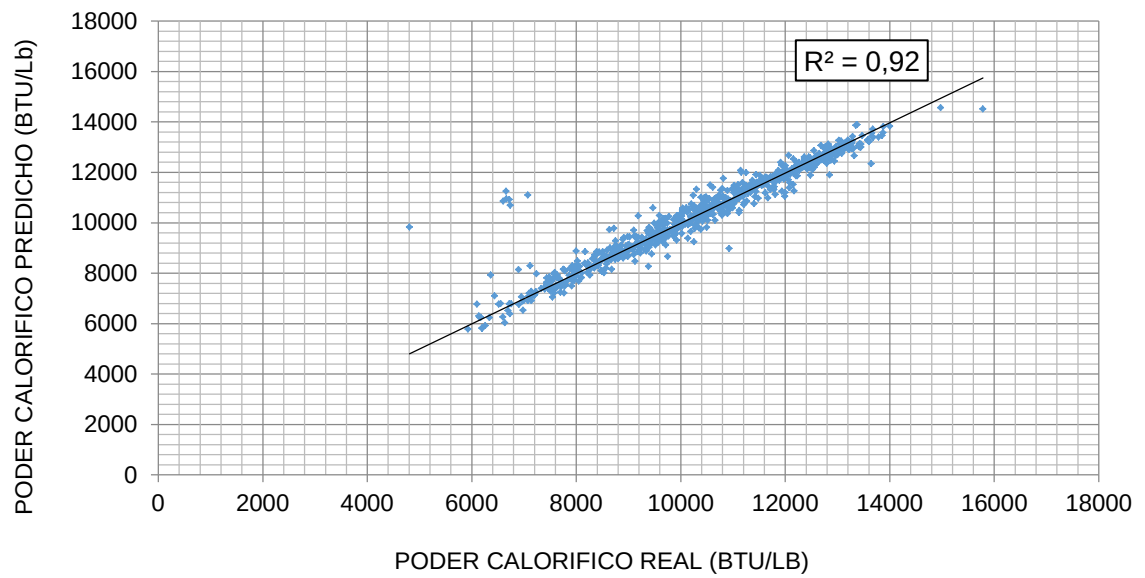


Figura 10. Poder Calorífico Real vs. Poder Calorífico obtenido con modelo de dos variables 2M-2 (Humedad-Ceniza).

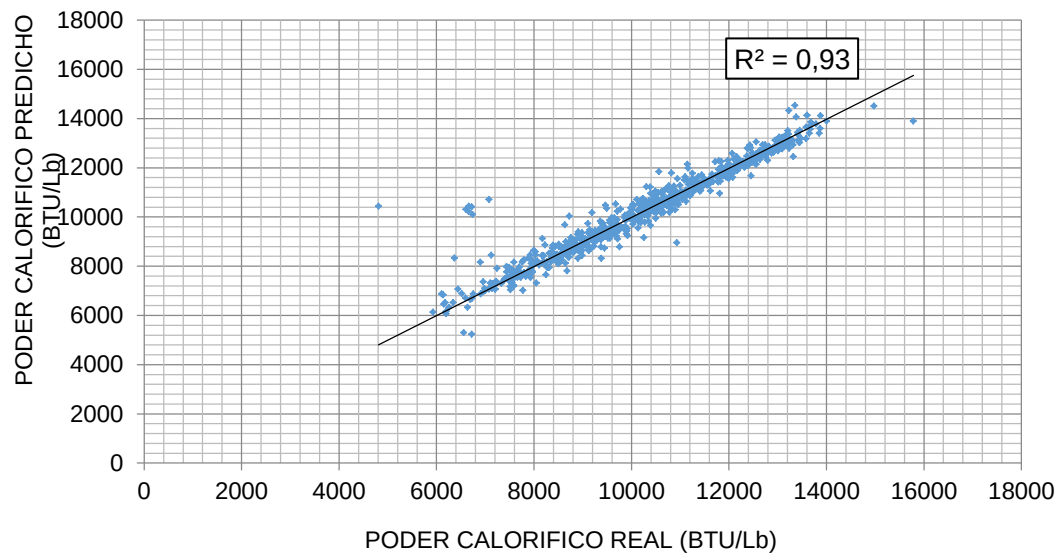


Figura 11. Poder Calorífico Real vs. Poder Calorífico obtenido con modelo de dos variables 3M-4 (Materia Volátil-Humedad-Carbono Fijo).

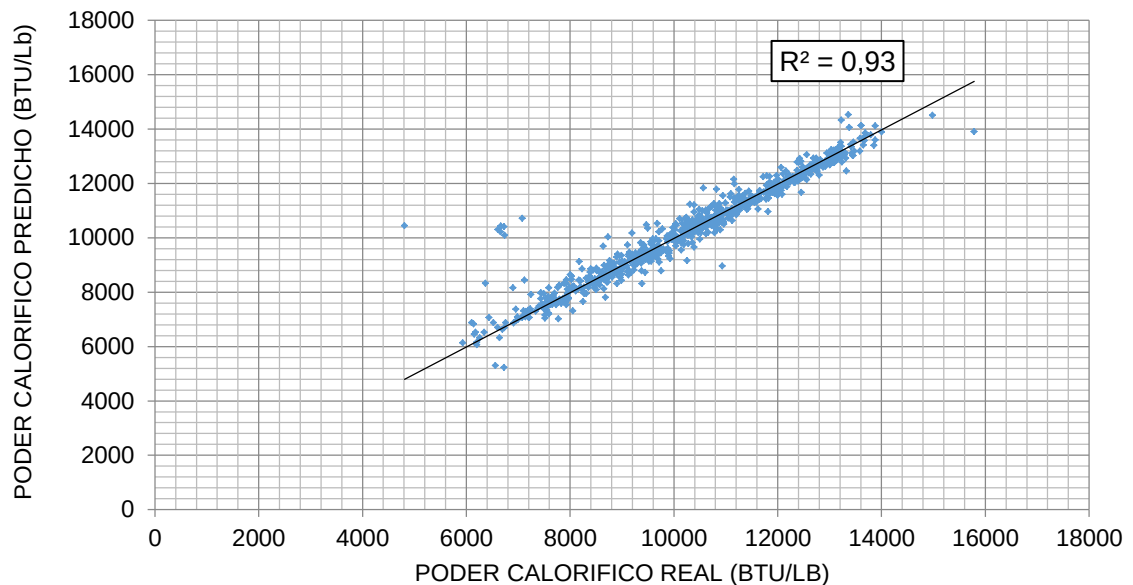


Figura 12. Poder Calorífico Real vs. Poder Calorífico obtenido con modelo de cuatro variables 4M.

De acuerdo a la figura 11, las variables correspondientes a la ecuación 24 (modelo 3M-1) son las que mejor correlación presentan, con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) igual a 0,93. Es importante aclarar que para la ecuación 25 del modelo 4M-1, se obtuvo un valor para el coeficiente de determinación igual al de la correlación 3M-1. Éste resultado indica, como ya se argumentó, que no es necesario la adición de una cuarta variable al modelo predictivo del poder calorífico, ya que la cuarta variable es una combinación lineal de las tres restantes. El valor de  $R^2$  para la ecuación 23 (modelo 2M-2) tiene un valor de 0,9194 y es menor con respecto a los otros parámetros, pero la diferencia no es considerable, por lo tanto sigue siendo una buena correlación.

Con base en los anteriores resultados, se eligió la ecuación 24, en función de la Ceniza, Materia Volátil y Carbono Fijo, como la correlación que mejor se ajusta para la predicción de los valores del poder calorífico superior, además de que ya se aclaró que una cuarta variable no resulta necesaria en el modelo, por lo que no se escoge la función 4M-1, cuyos criterios estadísticos son similares a la de 3M-1.

Finalmente, con el modelo definido, se presenta en la figura 9 una comparación entre los valores de poder calorífico estimados y los valores reales, pero usando 158 datos que no se incluyeron en el desarrollo de las estructuras planteadas y que se estaban reservando para la verificación final.

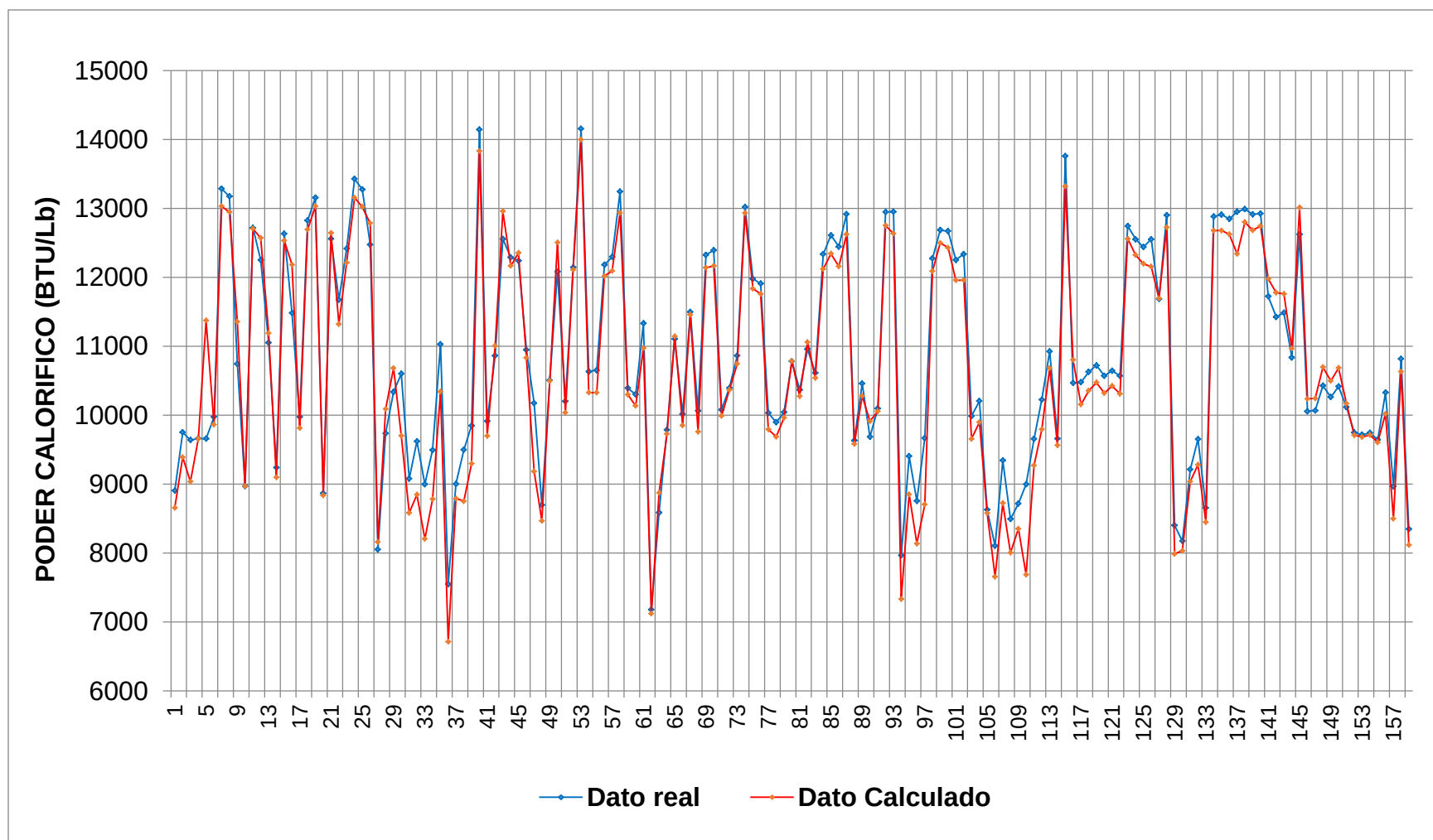


Figura 13. Poder Calorífico Superior Real vs. Poder Calorífico Superior estimado con la correlación escogida 3M-1, para datos no incluidos en el ajuste.

La Figura 13 demuestra que los valores estimados están muy cercanos a los valores reales, por lo tanto el modelo tiene una buena capacidad de predicción, que se encuentra muy cercana al valor real del poder calorífico superior de las 159 muestras no incluidas en el desarrollo de dicho modelo. Por lo tanto, se concluye que el modelo obtenido se ajusta a los valores del poder calorífico, siendo capaz de predecirlo a partir de tres parámetros resultantes del análisis próximo como son el carbono fijo, la materia volátil, y la ceniza.

Un estimador estadístico usado con frecuencia en este tipo de estudios para cuantificar la bondad del modelo es el Error Promedio Absoluto Porcentual, el cual se puede observar en la figura 9 y cuya fórmula está descrita en la ecuación 15; para la correlación escogida el valor obtenido en esta predicción fue de 2,94%.

## 4 CONCLUSIONES

- La correlación 3M-1, en función de la ceniza, la materia volátil y el carbono fijo, se desarrolló como el modelo con mejor ajuste ( $R^2$ ), para la predicción del poder calorífico superior. Graficando los datos no incluidos para el desarrollo de los modelos y reservados para la prueba final, se obtuvo una adecuada predicción entre los valores del poder calorífico real y el predicho a través de la correlación.
- Se encontró un ajuste similar entre los modelos de tres y cuatro variables, cuyos valores de los estimadores estadísticos fueron iguales para cada uno de los casos. Se determinó que no es necesario obtener una correlación en función de cuatro variables, ya que el total de la composición de una muestra de carbón se encuentra conformado por la suma de las cuatro variables. Por lo tanto, la ecuación 4M-1, puede ser reemplazada en uno de sus términos y obtener a la ecuación escogida como la mejor, la 3M-1.
- La correlación encontrada para predecir el poder calorífico superior es aplicable a muestras de carbón colombianas. Esta restricción se debe a que el estudio se realizó a muestras provenientes de diversas minas del país, con ciertas propiedades en su composición que son comunes en los carbones que yacen en Colombia. Si se compara con el estudio realizado a las muestras de Turquía (Akkaya, A.V., 2009), los carbones nacionales son diferentes a las de ese país, por lo tanto la correlación entre las variables independientes con la variable dependiente es diferente en ambos casos.
- Con base en los valores promedio obtenidos del análisis estadístico simple resumido en la Tabla 3, se puede definir de manera general, que las muestras recopiladas, entre el año 2008 y 2012, se encuentran dentro del rango de tipo bituminoso. Sin embargo, al ser carbón proveniente de diversas regiones de Colombia, se aprecian en menor medida, ejemplares de tipo subbituminoso y antracítico. Por lo tanto, estas muestras cumplen con las características generales del carbón en Colombia, acordes con el estudio realizado por el Ministerio de Minas y Energía.
- No existe una forma visual de identificar cuales variables van a tener mayor relevancia en el modelo, contrario a lo que se podría pensar al observar las figuras 2, 3, 4 y 5, donde se podría creer que la ceniza (A) y el carbono fijo (FC) son los

parámetros que mayor correlación podrían presentar con la variable dependiente, por la tendencia de sus gráficas. Al realizar el método *Stepwise*, se determinó que el Carbono Fijo es la variable con la mayor correlación parcial (sin tener en cuenta la influencia de las otras variables) con el poder calorífico. Sin embargo, la Materia Volátil, y no la Ceniza, fue encontrada como la segunda variable que mayor correlación tiene y, este resultado, no puede identificarse si se observa la dispersión que se evidencia en la Figura 3.

## 5 RECOMENDACIONES

- Para un mayor detalle, utilizando los recursos que el Laboratorio de Combustión Combustible facilita, se puede aplicar este tipo de estudios a otro tipo de materiales tales como biodiesel, madera, petróleo, entre otros tipos de combustibles sobre los cuales se les ha realizado análisis a lo largo de un periodo de tiempo.
- Existen algunos modelos generales de otros estudios realizados, por lo que se puede determinar si es posible predecir el poder calorífico superior de las muestras utilizadas en este proyecto, a través del uso de las correlaciones ofrecidas por otros autores. Igualmente, se podría verificar si la ecuación encontrada en este estudio, puede ser aplicada en muestras de otros trabajos.

## BIBLIOGRAFÍA

AKKAYA, A.V. Proximate analysis based multiple regression models for higher heating value estimation of low rank coals. En: Fuel Processing Technology. 2009. vol. 90, p. 165-170.

BOUNDY, B. *et al.* Biomass energy data book. 4 ed. Tennessee: Office of the Biomass Program Energy Efficiency and Renewable Energy, 2011. 254p.

BOWEN, B.H. e IRWIN, M.W. Coal Characteristics. En: Center for Coal Technology Research [En línea] (Octubre, 2008). Disponible en: <[www.purdue.edu/discoverypark/energy/assets/pdfs/cctr/outreach/Basics8CoalCharacteristicsOct08.pdf](http://www.purdue.edu/discoverypark/energy/assets/pdfs/cctr/outreach/Basics8CoalCharacteristicsOct08.pdf)> [Accesado en 4 de Julio de 2014].

BUELNA QUIJADA, G. Propuesta de diseño y construcción de un sistema de lavado y purificado de gases de combustión, en planta piloto: método de absorción-adsorción. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Hermosillo: Universidad de Sonora. División de Ingeniería, 1995. 153 p.

CHANNIWALA, S.A., Y PARIKH, P.P. A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. En: Fuel. 2002. vol. 81, p. 1051–1063.

CHEHREH, S., Y MAKAREMI, S. Explaining the relationship between common coal analyses and Afghan coal parameters using statistical modeling methods. En: Fuel Process.Tech. 2013. vol. 110, p. 79–85.

CORDERO T., *et al.* Predicting heating values of lignocellulosic and carbonaceous materials from proximate analysis. En: Fuel. Septiembre, 2001. vol. 80, no. 11, p. 1567–1571.

DRAPER, N.R. y SMITH, S.H. Applied Regression Analysis. 3 ed. Nueva York: John Wiley & Sons, 1998. 706 p.



FEDERACIÓN NACIONAL DE EMPRESARIOS DE MINAS DE CARBÓN. Qué es el carbón. En: Carbunión [En Línea] (s.f.). Disponible en: <[www.carbunion.com/que\\_es\\_carbon.php](http://www.carbunion.com/que_es_carbon.php)> [Accesado en 7 de Julio de 2014].

FREED M.N.; RYAN, J.M. y HESS, R.K. Handbook of statistical procedures and their computer applications to education and the behavioral science. Nueva York: Amer Council on Education, 1991. 397 p.

GAUSS, C.F. Theoria Motus Corporum Coelestium in Sectionibus Conicis Solem Ambientum. Nueva York: Cambridge University Press, 2011. 268 p.

GAUSS, C.F., Theory of the Combination of Observations Least Subject to Error. Traducido del latín por Gilbert Stewart. Filadelfia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1995. 239 p.

GOUTAL, M. Industrial chemistry - On the calorific power of oil. En: CR Acad Sci Paris. 1902. p. 477–479.

GONZALEZ ROMAN, F.; ARIZTIMUÑO JAUREGI, A. y RISUEÑO VILCHES, A. El carbón como materia prima. En: Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial [En línea] (s.f.). Disponible en: <[www.sc.ehu.es/iawfemaf/archivos/materia/industrial/libro-10.PDF](http://www.sc.ehu.es/iawfemaf/archivos/materia/industrial/libro-10.PDF)> [Accesado en 30 de Junio de 2014].

KUCUKBAYRAK, S., DURUS, B., MERICBOYU, A.E. Y KADIOGLU, E. Estimation of calorific values of Turkish lignites. En: Fuel. 1991. vol. 70, p. 979–981.

MAJUMDER, A.K., *et al.* Development of a new proximate analysis based correlation to predict calorific value of coal. En: Fuel. Octubre, 2007. vol. 87, no. 13-14, p. 3077–3081.

MESROGHLI, SH., JORJANI, E. Y CHEHREH, S. Estimation of gross calorific value based on coal analysis using regression and artificial neural networks. En: Int. J. Coal Geol. 2009. vol. 79, p. 49–54.

LEGENDRE, A.M., Nouvelles méthodes pour la détermination des orbites des comètes. Paris: s.n.,1805.

PATEL, S.U., *et al.* Estimation of gross calorific value of coals using artificial neural networks. En: Fuel. Febrero, 2007. vol. 86, no. 3, p. 334-344.

RADOVIC, L.R. y SCHOBERT, H.H. Energy and Fuels in Society. Nueva York: McGraw-Hill, 1991. 422 p.

RAWLINGS J.O.; PANTULA, S.G. y DICKEY, D.A. Applied regression analysis: a research tool. 2 ed. Nueva York: Springer-Verlag, 1998. 670 p.

SCHUSTER, V.F. Über die Berechnung des Heizwertes von Kohlen aus der Immediatezusammensetzung. En: Brennst Chem. 1951. vol. 32, p. 19–20.

SEOANE, J. Análisis bioestadístico con modelos de regresión en R. En: Universidad Autónoma de Madrid [En Línea] (Noviembre, 2013). Disponible en: <[www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/jspinill/CFCUAM2013/Multimodel\\_inference\\_CFCUAM2013.html](http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/jspinill/CFCUAM2013/Multimodel_inference_CFCUAM2013.html)> [Accesado en 25 de Julio de 2014]

SPEIGHT, J.G. The chemistry and technology of coal. 2 ed. New York: Marcel Dekker, 1994. 643 p.

TEWALT, S.J., *et al.* World Coal Quality Inventory: Colombia. En: World Coal Quality Inventory: South America. Reston (VA): U.S. Geological Survey, 2006. p. 132 – 157.

TROSSERO, M.A. y HORTA NOGUEIRA, L. Unified wood energy terminology UWET. En: FAO Document Repository [En Línea] (Marzo, 2011). Disponible en:

<[www.fao.org/docrep/008/j0926s/j0926s06.html](http://www.fao.org/docrep/008/j0926s/j0926s06.html)> [Accesado en 4 de Julio de 2014].

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. La cadena del carbón. Bogotá. Informe del Ministerio de Minas y Energía. Bogotá D.C.: UPME; 2005. 52 p.

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. La cadena del carbón. Bogotá. Informe del Ministerio de Minas y Energía. Bogotá D.C.: UPME; 2012. 80 p.

WALPOLE R.E.; MYERS, R.H. y MYERS, S.L. Probabilidad y estadística para ingenieros. Traducido por Ricardo Cruz. 6 ed. México D.F.: Prentice-Hall, 1998. 752 p.

## ANEXO 1

Tabla 1. Valores de los coeficientes a, b, c, d y e, de las correlaciones seleccionadas para cada subestructura modelo, mostradas en la Tabla 5.

| SUB -<br>ESTRUCTURA | MODELO                                | a        | b       | c       | d         | e         |
|---------------------|---------------------------------------|----------|---------|---------|-----------|-----------|
| 2M-1                | $a + bA + cA^2 + dFC + eFC^2$         | 5573,47  | -163,71 | 1,54    | 260,94    | -1,60     |
| 2M-2                | $a + b\ln(M) + c\ln(M)^2 + dA + eA^2$ | 14780,06 | -64,00  | -565,75 | -117,20   | -1,05     |
| 2M-3                | $a + b/M + c*FC + d*FC^2 + eFC^3$     | 5269,81  | 964,33  | -24,52  | 5,85      | -5,68E-02 |
| 2M-4                | $a + bMV + cMV^2 + d*MV^3 + eA$       | 13157,34 | 291,00  | -9,63   | 6,83E-02  | -199,68   |
| 2M-5                | $(ab^{MV})(FC^c)$                     | 380,17   | 1,01    | 0,78    | -         | -         |
| 2M-6                | $a + bMV + cMV^2 + dMV^3 + e\ln(M)$   | 19096,62 | -791,48 | 26,60   | -0,24     | -2181,59  |
| 3M-1                | $aMV + bA + cFC + d$                  | 266,48   | 121,14  | 299,37  | -13304,60 | -         |
| 3M-2                | $aA + bFC + cM + d$                   | -266,48  | -145,34 | 32,90   | 13343,85  | -         |
| 3M-3                | $aMV + bA + cM + d$                   | -299,37  | -32,90  | -178,23 | 16632,50  | -         |
| 3M-4                | $aMV + bM + cFC + d$                  | -121,14  | 145,34  | 178,23  | -1190,47  | -         |
| 4M-1                | $aM + bMV + cA + dFC$                 | -133,05  | 133,44  | -11,904 | 166,32    | -         |

## ANEXO 2

Tabla 1 de 14. Datos utilizados para el cálculo de las correlaciones (801 datos)

| No. | Año  | PARÁMETROS MEDIDOS |         |         |         |             | No. | Año  | PARÁMETROS MEDIDOS |         |         |         |             |
|-----|------|--------------------|---------|---------|---------|-------------|-----|------|--------------------|---------|---------|---------|-------------|
|     |      | M (%)              | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) |     |      | M (%)              | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) |
| 1   | 2008 | 2.3500             | 35.8100 | 15.2500 | 46.5900 | 11936.0000  | 28  | 2008 | 3.3300             | 27.0600 | 24.1700 | 45.4400 | 10772.0000  |
| 2   | 2008 | 4.6300             | 39.9100 | 10.0700 | 45.3900 | 11150.0000  | 29  | 2008 | 3.6600             | 27.0000 | 15.3200 | 54.0200 | 11826.0000  |
| 3   | 2008 | 1.2200             | 30.6400 | 15.0900 | 53.0500 | 12658.0000  | 30  | 2008 | 4.9900             | 25.6600 | 39.0500 | 30.3000 | 7550.0000   |
| 4   | 2008 | 4.9200             | 29.3700 | 28.9200 | 36.7900 | 8978.0000   | 31  | 2008 | 3.9400             | 30.5700 | 18.9700 | 46.5200 | 11426.0000  |
| 5   | 2008 | 3.3900             | 39.4700 | 14.5700 | 42.5700 | 11818.0000  | 32  | 2008 | 3.0700             | 33.9500 | 19.0900 | 43.8900 | 11427.0000  |
| 6   | 2008 | 2.3000             | 33.1300 | 23.0500 | 41.5200 | 10242.0000  | 33  | 2008 | 4.3800             | 34.6400 | 32.1400 | 28.8400 | 8567.0000   |
| 7   | 2008 | 2.0200             | 33.9500 | 21.8700 | 42.1600 | 10617.0000  | 34  | 2008 | 6.1300             | 28.2500 | 35.0500 | 30.5700 | 7612.0000   |
| 8   | 2008 | 2.9700             | 25.5200 | 34.0100 | 37.5000 | 8895.0000   | 35  | 2008 | 6.7100             | 30.9200 | 28.1700 | 34.2000 | 8375.0000   |
| 9   | 2008 | 1.5300             | 27.1100 | 12.7000 | 58.6600 | 13452.0000  | 36  | 2008 | 4.2300             | 36.7900 | 13.5900 | 45.3900 | 11976.0000  |
| 10  | 2008 | 8.5400             | 39.0700 | 5.9000  | 46.4900 | 11786.0000  | 37  | 2008 | 4.6400             | 38.1800 | 10.0300 | 47.1500 | 12271.0000  |
| 11  | 2008 | 10.7500            | 41.0000 | 6.4800  | 41.7700 | 10637.0000  | 38  | 2008 | 8.1100             | 37.6700 | 13.2700 | 40.9500 | 10409.0000  |
| 12  | 2008 | 10.7700            | 36.9300 | 14.5800 | 37.7200 | 9625.0000   | 39  | 2008 | 2.8100             | 21.8100 | 41.3500 | 34.0300 | 7783.0000   |
| 13  | 2008 | 9.3300             | 33.0000 | 24.6600 | 33.0100 | 8357.0000   | 40  | 2008 | 2.5600             | 25.1200 | 32.3700 | 39.9500 | 9453.0000   |
| 14  | 2008 | 3.9700             | 6.6100  | 27.6400 | 61.7800 | 10020.0000  | 41  | 2008 | 2.9000             | 19.4800 | 39.4300 | 38.1900 | 8105.0000   |
| 15  | 2008 | 3.5800             | 8.5900  | 21.4500 | 66.3800 | 11217.0000  | 42  | 2008 | 2.2700             | 28.0200 | 45.8000 | 23.9100 | 6756.0000   |
| 16  | 2008 | 6.0500             | 37.1900 | 11.2400 | 45.5200 | 12080.0000  | 43  | 2008 | 3.2600             | 26.1400 | 35.0000 | 35.6000 | 8665.0000   |
| 17  | 2008 | 5.1500             | 69.8900 | 14.4400 | 10.5200 | 6660.0000   | 44  | 2008 | 2.4700             | 22.2200 | 21.6200 | 53.6900 | 11441.0000  |
| 18  | 2008 | 2.4600             | 32.5700 | 27.2900 | 37.6800 | 9591.0000   | 45  | 2008 | 4.3000             | 37.1700 | 18.8200 | 39.7100 | 10520.0000  |
| 19  | 2008 | 4.1800             | 28.8900 | 19.5300 | 47.4000 | 10917.0000  | 46  | 2008 | 9.2400             | 34.9500 | 15.5000 | 40.3100 | 9860.0000   |
| 20  | 2008 | 2.9800             | 27.3100 | 12.0600 | 57.6500 | 12874.0000  | 47  | 2008 | 7.2100             | 36.1300 | 19.9500 | 36.7100 | 9103.0000   |
| 21  | 2008 | 6.2000             | 35.6600 | 11.6600 | 46.4800 | 11318.0000  | 48  | 2008 | 9.9200             | 37.2500 | 16.0800 | 36.7500 | 9584.0000   |
| 22  | 2008 | 2.1600             | 23.8000 | 19.7600 | 54.2800 | 11658.0000  | 49  | 2008 | 7.6200             | 34.6600 | 19.4400 | 38.2800 | 10192.0000  |
| 23  | 2008 | 9.7700             | 35.4500 | 16.9600 | 37.8200 | 9553.0000   | 50  | 2008 | 10.5900            | 32.3200 | 20.3400 | 36.7500 | 9755.0000   |
| 24  | 2008 | 2.6600             | 36.7800 | 18.0200 | 42.5400 | 11553.0000  | 51  | 2008 | 10.4700            | 36.2200 | 18.7200 | 34.5900 | 9090.0000   |
| 25  | 2008 | 5.6100             | 32.1900 | 21.6400 | 40.5600 | 10177.0000  | 52  | 2008 | 4.2900             | 36.1900 | 15.3600 | 44.1600 | 11777.0000  |
| 26  | 2008 | 3.6200             | 22.8400 | 33.7800 | 39.7600 | 8823.0000   | 53  | 2008 | 10.0800            | 34.9500 | 20.2200 | 34.7500 | 8694.0000   |
| 27  | 2008 | 5.2700             | 26.2100 | 28.5000 | 40.0200 | 8959.0000   | 54  | 2008 | 3.5100             | 28.3600 | 36.8500 | 31.2800 | 8499.0000   |

Tabla 2 de 14. Datos utilizados para el cálculo de las correlaciones (801 datos)

| PARÁMETROS MEDIDOS |      |         |         |         |         |             | PARÁMETROS MEDIDOS |      |        |         |         |         |             |
|--------------------|------|---------|---------|---------|---------|-------------|--------------------|------|--------|---------|---------|---------|-------------|
| No.                | Año  | M (%)   | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) | No.                | Año  | M (%)  | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) |
| 55                 | 2008 | 0.5600  | 41.1800 | 10.8000 | 47.4600 | 13221.0000  | 85                 | 2008 | 1.9200 | 32.4200 | 13.2800 | 52.3800 | 12767.0000  |
| 56                 | 2008 | 4.0500  | 28.4400 | 26.2100 | 41.3000 | 10354.0000  | 86                 | 2008 | 4.0200 | 28.6000 | 24.5100 | 42.8700 | 10224.0000  |
| 57                 | 2008 | 4.8200  | 31.2300 | 28.1500 | 35.8000 | 9311.0000   | 87                 | 2008 | 4.7600 | 29.1600 | 27.3600 | 38.7200 | 9517.0000   |
| 58                 | 2008 | 3.7900  | 35.8100 | 16.6800 | 43.7200 | 11315.0000  | 88                 | 2008 | 6.5300 | 36.2600 | 15.6500 | 41.5600 | 10711.0000  |
| 59                 | 2008 | 2.8300  | 37.4200 | 13.1300 | 46.6200 | 12265.0000  | 89                 | 2008 | 3.4600 | 32.4200 | 13.1500 | 50.9700 | 12527.0000  |
| 60                 | 2008 | 4.5300  | 17.3900 | 23.4500 | 54.6300 | 9680.0000   | 90                 | 2008 | 6.5900 | 30.5800 | 23.0900 | 39.7400 | 10138.0000  |
| 61                 | 2008 | 3.3200  | 38.5500 | 12.1700 | 45.9600 | 12343.0000  | 91                 | 2008 | 2.8600 | 31.7800 | 14.2800 | 51.0800 | 12433.0000  |
| 62                 | 2008 | 4.3700  | 35.5600 | 17.6900 | 42.3800 | 10804.0000  | 92                 | 2008 | 3.6700 | 32.5100 | 15.3000 | 48.5200 | 12065.0000  |
| 63                 | 2008 | 2.9000  | 30.1200 | 29.5000 | 37.4800 | 9913.0000   | 93                 | 2008 | 2.9500 | 31.1100 | 21.3600 | 44.5800 | 11150.0000  |
| 64                 | 2008 | 2.5000  | 21.1400 | 32.3600 | 44.0000 | 9341.0000   | 94                 | 2008 | 3.1400 | 30.9300 | 22.1900 | 43.7400 | 11049.0000  |
| 65                 | 2008 | 3.8900  | 23.8000 | 30.9500 | 41.3600 | 9219.0000   | 95                 | 2008 | 2.2000 | 32.0900 | 14.9400 | 50.7700 | 12409.0000  |
| 66                 | 2008 | 2.5800  | 29.8900 | 40.9100 | 26.6200 | 7518.0000   | 96                 | 2008 | 2.2400 | 30.9600 | 15.4500 | 51.3500 | 12318.0000  |
| 67                 | 2008 | 2.6700  | 29.4900 | 43.2700 | 24.5700 | 7163.0000   | 97                 | 2008 | 2.8400 | 24.5700 | 26.3500 | 46.2400 | 10451.0000  |
| 68                 | 2008 | 2.8200  | 26.7000 | 34.7800 | 35.7000 | 8871.0000   | 98                 | 2008 | 2.3800 | 36.8700 | 13.8200 | 46.9300 | 12379.0000  |
| 69                 | 2008 | 10.4900 | 32.6100 | 28.2800 | 28.6200 | 7498.0000   | 99                 | 2008 | 2.2900 | 31.9300 | 36.6600 | 29.1200 | 8702.0000   |
| 70                 | 2008 | 1.2800  | 26.3600 | 33.6600 | 38.7000 | 9425.0000   | 100                | 2008 | 2.9800 | 36.6100 | 9.5400  | 50.8700 | 12991.0000  |
| 71                 | 2008 | 4.8900  | 28.7400 | 35.1400 | 31.2300 | 7952.0000   | 101                | 2008 | 2.6100 | 38.0400 | 8.1600  | 51.1900 | 13247.0000  |
| 72                 | 2008 | 4.4400  | 32.0800 | 30.2400 | 33.2400 | 9019.0000   | 102                | 2008 | 2.6200 | 35.3500 | 16.1100 | 45.9200 | 12061.0000  |
| 73                 | 2008 | 5.0800  | 34.3500 | 21.5300 | 39.0400 | 10362.0000  | 103                | 2008 | 2.3800 | 18.7100 | 33.3500 | 45.5600 | 9559.0000   |
| 74                 | 2008 | 4.3000  | 33.0600 | 17.9900 | 44.6500 | 11196.0000  | 104                | 2008 | 2.9500 | 27.5600 | 23.9200 | 45.5700 | 10910.0000  |
| 75                 | 2008 | 4.1300  | 32.9000 | 20.9200 | 42.0500 | 10802.0000  | 105                | 2008 | 7.4900 | 32.8100 | 23.0200 | 36.6800 | 9384.0000   |
| 76                 | 2008 | 3.6500  | 18.5100 | 10.2500 | 67.5900 | 12947.0000  | 106                | 2008 | 3.7400 | 31.1600 | 26.2400 | 38.8600 | 10143.0000  |
| 77                 | 2008 | 2.2200  | 33.7100 | 15.2100 | 48.8600 | 12252.0000  | 107                | 2008 | 3.4700 | 36.2000 | 14.1900 | 46.1400 | 12053.0000  |
| 78                 | 2008 | 2.8300  | 37.5900 | 9.1300  | 50.4500 | 13313.0000  | 108                | 2008 | 2.7800 | 24.4100 | 34.7200 | 38.0900 | 9231.0000   |
| 79                 | 2008 | 5.2200  | 39.0600 | 9.7800  | 45.9400 | 11844.0000  | 109                | 2008 | 2.8100 | 27.5700 | 32.2200 | 37.4000 | 9380.0000   |
| 80                 | 2008 | 3.5100  | 38.6200 | 14.5600 | 43.3100 | 11951.0000  | 110                | 2008 | 3.5600 | 26.6300 | 24.2900 | 45.5200 | 9983.0000   |
| 81                 | 2008 | 2.5900  | 37.9000 | 10.2600 | 49.2500 | 12995.0000  | 111                | 2008 | 2.6200 | 26.1400 | 30.3200 | 40.9200 | 9461.0000   |
| 82                 | 2008 | 3.4600  | 34.8400 | 16.6200 | 45.0800 | 11794.0000  | 112                | 2008 | 1.3000 | 25.0100 | 14.9500 | 58.7400 | 13088.0000  |
| 83                 | 2008 | 3.5200  | 28.1800 | 29.7500 | 38.5500 | 9642.0000   | 113                | 2008 | 7.9700 | 37.5100 | 20.3000 | 34.2200 | 8911.0000   |
| 84                 | 2008 | 2.3500  | 26.6300 | 14.9700 | 56.0500 | 12594.0000  | 114                | 2008 | 7.4600 | 34.7100 | 24.5900 | 33.2400 | 8509.0000   |

Tabla 3 de 14. Datos utilizados para el cálculo de las correlaciones (801 datos)

| PARÁMETROS MEDIDOS |      |         |         |         |         |             | PARÁMETROS MEDIDOS |      |         |         |         |         |             |
|--------------------|------|---------|---------|---------|---------|-------------|--------------------|------|---------|---------|---------|---------|-------------|
| No.                | Año  | M (%)   | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) | No.                | Año  | M (%)   | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) |
| 115                | 2008 | 10.1300 | 40.7200 | 6.3600  | 42.7900 | 10710.0000  | 142                | 2009 | 11.5300 | 37.3800 | 15.8400 | 35.2500 | 9163.0000   |
| 116                | 2008 | 2.9600  | 37.0300 | 10.3400 | 49.6700 | 12765.0000  | 143                | 2009 | 7.4800  | 29.1800 | 38.7900 | 24.5500 | 6344.0000   |
| 117                | 2008 | 3.0800  | 37.7600 | 10.4400 | 48.7200 | 12722.0000  | 144                | 2009 | 7.7000  | 21.5100 | 38.1500 | 32.6400 | 6138.0000   |
| 118                | 2008 | 4.8100  | 29.0500 | 22.5100 | 43.6300 | 10340.0000  | 145                | 2009 | 4.4000  | 33.6700 | 28.3200 | 33.6100 | 8757.0000   |
| 119                | 2008 | 1.6400  | 24.0300 | 16.1200 | 58.2100 | 12758.0000  | 146                | 2009 | 8.1400  | 33.4500 | 25.4600 | 32.9500 | 8377.0000   |
| 120                | 2008 | 3.2800  | 40.3000 | 7.1100  | 49.3100 | 13247.0000  | 147                | 2009 | 10.2500 | 35.3600 | 18.4000 | 35.9900 | 9050.0000   |
| 121                | 2008 | 2.3000  | 36.1200 | 12.8000 | 48.7800 | 12626.0000  | 148                | 2009 | 9.9400  | 32.3600 | 26.9400 | 30.7600 | 7915.0000   |
| 122                | 2008 | 3.2800  | 35.0400 | 15.1900 | 46.4900 | 11900.0000  | 149                | 2009 | 10.6100 | 34.3900 | 16.1100 | 38.8900 | 9329.0000   |
| 123                | 2008 | 2.9200  | 36.8400 | 7.9000  | 52.3400 | 13229.0000  | 150                | 2009 | 10.3600 | 32.2600 | 27.2900 | 30.0900 | 7684.0000   |
| 121                | 2008 | 2.3000  | 36.1200 | 12.8000 | 48.7800 | 12626.0000  | 151                | 2009 | 10.2400 | 33.8100 | 20.8800 | 35.0700 | 8580.0000   |
| 122                | 2008 | 3.2800  | 35.0400 | 15.1900 | 46.4900 | 11900.0000  | 152                | 2009 | 9.9200  | 34.2500 | 21.6300 | 34.2000 | 8636.0000   |
| 123                | 2008 | 2.9200  | 36.8400 | 7.9000  | 52.3400 | 13229.0000  | 153                | 2009 | 2.0000  | 36.8800 | 14.0900 | 47.0300 | 12369.0000  |
| 124                | 2009 | 1.6500  | 28.5500 | 36.8300 | 32.9700 | 7999.0000   | 154                | 2009 | 2.3000  | 35.6200 | 13.0600 | 49.0200 | 12597.0000  |
| 125                | 2009 | 1.1000  | 24.8200 | 30.1800 | 43.9000 | 9932.0000   | 155                | 2009 | 2.2000  | 39.1800 | 14.0400 | 44.5800 | 12162.0000  |
| 126                | 2009 | 4.4000  | 35.6300 | 20.6200 | 39.3500 | 9469.0000   | 156                | 2009 | 1.9600  | 42.8900 | 8.1400  | 47.0100 | 13476.0000  |
| 127                | 2009 | 0.7900  | 23.8400 | 27.5600 | 47.8100 | 10207.0000  | 157                | 2009 | 1.8100  | 35.8800 | 21.9000 | 40.4100 | 11029.0000  |
| 128                | 2009 | 0.8700  | 19.8400 | 23.3300 | 55.9600 | 11252.0000  | 158                | 2009 | 5.0800  | 31.7000 | 27.5900 | 35.6300 | 9343.3500   |
| 129                | 2009 | 0.7000  | 31.4200 | 10.2300 | 57.6500 | 13667.0000  | 159                | 2009 | 9.7100  | 33.2700 | 26.3700 | 30.6500 | 7943.0000   |
| 130                | 2009 | 7.1300  | 33.2100 | 27.9100 | 31.7500 | 8166.0000   | 160                | 2009 | 5.9100  | 33.9400 | 19.2400 | 40.9100 | 9777.0000   |
| 131                | 2009 | 7.5400  | 32.4400 | 21.3800 | 38.6400 | 9453.0000   | 161                | 2009 | 7.8900  | 31.9400 | 33.1500 | 27.0200 | 7102.0000   |
| 132                | 2009 | 9.7700  | 33.0300 | 24.8800 | 32.3200 | 8040.0000   | 162                | 2009 | 7.9600  | 37.8400 | 14.9700 | 39.2300 | 10195.0000  |
| 133                | 2009 | 8.1200  | 36.1700 | 19.9200 | 35.7900 | 9143.0000   | 163                | 2009 | 9.5500  | 31.6400 | 27.8700 | 30.9400 | 7538.0000   |
| 134                | 2009 | 2.0500  | 39.2000 | 12.2500 | 46.5000 | 12550.0000  | 164                | 2009 | 1.5500  | 23.1800 | 33.8200 | 41.4500 | 9123.0000   |
| 135                | 2009 | 10.6700 | 38.5200 | 10.6800 | 40.1300 | 10344.0000  | 165                | 2009 | 1.5500  | 32.6000 | 23.2800 | 42.5700 | 10992.0000  |
| 136                | 2009 | 9.8400  | 31.3600 | 29.1800 | 29.6200 | 7555.0000   | 166                | 2009 | 0.8800  | 33.9300 | 8.5300  | 56.6600 | 13679.0000  |
| 137                | 2009 | 7.2100  | 36.1100 | 16.4100 | 40.2700 | 10346.0000  | 167                | 2009 | 4.2700  | 39.9500 | 11.5700 | 44.2100 | 11162.0000  |
| 138                | 2009 | 13.0600 | 35.0700 | 13.2100 | 38.6600 | 9162.0000   | 168                | 2009 | 4.9200  | 40.4000 | 11.4900 | 43.1900 | 10819.0000  |
| 139                | 2009 | 10.0600 | 33.3400 | 21.7300 | 34.8700 | 8605.0000   | 169                | 2009 | 1.6600  | 36.3700 | 25.1300 | 36.8400 | 10458.0000  |
| 140                | 2009 | 8.5100  | 31.7900 | 30.5900 | 29.1100 | 7524.0000   | 170                | 2009 | 1.4400  | 33.8600 | 11.0300 | 53.6700 | 13201.0000  |
| 141                | 2009 | 8.8300  | 34.8700 | 22.8000 | 33.5000 | 8512.0000   | 171                | 2009 | 3.0500  | 35.0300 | 13.3700 | 48.5500 | 12291.0000  |

Tabla 4 de 14. Datos utilizados para el cálculo de las correlaciones (801 datos)

| PARÁMETROS MEDIDOS |      |         |         |         |         |             | PARÁMETROS MEDIDOS |      |        |         |         |         |             |
|--------------------|------|---------|---------|---------|---------|-------------|--------------------|------|--------|---------|---------|---------|-------------|
| No.                | Año  | M (%)   | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) | No.                | Año  | M (%)  | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) |
| 172                | 2009 | 3.6100  | 41.4800 | 5.4800  | 49.4300 | 13164.0000  | 202                | 2009 | 3.3000 | 32.6500 | 16.5000 | 47.5500 | 11374.0000  |
| 173                | 2009 | 4.3300  | 30.0100 | 30.8900 | 34.7700 | 8393.0000   | 203                | 2009 | 5.7900 | 37.4100 | 17.6500 | 39.1500 | 10157.0000  |
| 174                | 2009 | 2.8600  | 34.5300 | 14.7400 | 47.8700 | 12015.0000  | 204                | 2009 | 1.7900 | 31.7400 | 11.3200 | 55.1500 | 13125.0000  |
| 175                | 2009 | 10.7100 | 38.9200 | 9.2600  | 41.1100 | 10262.8800  | 205                | 2009 | 6.1400 | 35.8000 | 7.3800  | 50.6800 | 12485.0000  |
| 176                | 2009 | 8.4100  | 35.2000 | 7.1400  | 49.2500 | 12002.0000  | 206                | 2009 | 8.9600 | 34.5700 | 11.1800 | 45.2900 | 11124.0000  |
| 177                | 2009 | 7.4900  | 29.8700 | 23.5300 | 39.1100 | 9399.0000   | 207                | 2009 | 8.5900 | 34.0000 | 7.8100  | 49.6000 | 11994.0000  |
| 178                | 2009 | 9.7100  | 35.8800 | 3.7900  | 50.6200 | 12175.0000  | 208                | 2009 | 2.7800 | 33.2200 | 13.5400 | 50.4600 | 12798.0000  |
| 179                | 2009 | 4.1800  | 38.8600 | 10.7100 | 46.2500 | 12205.0000  | 209                | 2009 | 2.9400 | 36.6600 | 8.5300  | 51.8700 | 13441.0000  |
| 180                | 2009 | 9.5400  | 37.6700 | 11.8600 | 40.9300 | 10249.0000  | 210                | 2009 | 1.5900 | 30.1400 | 11.5500 | 56.7200 | 13427.0000  |
| 181                | 2009 | 4.7200  | 35.7000 | 17.6400 | 41.9400 | 10909.0000  | 211                | 2009 | 6.8800 | 32.7100 | 20.6600 | 39.7500 | 9359.0000   |
| 182                | 2009 | 2.5000  | 33.6500 | 31.9600 | 31.8900 | 9022.0000   | 212                | 2009 | 4.8800 | 32.9700 | 24.7300 | 37.4200 | 8636.0000   |
| 183                | 2009 | 4.7200  | 35.7000 | 17.6400 | 41.9400 | 10909.0000  | 213                | 2009 | 5.3700 | 31.2500 | 27.0600 | 36.3200 | 9383.0000   |
| 184                | 2009 | 4.2800  | 37.9700 | 15.6100 | 42.1400 | 11347.0000  | 214                | 2009 | 6.2700 | 29.8400 | 31.5300 | 32.3600 | 7589.0000   |
| 185                | 2009 | 9.3500  | 34.6600 | 21.3600 | 34.6300 | 8872.0000   | 215                | 2009 | 2.0000 | 31.5300 | 16.6900 | 49.7800 | 12317.0000  |
| 186                | 2009 | 2.9400  | 34.2300 | 8.8700  | 53.9600 | 13284.0000  | 216                | 2009 | 2.2100 | 33.4300 | 11.2700 | 53.0900 | 13136.0000  |
| 187                | 2009 | 1.5600  | 32.3100 | 8.4700  | 57.6600 | 13875.0000  | 217                | 2009 | 2.2800 | 29.9300 | 20.6600 | 47.1300 | 11553.0000  |
| 188                | 2009 | 1.4200  | 32.5500 | 6.9900  | 59.0400 | 14003.0000  | 218                | 2009 | 2.3900 | 33.7200 | 14.1800 | 49.7100 | 12500.0000  |
| 189                | 2009 | 2.5600  | 36.4100 | 9.7000  | 51.3300 | 13158.0000  | 219                | 2009 | 2.6300 | 37.2300 | 10.4500 | 49.6900 | 12851.0000  |
| 190                | 2009 | 4.4000  | 11.9300 | 11.9800 | 71.6900 | 12854.0000  | 220                | 2009 | 1.3600 | 35.8100 | 31.1500 | 31.6800 | 9591.0000   |
| 191                | 2009 | 4.4800  | 11.2200 | 8.5400  | 75.7600 | 13650.0000  | 221                | 2009 | 2.1100 | 28.4700 | 47.3400 | 22.0800 | 6697.0000   |
| 192                | 2009 | 4.5900  | 27.0200 | 14.2500 | 54.1400 | 10566.0000  | 222                | 2009 | 3.1900 | 30.4300 | 23.1000 | 43.2800 | 10689.0000  |
| 193                | 2009 | 2.4100  | 32.0100 | 15.4400 | 50.1400 | 12224.0000  | 223                | 2009 | 2.2800 | 38.3700 | 10.3900 | 48.9600 | 12774.0000  |
| 194                | 2009 | 2.2200  | 31.3200 | 16.5900 | 49.8700 | 12155.0000  | 224                | 2009 | 5.9300 | 38.5000 | 13.6400 | 41.9300 | 10734.0000  |
| 195                | 2009 | 1.8900  | 32.5400 | 13.4800 | 52.0900 | 12873.0000  | 225                | 2009 | 7.8000 | 34.0700 | 23.1800 | 34.9500 | 8819.0000   |
| 196                | 2009 | 2.2500  | 31.2400 | 16.9100 | 49.6000 | 12143.0000  | 226                | 2009 | 9.5200 | 39.7000 | 9.7600  | 41.0200 | 10466.0000  |
| 197                | 2009 | 7.6300  | 33.5200 | 14.9300 | 43.9200 | 10401.0000  | 227                | 2009 | 2.5400 | 17.2000 | 41.1700 | 39.0900 | 7435.0000   |
| 198                | 2009 | 1.3300  | 18.4900 | 40.3100 | 39.8700 | 7120.0000   | 228                | 2009 | 2.5400 | 17.2000 | 41.1700 | 39.0900 | 7435.0000   |
| 199                | 2009 | 1.3800  | 36.4100 | 26.8100 | 35.4000 | 10441.0000  | 229                | 2009 | 3.5900 | 31.5800 | 23.0800 | 41.7500 | 10491.0000  |
| 200                | 2009 | 9.8900  | 41.1700 | 6.0100  | 42.9300 | 10874.0000  | 230                | 2009 | 3.6900 | 31.7900 | 22.3700 | 42.1500 | 10294.0000  |
| 201                | 2009 | 1.8200  | 32.3400 | 10.7900 | 55.0500 | 13278.0000  | 231                | 2009 | 6.0800 | 38.3900 | 11.7900 | 43.7400 | 11163.0000  |



Tabla 5 de 14. Datos utilizados para el cálculo de las correlaciones (801 datos)

| PARÁMETROS MEDIDOS |      |        |         |         |         |             | PARÁMETROS MEDIDOS |      |         |         |         |         |             |
|--------------------|------|--------|---------|---------|---------|-------------|--------------------|------|---------|---------|---------|---------|-------------|
| No.                | Año  | M (%)  | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) | No.                | Año  | M (%)   | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) |
| 232                | 2009 | 3.9200 | 35.2000 | 16.7800 | 44.1000 | 11264.0000  | 262                | 2009 | 1.1900  | 27.6600 | 20.5500 | 50.6000 | 11442.0000  |
| 233                | 2009 | 6.2300 | 32.9950 | 24.2350 | 36.5400 | 9328.2300   | 263                | 2009 | 1.1200  | 35.8400 | 30.8600 | 32.1800 | 9666.0000   |
| 234                | 2009 | 5.5100 | 26.0600 | 22.9700 | 45.4600 | 8727.0000   | 264                | 2009 | 3.2800  | 39.3400 | 14.5500 | 42.8300 | 11252.0000  |
| 235                | 2009 | 7.8900 | 28.4700 | 31.7900 | 31.8500 | 7715.0000   | 265                | 2009 | 3.1000  | 39.3000 | 10.3100 | 47.2900 | 12067.0000  |
| 236                | 2009 | 5.8300 | 28.7300 | 31.9700 | 33.4700 | 7790.0000   | 266                | 2009 | 1.8100  | 14.3600 | 16.0100 | 67.8200 | 12403.0000  |
| 237                | 2009 | 3.5700 | 27.3200 | 34.2100 | 34.9000 | 8750.0000   | 267                | 2009 | 9.0500  | 35.2000 | 21.7600 | 33.9900 | 8814.0000   |
| 238                | 2009 | 2.4500 | 34.3400 | 12.1600 | 51.0500 | 12721.0000  | 268                | 2009 | 8.3700  | 30.8600 | 32.4500 | 28.3200 | 7194.0000   |
| 239                | 2009 | 2.3800 | 37.1700 | 9.1100  | 51.3400 | 13099.0000  | 269                | 2009 | 11.6200 | 37.3900 | 16.6900 | 34.3000 | 10930.0000  |
| 240                | 2009 | 2.1000 | 29.1800 | 15.2100 | 53.5100 | 12635.0000  | 270                | 2009 | 2.5100  | 29.6700 | 25.0500 | 42.7700 | 10729.0000  |
| 241                | 2009 | 1.8900 | 42.5100 | 9.7700  | 45.8300 | 13203.0000  | 271                | 2009 | 2.0700  | 28.2600 | 13.5900 | 56.0800 | 12856.0000  |
| 242                | 2009 | 3.0700 | 33.3600 | 14.2000 | 49.3700 | 12230.0000  | 272                | 2009 | 3.6200  | 8.1100  | 24.3300 | 63.9400 | 10390.0000  |
| 243                | 2009 | 2.0400 | 32.5400 | 34.7900 | 30.6300 | 8868.0000   | 273                | 2009 | 3.5800  | 7.7000  | 22.6200 | 66.1000 | 10994.0000  |
| 244                | 2009 | 2.2300 | 34.1100 | 29.6100 | 34.0500 | 9747.0000   | 274                | 2009 | 9.4200  | 33.6700 | 24.6800 | 32.2300 | 9384.0000   |
| 245                | 2009 | 2.9500 | 31.5100 | 23.2500 | 42.2900 | 10957.0000  | 275                | 2009 | 2.2400  | 30.6000 | 12.7700 | 54.3900 | 13003.0000  |
| 246                | 2009 | 1.9800 | 31.9700 | 35.9200 | 30.1300 | 8596.0000   | 276                | 2009 | 1.3100  | 32.5200 | 12.3800 | 53.7900 | 13144.0000  |
| 247                | 2009 | 1.9900 | 30.3300 | 40.9100 | 26.7700 | 7641.0000   | 277                | 2009 | 1.8400  | 26.5500 | 12.4800 | 59.1300 | 13065.0000  |
| 248                | 2009 | 1.7000 | 54.6600 | 14.9500 | 28.6900 | 12455.0000  | 278                | 2009 | 2.2800  | 31.2200 | 12.8500 | 53.6500 | 12909.0000  |
| 249                | 2009 | 2.6900 | 27.7700 | 18.2500 | 51.2900 | 11892.0000  | 279                | 2009 | 1.7500  | 31.9250 | 12.2800 | 54.0450 | 12959.9100  |
| 250                | 2009 | 3.0500 | 27.8500 | 31.3000 | 37.8000 | 9419.0000   | 280                | 2009 | 1.8800  | 35.1900 | 11.8500 | 51.0800 | 12802.0000  |
| 251                | 2009 | 2.5000 | 31.1900 | 20.8700 | 45.4400 | 10801.0000  | 281                | 2009 | 1.6100  | 34.9000 | 10.8100 | 52.6800 | 13074.0000  |
| 252                | 2009 | 1.2800 | 26.5000 | 42.7600 | 29.4600 | 7437.0000   | 282                | 2009 | 1.7200  | 34.6200 | 12.3700 | 51.2900 | 12868.0000  |
| 253                | 2009 | 1.1800 | 31.9200 | 12.9500 | 53.9500 | 12688.0000  | 283                | 2009 | 2.8100  | 33.8800 | 11.3200 | 51.9900 | 12808.0000  |
| 254                | 2009 | 1.8200 | 32.5100 | 20.4000 | 45.2700 | 11570.0000  | 284                | 2009 | 3.0100  | 33.4300 | 13.6000 | 49.9600 | 12233.0000  |
| 255                | 2009 | 2.3500 | 32.3400 | 19.8000 | 45.5100 | 11187.0000  | 285                | 2009 | 5.6900  | 26.0800 | 37.6300 | 30.6000 | 6956.0000   |
| 256                | 2009 | 1.8200 | 30.2100 | 12.1600 | 55.8100 | 12743.0000  | 286                | 2009 | 6.1900  | 35.7000 | 14.5900 | 43.5200 | 11265.0000  |
| 257                | 2009 | 1.0600 | 31.3900 | 12.6700 | 54.8800 | 13067.0000  | 287                | 2009 | 2.9000  | 30.8600 | 15.7700 | 50.4700 | 11963.0000  |
| 258                | 2009 | 5.5900 | 38.5600 | 14.8600 | 40.9900 | 10488.0000  | 288                | 2010 | 4.8900  | 10.4400 | 13.3300 | 71.3400 | 12156.3000  |
| 259                | 2009 | 1.7100 | 29.2400 | 45.4200 | 23.6300 | 6437.0000   | 289                | 2010 | 1.0400  | 19.0200 | 17.4900 | 62.4500 | 12478.0000  |
| 260                | 2009 | 1.1500 | 28.1800 | 12.0600 | 58.6100 | 13080.0000  | 290                | 2010 | 3.5400  | 28.3800 | 36.7000 | 31.3800 | 7944.0000   |
| 261                | 2009 | 1.8700 | 37.9200 | 10.9900 | 49.2200 | 12825.0000  | 291                | 2010 | 3.6600  | 22.3900 | 30.3900 | 43.5600 | 9193.0000   |

Tabla 6 de 14. Datos utilizados para el cálculo de las correlaciones (801 datos)

| PARÁMETROS MEDIDOS |      |        |         |         |         |             | PARÁMETROS MEDIDOS |      |        |         |         |         |             |
|--------------------|------|--------|---------|---------|---------|-------------|--------------------|------|--------|---------|---------|---------|-------------|
| No.                | Año  | M (%)  | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) | No.                | Año  | M (%)  | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) |
| 292                | 2010 | 3.5200 | 31.7300 | 23.4100 | 41.3400 | 10450.0000  | 322                | 2010 | 3.0700 | 33.7600 | 19.0300 | 44.1400 | 11291.0000  |
| 293                | 2010 | 3.4500 | 31.1400 | 10.4500 | 54.9600 | 12704.0000  | 323                | 2010 | 2.8900 | 30.2200 | 27.3300 | 39.5600 | 10176.0000  |
| 294                | 2010 | 7.8400 | 17.7400 | 17.3400 | 57.0800 | 10295.0000  | 324                | 2010 | 2.5300 | 35.6000 | 10.6700 | 51.2000 | 12909.0000  |
| 295                | 2010 | 2.5700 | 29.2900 | 15.1300 | 53.0100 | 12350.0000  | 325                | 2010 | 2.6800 | 31.6300 | 23.8500 | 41.8400 | 10717.0000  |
| 296                | 2010 | 6.4800 | 33.7400 | 25.8100 | 33.9700 | 9056.0000   | 326                | 2010 | 2.3500 | 34.4500 | 13.0400 | 50.1600 | 12603.0000  |
| 297                | 2010 | 7.0700 | 35.8300 | 23.7900 | 33.3100 | 9715.0000   | 327                | 2010 | 3.3300 | 36.9000 | 10.5400 | 49.2300 | 12652.0000  |
| 298                | 2010 | 2.5600 | 33.4700 | 11.6200 | 52.3500 | 12772.0000  | 328                | 2010 | 2.9600 | 32.1300 | 24.0200 | 40.8900 | 10589.0000  |
| 299                | 2010 | 1.0900 | 19.5400 | 17.2000 | 62.1700 | 12481.0000  | 329                | 2010 | 1.5900 | 30.2400 | 25.9200 | 42.2500 | 10655.0000  |
| 300                | 2010 | 1.1700 | 20.6900 | 17.2000 | 60.9400 | 12641.0000  | 330                | 2010 | 5.3100 | 35.2700 | 15.9100 | 43.5100 | 10669.0000  |
| 301                | 2010 | 4.3400 | 13.7100 | 30.7400 | 51.2100 | 9342.0000   | 331                | 2010 | 1.4800 | 25.0800 | 25.3900 | 48.0500 | 10802.0000  |
| 302                | 2010 | 1.4400 | 33.0700 | 20.3000 | 45.1900 | 11517.0000  | 332                | 2010 | 2.7600 | 28.9200 | 11.8600 | 56.4600 | 12783.0000  |
| 303                | 2010 | 1.8300 | 30.1700 | 35.3200 | 32.6800 | 8771.0000   | 333                | 2010 | 3.2700 | 29.7500 | 18.4300 | 48.5500 | 11230.0000  |
| 304                | 2010 | 3.7500 | 33.0700 | 23.3200 | 39.8600 | 10132.0000  | 334                | 2010 | 3.2800 | 29.8000 | 18.2000 | 48.7200 | 11274.0000  |
| 305                | 2010 | 4.7400 | 34.2300 | 21.6200 | 39.4100 | 10258.0000  | 335                | 2010 | 2.9300 | 28.3500 | 30.2000 | 38.5200 | 9745.0000   |
| 306                | 2010 | 3.1100 | 33.7500 | 19.3800 | 43.7600 | 11265.0000  | 336                | 2010 | 2.8600 | 32.8000 | 19.7400 | 44.6000 | 11285.0000  |
| 307                | 2010 | 3.0600 | 33.0400 | 18.9000 | 45.0000 | 11387.0000  | 337                | 2010 | 3.4300 | 10.8700 | 13.1200 | 72.5800 | 12425.0000  |
| 308                | 2010 | 5.3200 | 33.9100 | 21.4600 | 39.3100 | 10217.0000  | 338                | 2010 | 7.9800 | 36.1700 | 23.3000 | 32.5500 | 8781.0000   |
| 309                | 2010 | 3.7400 | 38.4200 | 20.3200 | 37.5200 | 10447.0000  | 339                | 2010 | 3.4500 | 25.2100 | 14.9300 | 56.4100 | 12208.0000  |
| 310                | 2010 | 5.4600 | 34.9100 | 22.2500 | 37.3800 | 9617.0000   | 340                | 2010 | 6.7200 | 35.3800 | 20.8900 | 37.0100 | 9417.0000   |
| 311                | 2010 | 3.1000 | 33.5500 | 17.9500 | 45.4000 | 11346.0000  | 341                | 2010 | 2.6100 | 26.1900 | 49.7400 | 21.4600 | 5929.0000   |
| 312                | 2010 | 4.4100 | 33.5200 | 19.9100 | 42.1600 | 10565.0000  | 342                | 2010 | 2.3900 | 30.5700 | 39.7900 | 27.2500 | 7577.0000   |
| 313                | 2010 | 4.4400 | 33.3700 | 21.0600 | 41.1300 | 10277.0000  | 343                | 2010 | 3.5000 | 31.7100 | 35.7800 | 29.0100 | 7980.0000   |
| 314                | 2010 | 3.2700 | 30.9200 | 26.8000 | 39.0100 | 10019.0000  | 344                | 2010 | 4.2000 | 23.6200 | 44.3400 | 27.8400 | 6599.0000   |
| 315                | 2010 | 2.8900 | 35.9900 | 25.6100 | 35.5100 | 10048.0000  | 345                | 2010 | 2.8300 | 26.6400 | 36.2900 | 34.2400 | 8470.0000   |
| 316                | 2010 | 9.3200 | 38.1200 | 19.8800 | 32.6800 | 8855.0000   | 346                | 2010 | 2.4000 | 20.4900 | 24.9300 | 52.1800 | 10464.0000  |
| 317                | 2010 | 3.0100 | 32.8600 | 20.4400 | 43.6900 | 11012.0000  | 347                | 2010 | 2.7000 | 28.5000 | 44.3700 | 24.4300 | 6977.0000   |
| 318                | 2010 | 6.5300 | 34.7600 | 28.1500 | 30.5600 | 8674.0000   | 348                | 2010 | 2.5700 | 28.7300 | 43.1100 | 25.5900 | 7577.0000   |
| 319                | 2010 | 6.5100 | 35.0600 | 27.9500 | 30.4800 | 8812.0000   | 349                | 2010 | 1.3300 | 22.6900 | 21.0700 | 54.9100 | 11653.0000  |
| 320                | 2010 | 5.6100 | 34.9400 | 33.0600 | 26.3900 | 7241.0000   | 350                | 2010 | 1.1600 | 22.7500 | 20.7700 | 55.3200 | 11923.0000  |
| 321                | 2010 | 2.8700 | 31.3400 | 23.7600 | 42.0300 | 10606.0000  | 351                | 2010 | 1.1400 | 22.0400 | 20.7400 | 56.0800 | 12044.0000  |

Tabla 7 de 14. Datos utilizados para el cálculo de las correlaciones (801 datos)

| PARÁMETROS MEDIDOS |      |         |         |         |         |             | PARÁMETROS MEDIDOS |      |         |         |         |         |             |
|--------------------|------|---------|---------|---------|---------|-------------|--------------------|------|---------|---------|---------|---------|-------------|
| No.                | Año  | M (%)   | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) | No.                | Año  | M (%)   | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) |
| 352                | 2010 | 7.2800  | 33.4300 | 32.6000 | 26.6900 | 7659.0000   | 382                | 2010 | 10.4600 | 44.1700 | 9.2300  | 36.1400 | 10608.0000  |
| 353                | 2010 | 3.0200  | 31.8500 | 32.4600 | 32.6700 | 8992.0000   | 383                | 2010 | 6.8300  | 29.8200 | 24.2400 | 39.1100 | 9518.0000   |
| 354                | 2010 | 2.6200  | 32.9400 | 17.4500 | 46.9900 | 11814.0000  | 384                | 2010 | 4.0000  | 25.2500 | 21.4600 | 49.2900 | 10894.0000  |
| 355                | 2010 | 3.0800  | 29.0100 | 43.5400 | 24.3700 | 7000.0000   | 385                | 2010 | 8.8600  | 38.3600 | 18.1900 | 34.5900 | 9864.0000   |
| 356                | 2010 | 2.9000  | 29.3100 | 42.1900 | 25.6000 | 7227.0000   | 386                | 2010 | 3.3700  | 39.5000 | 21.4600 | 35.6700 | 10961.0000  |
| 357                | 2010 | 2.5400  | 31.6300 | 8.5700  | 57.2600 | 13162.0000  | 387                | 2010 | 12.7700 | 42.4600 | 20.2500 | 24.5200 | 8679.0000   |
| 358                | 2010 | 2.8900  | 25.1000 | 46.3400 | 25.6700 | 6732.0000   | 388                | 2010 | 10.2400 | 37.5100 | 16.3500 | 35.9000 | 9712.0000   |
| 359                | 2010 | 2.7300  | 10.8200 | 7.4900  | 78.9600 | 13606.0000  | 389                | 2010 | 11.7900 | 44.4200 | 11.1800 | 32.6100 | 10390.0000  |
| 360                | 2010 | 11.0600 | 42.0800 | 14.4800 | 32.3800 | 9633.0000   | 390                | 2010 | 9.0500  | 37.2000 | 22.3300 | 31.4200 | 9447.0000   |
| 361                | 2010 | 10.8900 | 46.2000 | 6.4600  | 36.4500 | 10523.0000  | 391                | 2010 | 7.9500  | 35.8900 | 11.3900 | 44.7700 | 11405.0000  |
| 362                | 2010 | 9.0400  | 41.3500 | 16.3500 | 33.2600 | 9612.0000   | 392                | 2010 | 3.3100  | 35.8800 | 17.6300 | 43.1800 | 11577.0000  |
| 363                | 2010 | 7.6800  | 43.1100 | 5.5900  | 43.6200 | 11782.0000  | 393                | 2010 | 6.0800  | 30.7300 | 17.8200 | 45.3700 | 11120.0000  |
| 364                | 2010 | 5.5400  | 24.9400 | 15.2900 | 54.2300 | 11668.0000  | 394                | 2010 | 3.8000  | 23.8200 | 15.6700 | 56.7100 | 12085.0000  |
| 365                | 2010 | 2.7100  | 32.9800 | 17.1700 | 47.1400 | 11727.0000  | 395                | 2010 | 2.7300  | 10.8200 | 7.4900  | 78.9600 | 13606.0000  |
| 366                | 2010 | 3.2300  | 31.9200 | 32.2100 | 32.6400 | 8860.0000   | 396                | 2010 | 8.6700  | 41.3000 | 31.8000 | 18.2300 | 7770.6000   |
| 367                | 2010 | 2.5600  | 19.8100 | 10.2600 | 67.3700 | 13211.0000  | 397                | 2010 | 3.8200  | 12.1400 | 11.4600 | 72.5800 | 12560.0000  |
| 368                | 2010 | 10.1900 | 40.8200 | 13.7800 | 35.2100 | 10275.0000  | 398                | 2010 | 3.1500  | 36.3800 | 17.9600 | 42.5100 | 11485.0000  |
| 369                | 2010 | 2.5600  | 30.3800 | 12.2800 | 54.7800 | 12624.0000  | 399                | 2010 | 2.9900  | 37.5200 | 17.9200 | 41.5700 | 11588.0000  |
| 370                | 2010 | 8.3700  | 34.0200 | 19.4400 | 38.1700 | 9675.0000   | 400                | 2010 | 2.9300  | 36.6800 | 19.1800 | 41.2100 | 11408.0000  |
| 371                | 2010 | 11.6400 | 41.0300 | 21.6000 | 25.7300 | 8273.0000   | 401                | 2010 | 6.4600  | 28.8600 | 33.7900 | 30.8900 | 7800.0000   |
| 372                | 2010 | 9.2300  | 37.3200 | 30.0000 | 23.4500 | 7335.0000   | 402                | 2010 | 7.3300  | 42.4600 | 16.8400 | 33.3700 | 9881.0000   |
| 373                | 2010 | 3.3500  | 27.0900 | 13.7400 | 55.8200 | 11978.0000  | 403                | 2010 | 10.7400 | 44.7900 | 20.7800 | 23.6900 | 8484.0000   |
| 374                | 2010 | 10.2900 | 43.5400 | 9.4900  | 36.6800 | 10560.0000  | 404                | 2010 | 2.7200  | 23.1800 | 10.4700 | 63.6300 | 13039.0000  |
| 375                | 2010 | 5.1500  | 36.4800 | 20.2600 | 38.1100 | 10896.0000  | 405                | 2010 | 9.4600  | 39.9600 | 12.9000 | 37.6800 | 10659.0000  |
| 376                | 2010 | 3.5000  | 32.8200 | 22.2500 | 41.4300 | 10696.0000  | 406                | 2010 | 8.8400  | 39.0100 | 18.2300 | 33.9200 | 9667.0000   |
| 377                | 2010 | 2.5400  | 34.7300 | 13.2200 | 49.5100 | 12539.0000  | 407                | 2010 | 9.1700  | 38.7700 | 19.5500 | 32.5100 | 9518.0000   |
| 378                | 2010 | 9.6000  | 37.8600 | 27.7000 | 24.8400 | 7829.0000   | 408                | 2010 | 2.3900  | 37.4300 | 9.2600  | 50.9200 | 13047.0000  |
| 379                | 2010 | 13.1600 | 41.4800 | 22.5800 | 22.7800 | 8050.0000   | 409                | 2010 | 6.1600  | 30.2400 | 24.8800 | 38.7200 | 9663.0000   |
| 380                | 2010 | 3.4100  | 30.5500 | 33.0000 | 33.0400 | 9181.0000   | 410                | 2010 | 3.7900  | 3.8500  | 17.5900 | 74.7700 | 11717.0000  |
| 381                | 2010 | 3.3300  | 25.7500 | 33.9400 | 36.9800 | 8889.0000   | 411                | 2010 | 5.0700  | 5.1100  | 19.1000 | 70.7200 | 10943.0000  |

Tabla 8 de 14. Datos utilizados para el cálculo de las correlaciones (801 datos)

| PARÁMETROS MEDIDOS |      |         |         |         |         |             | PARÁMETROS MEDIDOS |      |         |         |         |         |             |
|--------------------|------|---------|---------|---------|---------|-------------|--------------------|------|---------|---------|---------|---------|-------------|
| No.                | Año  | M (%)   | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) | No.                | Año  | M (%)   | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) |
| 412                | 2010 | 10.9300 | 10.9600 | 28.2900 | 49.8200 | 7702.0000   | 442                | 2010 | 2.1200  | 20.1100 | 11.7700 | 66.0000 | 13116.0000  |
| 413                | 2010 | 3.1300  | 3.0700  | 7.1600  | 86.6400 | 13226.0000  | 443                | 2010 | 6.7600  | 38.4100 | 22.4900 | 32.3400 | 9162.0000   |
| 414                | 2010 | 3.1600  | 3.1100  | 18.5700 | 75.1600 | 11790.0000  | 444                | 2010 | 6.0600  | 37.5300 | 21.6100 | 34.8000 | 9396.0000   |
| 415                | 2010 | 4.2500  | 38.5500 | 18.6200 | 38.5800 | 10656.0000  | 445                | 2010 | 5.7000  | 34.1600 | 33.8600 | 26.2800 | 7565.0000   |
| 416                | 2010 | 2.3000  | 36.3400 | 9.4000  | 51.9600 | 13255.0000  | 446                | 2010 | 1.9800  | 20.4100 | 11.3400 | 66.2700 | 13416.0000  |
| 417                | 2010 | 6.2900  | 31.3000 | 23.0700 | 39.3400 | 9883.0000   | 447                | 2010 | 2.8500  | 40.6300 | 11.2100 | 45.3100 | 13323.0000  |
| 418                | 2010 | 2.2000  | 38.2500 | 9.7400  | 49.8100 | 13202.0000  | 448                | 2010 | 3.2300  | 39.7500 | 14.0000 | 43.0200 | 11991.0000  |
| 419                | 2010 | 7.4600  | 36.5200 | 8.8800  | 47.1400 | 11939.0000  | 449                | 2010 | 4.8400  | 31.3100 | 33.6800 | 30.1700 | 6897.0000   |
| 420                | 2010 | 11.7500 | 51.6900 | 12.3400 | 24.2200 | 9692.0000   | 450                | 2010 | 1.8600  | 21.1000 | 9.7300  | 67.3100 | 13586.0000  |
| 421                | 2010 | 6.8100  | 32.4600 | 29.5600 | 31.1700 | 8570.0000   | 451                | 2010 | 2.7100  | 41.4400 | 7.2000  | 48.6500 | 13584.0000  |
| 422                | 2010 | 2.8800  | 39.0000 | 12.0900 | 46.0300 | 12464.0000  | 452                | 2010 | 2.9300  | 41.2500 | 9.0800  | 46.7400 | 13233.0000  |
| 423                | 2010 | 12.1900 | 52.7500 | 10.8500 | 24.2100 | 9893.0000   | 453                | 2010 | 2.4800  | 39.2100 | 3.0700  | 55.2400 | 13377.0000  |
| 424                | 2010 | 9.6100  | 42.2100 | 29.8900 | 18.2900 | 7514.0000   | 454                | 2010 | 2.4500  | 40.7000 | 6.5700  | 50.2800 | 13855.0000  |
| 425                | 2010 | 2.9000  | 37.8700 | 16.5300 | 42.7000 | 11997.0000  | 455                | 2010 | 5.8700  | 41.5000 | 11.8500 | 40.7800 | 11378.0000  |
| 426                | 2010 | 2.2600  | 38.0100 | 15.0200 | 44.7100 | 12332.0000  | 456                | 2010 | 1.7600  | 20.9200 | 9.2100  | 68.1100 | 13788.0000  |
| 427                | 2010 | 2.5200  | 37.3000 | 14.3900 | 45.7900 | 12380.0000  | 457                | 2010 | 2.6500  | 35.1800 | 21.4900 | 40.6800 | 11199.0000  |
| 428                | 2010 | 2.9700  | 31.9300 | 20.9900 | 44.1100 | 11814.0000  | 458                | 2010 | 3.1800  | 43.0100 | 7.6600  | 46.1500 | 12971.0000  |
| 429                | 2010 | 10.3500 | 44.1200 | 23.2600 | 22.2700 | 8312.0000   | 459                | 2010 | 5.0500  | 35.8100 | 26.0100 | 33.1300 | 9129.0000   |
| 430                | 2010 | 10.2400 | 48.4400 | 17.8800 | 23.4400 | 9134.0000   | 460                | 2010 | 3.7600  | 34.9200 | 23.6400 | 37.6800 | 10613.0000  |
| 431                | 2010 | 11.1700 | 46.7800 | 11.5100 | 30.5400 | 10034.0000  | 461                | 2010 | 2.8500  | 34.0600 | 23.7700 | 39.3200 | 10769.0000  |
| 432                | 2010 | 6.6700  | 40.1600 | 23.5000 | 29.6700 | 9561.0000   | 462                | 2010 | 10.9400 | 52.2200 | 8.1700  | 28.6700 | 10779.0000  |
| 433                | 2010 | 4.0500  | 34.3300 | 22.4600 | 39.1600 | 10820.0000  | 463                | 2010 | 4.8300  | 32.0600 | 36.9400 | 26.1700 | 7623.0000   |
| 434                | 2010 | 3.0500  | 37.7400 | 15.7100 | 43.5000 | 11914.0000  | 464                | 2010 | 2.1300  | 20.4700 | 4.4800  | 72.9200 | 13357.0000  |
| 435                | 2010 | 2.1800  | 20.1100 | 11.0000 | 66.7100 | 13225.0000  | 465                | 2010 | 2.2300  | 21.7600 | 10.2100 | 65.8000 | 13411.0000  |
| 436                | 2010 | 8.9400  | 39.2700 | 13.9300 | 37.8600 | 10516.0000  | 466                | 2010 | 4.1600  | 42.0400 | 10.5000 | 43.3000 | 12558.0000  |
| 437                | 2010 | 6.9200  | 18.5200 | 19.7300 | 54.8300 | 4809.0000   | 467                | 2010 | 3.2300  | 42.8800 | 8.6700  | 45.2200 | 13013.0000  |
| 438                | 2010 | 9.8200  | 22.3500 | 26.0100 | 41.8200 | 6368.0000   | 468                | 2010 | 3.2000  | 39.3300 | 8.9800  | 48.4900 | 13088.0000  |
| 439                | 2010 | 4.1200  | 37.1500 | 17.5200 | 41.2100 | 11621.0000  | 469                | 2010 | 4.9000  | 17.6800 | 32.1500 | 45.2700 | 8229.0000   |
| 440                | 2010 | 2.0700  | 20.2300 | 8.3900  | 69.3100 | 13684.0000  | 470                | 2010 | 5.2600  | 38.7800 | 18.9400 | 37.0200 | 10293.0000  |
| 441                | 2010 | 2.0800  | 20.3200 | 10.2900 | 67.3100 | 13455.0000  | 471                | 2010 | 6.0500  | 35.3200 | 30.5800 | 28.0500 | 8068.0000   |

Tabla 9 de 14. Datos utilizados para el cálculo de las correlaciones (801 datos)

| PARÁMETROS MEDIDOS |      |         |         |         |         |             | PARÁMETROS MEDIDOS |      |         |         |         |         |             |
|--------------------|------|---------|---------|---------|---------|-------------|--------------------|------|---------|---------|---------|---------|-------------|
| No.                | Año  | M (%)   | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) | No.                | Año  | M (%)   | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) |
| 472                | 2010 | 3.0800  | 42.9700 | 10.5100 | 43.4400 | 12754.0000  | 502                | 2011 | 9.2800  | 39.7500 | 14.2600 | 36.7100 | 10060.0000  |
| 473                | 2010 | 3.1900  | 41.1600 | 12.5400 | 43.1100 | 12398.0000  | 503                | 2011 | 8.5100  | 38.7700 | 16.1600 | 36.5600 | 10010.0000  |
| 474                | 2010 | 3.2000  | 41.5700 | 9.4600  | 45.7700 | 12922.0000  | 504                | 2011 | 2.9300  | 33.6400 | 13.0300 | 50.4000 | 12423.0000  |
| 475                | 2010 | 3.8100  | 27.3100 | 29.9000 | 38.9800 | 9582.0000   | 505                | 2011 | 3.3100  | 33.4200 | 11.7300 | 51.5400 | 12522.0000  |
| 476                | 2010 | 5.0800  | 21.6800 | 22.7700 | 50.4700 | 9496.0000   | 506                | 2011 | 1.5400  | 19.9500 | 21.9500 | 56.5600 | 11642.0000  |
| 477                | 2010 | 10.1100 | 38.1400 | 18.1700 | 33.5800 | 9014.0000   | 507                | 2011 | 5.1600  | 36.0400 | 16.3400 | 42.4600 | 10550.0000  |
| 478                | 2010 | 6.2200  | 29.2800 | 30.7900 | 33.7100 | 7882.0000   | 508                | 2011 | 4.9800  | 35.4200 | 18.6500 | 40.9500 | 10253.0000  |
| 479                | 2010 | 3.8700  | 41.2800 | 11.1700 | 43.6800 | 12362.0000  | 509                | 2011 | 9.9000  | 41.9500 | 9.3400  | 38.8100 | 10522.0000  |
| 480                | 2010 | 10.1100 | 37.2200 | 11.9700 | 40.7000 | 10421.0000  | 510                | 2011 | 11.2000 | 43.6800 | 5.6100  | 39.5100 | 10937.0000  |
| 481                | 2010 | 4.1900  | 39.4300 | 10.4900 | 45.8900 | 12475.0000  | 511                | 2011 | 11.3100 | 44.2200 | 4.4400  | 40.0300 | 11020.0000  |
| 482                | 2010 | 3.5400  | 36.9800 | 15.4700 | 44.0100 | 11834.0000  | 512                | 2011 | 2.6600  | 37.9900 | 18.7800 | 40.5700 | 11465.0000  |
| 483                | 2010 | 6.6000  | 29.3500 | 29.3700 | 34.6800 | 8027.0000   | 513                | 2011 | 2.9300  | 38.6000 | 2.1300  | 56.3400 | 13879.0000  |
| 484                | 2010 | 6.1700  | 30.4100 | 29.1900 | 34.2300 | 8027.0000   | 514                | 2011 | 3.0900  | 36.4100 | 12.3300 | 48.1700 | 12221.0000  |
| 485                | 2010 | 10.2500 | 42.5700 | 9.0400  | 38.1400 | 10329.0000  | 515                | 2011 | 3.0400  | 36.2000 | 11.5400 | 49.2200 | 12370.0000  |
| 486                | 2010 | 6.6300  | 36.5000 | 15.4100 | 41.4600 | 10108.0000  | 516                | 2011 | 2.7000  | 39.3900 | 7.2300  | 50.6800 | 13032.0000  |
| 487                | 2010 | 6.9200  | 37.7500 | 11.8500 | 43.4800 | 10388.0000  | 517                | 2011 | 3.1100  | 37.0700 | 11.0700 | 48.7500 | 12637.0000  |
| 488                | 2010 | 1.6100  | 30.9900 | 11.9300 | 55.4700 | 13134.0000  | 518                | 2011 | 3.0900  | 36.2900 | 10.6200 | 50.0000 | 12740.0000  |
| 489                | 2010 | 4.0500  | 30.8700 | 15.6200 | 49.4600 | 11099.0000  | 519                | 2011 | 3.0500  | 37.0900 | 9.6500  | 50.2100 | 12961.0000  |
| 490                | 2010 | 1.3700  | 31.4700 | 9.0500  | 58.1100 | 13663.0000  | 520                | 2011 | 2.9400  | 36.5300 | 10.5300 | 50.0000 | 12841.0000  |
| 491                | 2010 | 5.8800  | 45.3300 | 12.0800 | 36.7100 | 10306.0000  | 521                | 2011 | 3.3900  | 36.1200 | 10.1700 | 50.3200 | 12708.0000  |
| 492                | 2011 | 10.8500 | 67.1700 | 2.6500  | 19.3300 | 7077.0000   | 522                | 2011 | 3.5100  | 36.5200 | 9.0900  | 50.8800 | 12874.0000  |
| 493                | 2011 | 2.9300  | 33.6400 | 13.0300 | 50.4000 | 12423.0000  | 523                | 2011 | 3.6600  | 36.3700 | 9.3500  | 50.6200 | 12838.0000  |
| 494                | 2011 | 2.8100  | 33.9800 | 14.2000 | 49.0100 | 12290.0000  | 524                | 2011 | 3.4100  | 36.6000 | 8.3400  | 51.6500 | 13033.0000  |
| 495                | 2011 | 2.5200  | 32.6100 | 10.8200 | 54.0500 | 13029.0000  | 525                | 2011 | 3.5300  | 35.6200 | 10.9900 | 49.8600 | 12510.0000  |
| 496                | 2011 | 3.4800  | 33.8900 | 11.8500 | 50.7800 | 12530.0000  | 526                | 2011 | 2.8000  | 35.1200 | 9.7800  | 52.3000 | 12973.0000  |
| 497                | 2011 | 3.2100  | 34.2900 | 11.8300 | 50.6700 | 12632.0000  | 527                | 2011 | 6.0000  | 37.7600 | 15.6200 | 40.6200 | 10919.0000  |
| 498                | 2011 | 2.9200  | 33.5900 | 12.3900 | 51.1000 | 12550.0000  | 528                | 2011 | 5.7600  | 36.8800 | 16.5100 | 40.8500 | 10891.0000  |
| 499                | 2011 | 9.1900  | 39.7800 | 14.1200 | 36.9100 | 10162.0000  | 529                | 2011 | 3.7000  | 28.5500 | 27.2300 | 40.5200 | 9689.0000   |
| 500                | 2011 | 8.9100  | 38.8800 | 15.9400 | 36.2700 | 9878.0000   | 530                | 2011 | 4.1000  | 26.8600 | 25.8000 | 43.2400 | 9988.0000   |
| 501                | 2011 | 9.2000  | 39.6900 | 14.4500 | 36.6600 | 9886.0000   | 531                | 2011 | 6.4100  | 38.0900 | 15.9700 | 39.5300 | 10578.0000  |

Tabla 10 de 14. Datos utilizados para el cálculo de las correlaciones (801 datos)

| PARÁMETROS MEDIDOS |      |         |         |         |         |             | PARÁMETROS MEDIDOS |      |         |         |         |         |             |
|--------------------|------|---------|---------|---------|---------|-------------|--------------------|------|---------|---------|---------|---------|-------------|
| No.                | Año  | M (%)   | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) | No.                | Año  | M (%)   | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) |
| 532                | 2011 | 6.9100  | 38.6800 | 16.7300 | 37.6800 | 10392.0000  | 562                | 2011 | 5.4900  | 26.9800 | 22.4800 | 45.0500 | 10004.0000  |
| 533                | 2011 | 3.6500  | 32.6800 | 24.4400 | 39.2300 | 10022.0000  | 563                | 2011 | 4.7200  | 23.6000 | 21.4300 | 50.2500 | 10624.0000  |
| 534                | 2011 | 5.3000  | 37.3300 | 18.1600 | 39.2100 | 10391.0000  | 564                | 2011 | 4.8900  | 24.6400 | 20.8000 | 49.6700 | 10359.0000  |
| 535                | 2011 | 10.2100 | 45.0400 | 10.2400 | 34.5100 | 10512.0000  | 565                | 2011 | 4.5500  | 26.6500 | 22.7000 | 46.1000 | 10324.0000  |
| 536                | 2011 | 5.9700  | 39.9100 | 12.4700 | 41.6500 | 11166.0000  | 566                | 2011 | 3.2900  | 30.9100 | 19.8600 | 45.9400 | 11289.0000  |
| 537                | 2011 | 3.8000  | 13.6600 | 19.7100 | 62.8300 | 11486.0000  | 567                | 2011 | 3.9500  | 33.8200 | 12.5700 | 49.6600 | 12172.0000  |
| 538                | 2011 | 11.1700 | 46.3100 | 7.2400  | 35.2800 | 10831.4100  | 568                | 2011 | 9.9200  | 32.7400 | 20.7400 | 36.6000 | 8734.0000   |
| 539                | 2011 | 11.9000 | 48.1100 | 5.2200  | 34.7700 | 10931.9400  | 569                | 2011 | 10.9000 | 33.6200 | 17.9200 | 37.5600 | 8995.0000   |
| 540                | 2011 | 6.6900  | 30.2300 | 41.0700 | 22.0100 | 6636.0000   | 570                | 2011 | 6.8900  | 26.4500 | 25.7100 | 40.9500 | 8176.0000   |
| 541                | 2011 | 3.7500  | 28.1900 | 32.8600 | 35.2000 | 8385.0000   | 571                | 2011 | 3.0800  | 20.2100 | 32.2800 | 44.4300 | 9347.0000   |
| 542                | 2011 | 4.3500  | 35.8400 | 15.4600 | 44.3500 | 11449.0000  | 572                | 2011 | 1.2500  | 24.0800 | 15.6500 | 59.0200 | 12826.0000  |
| 543                | 2011 | 6.6600  | 36.2800 | 17.2400 | 39.8200 | 10794.0000  | 573                | 2011 | 2.2500  | 19.9500 | 40.4800 | 37.3200 | 8006.0000   |
| 544                | 2011 | 13.7200 | 46.0400 | 12.5000 | 27.7400 | 9374.0000   | 574                | 2011 | 1.3000  | 20.8300 | 22.6200 | 55.2500 | 11627.0000  |
| 545                | 2011 | 12.2600 | 43.1000 | 18.1300 | 26.5100 | 8902.0000   | 575                | 2011 | 3.3000  | 27.3900 | 29.6400 | 39.6700 | 9505.0000   |
| 546                | 2011 | 1.6950  | 18.1950 | 14.5850 | 65.5250 | 12969.2700  | 576                | 2011 | 3.5500  | 23.5800 | 27.2900 | 45.5800 | 9957.0000   |
| 547                | 2011 | 4.7200  | 23.6000 | 21.4300 | 50.2500 | 10624.0000  | 577                | 2011 | 2.6000  | 26.2100 | 30.7300 | 40.4600 | 9447.0000   |
| 548                | 2011 | 2.7600  | 22.7000 | 35.3400 | 39.2000 | 8933.0000   | 578                | 2011 | 1.8800  | 20.6400 | 30.2300 | 47.2500 | 9951.0000   |
| 549                | 2011 | 1.4400  | 23.8400 | 18.5700 | 56.1500 | 12134.0000  | 579                | 2011 | 1.2400  | 21.8100 | 28.3200 | 48.6300 | 10526.0000  |
| 550                | 2011 | 2.3900  | 21.7900 | 32.3000 | 43.5200 | 9258.0000   | 580                | 2011 | 2.4400  | 20.1000 | 32.6000 | 44.8600 | 9337.0000   |
| 551                | 2011 | 0.5200  | 58.8400 | 0.2400  | 40.4000 | 14978.0000  | 581                | 2011 | 2.4000  | 25.7900 | 36.7700 | 35.0400 | 8312.0000   |
| 552                | 2011 | 0.5500  | 73.3600 | 0.9000  | 25.1900 | 15785.0000  | 582                | 2011 | 3.2200  | 35.4700 | 14.1400 | 47.1700 | 11871.0000  |
| 553                | 2011 | 10.1200 | 67.5800 | 5.3600  | 16.9400 | 6666.0000   | 583                | 2011 | 8.1900  | 43.4200 | 9.3900  | 39.0000 | 11116.0000  |
| 554                | 2011 | 10.2400 | 67.9000 | 5.8000  | 16.0600 | 6605.0000   | 584                | 2011 | 4.7700  | 34.5100 | 25.7800 | 34.9400 | 9390.0000   |
| 555                | 2011 | 10.2700 | 67.7000 | 5.2400  | 16.7900 | 6723.0000   | 585                | 2011 | 4.7600  | 34.6300 | 25.2900 | 35.3200 | 9376.0000   |
| 556                | 2011 | 10.2700 | 67.4100 | 7.0300  | 15.2900 | 6740.0000   | 586                | 2011 | 2.6900  | 35.1800 | 12.3300 | 49.8000 | 12482.0000  |
| 557                | 2011 | 4.4100  | 26.0900 | 22.2500 | 47.2500 | 10363.0000  | 587                | 2011 | 2.6200  | 34.4600 | 14.1400 | 48.7800 | 12423.0000  |
| 558                | 2011 | 4.8200  | 27.2700 | 21.8600 | 46.0500 | 10223.0000  | 588                | 2011 | 2.9400  | 34.1000 | 17.8700 | 45.0900 | 11822.0000  |
| 559                | 2011 | 3.7600  | 29.0800 | 14.0600 | 53.1000 | 12235.0000  | 589                | 2011 | 2.8000  | 35.0100 | 13.3500 | 48.8400 | 12444.0000  |
| 560                | 2011 | 12.9400 | 26.3100 | 14.7900 | 45.9600 | 9344.0000   | 590                | 2011 | 11.5700 | 44.1100 | 14.1400 | 30.1800 | 9458.0000   |
| 561                | 2011 | 5.1400  | 23.6200 | 23.1500 | 48.0900 | 10272.0000  | 591                | 2011 | 10.4800 | 43.4400 | 14.1300 | 31.9500 | 9842.0000   |

Tabla 11 de 14. Datos utilizados para el cálculo de las correlaciones (801 datos)

| PARÁMETROS MEDIDOS |      |        |         |         |         |             | PARÁMETROS MEDIDOS |      |         |         |         |         |             |
|--------------------|------|--------|---------|---------|---------|-------------|--------------------|------|---------|---------|---------|---------|-------------|
| No.                | Año  | M (%)  | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) | No.                | Año  | M (%)   | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) |
| 592                | 2011 | 3.6500 | 27.5500 | 38.3900 | 30.4100 | 7965.0000   | 622                | 2011 | 3.6000  | 31.5800 | 27.9300 | 36.8900 | 9660.0000   |
| 593                | 2011 | 2.5700 | 30.9500 | 39.7300 | 26.7500 | 7867.0000   | 623                | 2011 | 3.2900  | 27.4100 | 34.3800 | 34.9200 | 8798.0000   |
| 594                | 2011 | 3.9800 | 32.4800 | 27.3200 | 36.2200 | 9544.0000   | 624                | 2011 | 3.3000  | 27.4100 | 34.4700 | 34.8200 | 8794.0000   |
| 595                | 2011 | 4.6800 | 30.2100 | 33.6600 | 31.4500 | 8348.0000   | 625                | 2011 | 3.3000  | 27.3200 | 34.6500 | 34.7300 | 8801.0000   |
| 596                | 2011 | 3.5700 | 27.8800 | 37.0600 | 31.4900 | 8105.0000   | 626                | 2011 | 4.9100  | 33.9900 | 25.1700 | 35.9300 | 9875.0000   |
| 597                | 2011 | 3.5700 | 32.3200 | 24.7100 | 39.4000 | 10215.0000  | 627                | 2011 | 3.7300  | 30.5500 | 41.3600 | 24.3600 | 7115.0000   |
| 598                | 2011 | 3.0800 | 30.2600 | 42.4500 | 24.2100 | 7154.0000   | 628                | 2011 | 3.4500  | 30.5700 | 40.2300 | 25.7500 | 7387.0000   |
| 599                | 2011 | 5.2900 | 29.2600 | 36.2000 | 29.2500 | 7915.0000   | 629                | 2011 | 2.6500  | 32.4300 | 21.1400 | 43.7800 | 11129.0000  |
| 600                | 2011 | 4.9900 | 32.1900 | 40.4900 | 22.3300 | 6907.0000   | 630                | 2011 | 5.9200  | 32.2600 | 32.7000 | 29.1200 | 8262.0000   |
| 601                | 2011 | 2.9700 | 31.0700 | 39.8000 | 26.1600 | 7707.0000   | 631                | 2011 | 3.0500  | 27.2200 | 36.6400 | 33.0900 | 8432.0000   |
| 602                | 2011 | 3.5800 | 30.0200 | 32.5500 | 33.8500 | 8849.0000   | 632                | 2011 | 3.3400  | 30.6600 | 41.2000 | 24.8000 | 7144.0000   |
| 603                | 2011 | 2.2400 | 31.6400 | 36.9000 | 29.2200 | 8507.0000   | 633                | 2011 | 3.3400  | 30.2200 | 42.1300 | 24.3100 | 7097.0000   |
| 604                | 2011 | 3.8800 | 29.1500 | 25.7400 | 41.2300 | 10089.0000  | 634                | 2011 | 2.6600  | 32.5100 | 21.3600 | 43.4700 | 11132.0000  |
| 605                | 2011 | 3.2700 | 31.2900 | 39.8600 | 25.5800 | 7444.0000   | 635                | 2011 | 11.2600 | 42.7300 | 19.2700 | 26.7400 | 8987.0000   |
| 606                | 2011 | 2.6600 | 30.6100 | 40.9000 | 25.8300 | 7472.0000   | 636                | 2011 | 5.6700  | 37.0700 | 20.5100 | 36.7500 | 9870.0000   |
| 607                | 2011 | 3.9500 | 32.1000 | 27.1600 | 36.7900 | 9800.0000   | 637                | 2011 | 2.9100  | 33.9500 | 18.5300 | 44.6100 | 11598.0000  |
| 608                | 2011 | 4.0600 | 28.8400 | 35.2700 | 31.8300 | 8266.0000   | 638                | 2011 | 2.9700  | 33.6100 | 20.3700 | 43.0500 | 11058.0000  |
| 609                | 2011 | 4.2700 | 33.5800 | 26.2200 | 35.9300 | 9753.0000   | 639                | 2011 | 3.9600  | 29.7100 | 30.3600 | 35.9700 | 9372.0000   |
| 610                | 2011 | 4.0700 | 28.8300 | 35.7700 | 31.3300 | 8226.0000   | 640                | 2011 | 5.8300  | 35.6700 | 14.4000 | 44.1000 | 10715.0000  |
| 611                | 2011 | 3.6800 | 31.5000 | 28.9500 | 35.8700 | 9554.0000   | 641                | 2011 | 5.2200  | 33.4600 | 27.9200 | 33.4000 | 8731.0000   |
| 612                | 2011 | 2.5600 | 33.8400 | 17.5700 | 46.0300 | 11772.0000  | 642                | 2011 | 10.9200 | 42.8200 | 16.3400 | 29.9200 | 9288.0000   |
| 613                | 2011 | 2.8400 | 29.8400 | 22.1500 | 45.1700 | 10857.0000  | 643                | 2011 | 11.9000 | 44.6700 | 12.2300 | 31.2000 | 9909.0000   |
| 614                | 2011 | 4.2300 | 31.8000 | 46.3500 | 17.6200 | 6198.0000   | 644                | 2011 | 5.6900  | 35.2500 | 24.9900 | 34.0700 | 9273.0000   |
| 615                | 2011 | 3.7200 | 32.8200 | 25.6400 | 37.8200 | 10074.0000  | 645                | 2011 | 3.8600  | 33.3900 | 23.9600 | 38.7900 | 10204.0000  |
| 616                | 2011 | 3.5800 | 31.4200 | 32.9600 | 32.0400 | 8707.0000   | 646                | 2011 | 6.5700  | 34.8000 | 26.5900 | 32.0400 | 8895.0000   |
| 617                | 2011 | 4.2600 | 25.5900 | 34.7800 | 35.3700 | 7919.0000   | 647                | 2011 | 10.0400 | 38.3900 | 29.0600 | 22.5100 | 7586.0000   |
| 618                | 2011 | 2.7200 | 33.7300 | 20.2000 | 43.3500 | 11197.0000  | 648                | 2011 | 3.4300  | 34.3100 | 13.2500 | 49.0100 | 12233.0000  |
| 619                | 2011 | 3.7800 | 28.7100 | 36.9000 | 30.6100 | 7962.0000   | 649                | 2011 | 3.0200  | 32.3600 | 22.9000 | 41.7200 | 10657.0000  |
| 620                | 2011 | 4.8300 | 32.2900 | 40.6900 | 22.1900 | 6522.0000   | 650                | 2011 | 2.6700  | 33.9200 | 14.0700 | 49.3400 | 12225.0000  |
| 621                | 2011 | 4.3500 | 31.7500 | 41.6200 | 22.2800 | 6103.0000   | 651                | 2011 | 3.7900  | 38.3400 | 8.6100  | 49.2600 | 12663.0000  |

Tabla 12 de 14. Datos utilizados para el cálculo de las correlaciones (801 datos)

| PARÁMETROS MEDIDOS |      |         |         |         |         |             | PARÁMETROS MEDIDOS |      |        |         |         |         |             |
|--------------------|------|---------|---------|---------|---------|-------------|--------------------|------|--------|---------|---------|---------|-------------|
| No.                | Año  | M (%)   | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) | No.                | Año  | M (%)  | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) |
| 652                | 2011 | 5.3000  | 36.9800 | 16.8300 | 40.8900 | 10491.0000  | 682                | 2011 | 2.7900 | 34.7700 | 14.0800 | 48.3600 | 12008.0000  |
| 653                | 2011 | 3.8400  | 29.0500 | 32.5600 | 34.5500 | 8841.0000   | 683                | 2011 | 3.2700 | 35.4900 | 13.8400 | 47.4000 | 12187.0000  |
| 654                | 2011 | 4.4400  | 31.6600 | 28.5600 | 35.3400 | 9311.0000   | 684                | 2011 | 3.7800 | 33.3100 | 35.0500 | 27.8600 | 8209.0000   |
| 655                | 2011 | 3.0500  | 33.4300 | 21.7200 | 41.8000 | 10719.0000  | 685                | 2011 | 6.6200 | 35.1400 | 25.3400 | 32.9000 | 8652.0000   |
| 656                | 2011 | 4.0900  | 29.5100 | 31.5200 | 34.8800 | 8935.0000   | 686                | 2011 | 3.6500 | 34.2100 | 21.3700 | 40.7700 | 10901.0000  |
| 657                | 2011 | 3.0900  | 33.7900 | 21.8400 | 41.2800 | 10711.0000  | 687                | 2011 | 3.9400 | 34.1900 | 16.2300 | 45.6400 | 11674.0000  |
| 658                | 2011 | 3.4800  | 27.3300 | 32.8600 | 36.3300 | 8835.0000   | 688                | 2011 | 4.9100 | 33.6200 | 27.0900 | 34.3800 | 9923.0000   |
| 659                | 2011 | 3.4200  | 30.6600 | 38.3700 | 27.5500 | 7641.0000   | 689                | 2011 | 2.6300 | 34.2800 | 17.5900 | 45.5000 | 11631.0000  |
| 660                | 2011 | 2.8100  | 33.0200 | 22.0600 | 42.1100 | 10770.0000  | 690                | 2011 | 6.2200 | 35.9400 | 23.6100 | 34.2300 | 9191.0000   |
| 661                | 2011 | 3.2100  | 32.3800 | 23.3700 | 41.0400 | 10389.0000  | 691                | 2011 | 3.1100 | 29.7200 | 24.3900 | 42.7800 | 10569.0000  |
| 662                | 2011 | 2.5700  | 32.1400 | 35.6000 | 29.6900 | 8354.0000   | 692                | 2011 | 2.5500 | 34.0500 | 18.0100 | 45.3900 | 11608.0000  |
| 663                | 2011 | 2.0600  | 43.3200 | 8.1500  | 46.4700 | 13294.0000  | 693                | 2011 | 2.2800 | 35.4100 | 11.1800 | 51.1300 | 12927.0000  |
| 664                | 2011 | 3.9200  | 36.5000 | 12.8000 | 46.7800 | 11946.0000  | 694                | 2011 | 4.8200 | 27.7900 | 24.3300 | 43.0600 | 10498.0000  |
| 665                | 2011 | 3.4200  | 36.3700 | 12.1900 | 48.0200 | 12291.0000  | 695                | 2011 | 2.2800 | 35.2700 | 11.6900 | 50.7600 | 12881.0000  |
| 666                | 2011 | 12.1500 | 43.6600 | 17.9100 | 26.2800 | 8722.0000   | 696                | 2011 | 3.6700 | 33.7700 | 20.1400 | 42.4200 | 11039.0000  |
| 667                | 2011 | 12.3300 | 41.7400 | 22.0100 | 23.9200 | 8248.0000   | 697                | 2011 | 3.8700 | 34.6600 | 22.0700 | 39.4000 | 10636.0000  |
| 668                | 2011 | 9.9900  | 41.3300 | 17.0300 | 31.6500 | 9575.0000   | 698                | 2011 | 2.3700 | 34.5200 | 12.0800 | 51.0300 | 12771.0000  |
| 669                | 2011 | 15.7300 | 47.9700 | 12.5200 | 23.7800 | 8649.0000   | 699                | 2011 | 5.3800 | 33.3200 | 24.6700 | 36.6300 | 9396.0000   |
| 670                | 2011 | 10.8000 | 39.0600 | 25.7200 | 24.4200 | 7928.0000   | 700                | 2011 | 2.0700 | 31.0200 | 29.9300 | 36.9800 | 9724.0000   |
| 671                | 2011 | 4.9200  | 36.1600 | 19.4600 | 39.4600 | 10241.0000  | 701                | 2011 | 3.3000 | 27.7700 | 26.0900 | 42.8400 | 10024.0000  |
| 672                | 2011 | 2.9700  | 36.3000 | 11.2500 | 49.4800 | 12635.0000  | 702                | 2011 | 2.4000 | 30.4400 | 28.2100 | 38.9500 | 9707.0000   |
| 673                | 2011 | 2.9600  | 36.1400 | 11.3300 | 49.5700 | 12622.0000  | 703                | 2011 | 2.7000 | 25.6800 | 28.4600 | 43.1600 | 10144.0000  |
| 674                | 2011 | 2.9600  | 36.3500 | 11.3600 | 49.3300 | 12563.0000  | 704                | 2011 | 3.1400 | 33.0200 | 20.7500 | 43.0900 | 11190.0000  |
| 675                | 2011 | 5.1100  | 40.6700 | 19.7600 | 34.4600 | 10135.0000  | 705                | 2011 | 7.6600 | 39.3700 | 21.8500 | 31.1200 | 10254.0000  |
| 676                | 2011 | 1.6200  | 14.2900 | 48.2200 | 35.8700 | 6985.0000   | 706                | 2011 | 4.9800 | 36.6800 | 21.1600 | 37.1800 | 9191.0000   |
| 677                | 2011 | 3.0900  | 32.0300 | 31.8800 | 33.0000 | 9247.0000   | 707                | 2011 | 2.9300 | 33.3200 | 21.0500 | 42.7000 | 11115.0000  |
| 678                | 2011 | 4.1000  | 22.6500 | 33.1900 | 40.0600 | 8617.0000   | 708                | 2011 | 3.0300 | 33.6900 | 19.2800 | 44.0000 | 11310.0000  |
| 679                | 2011 | 7.2000  | 35.6900 | 26.7900 | 30.3200 | 8558.0000   | 709                | 2011 | 3.1300 | 33.4200 | 21.4900 | 41.9600 | 10883.0000  |
| 680                | 2011 | 3.0100  | 34.6400 | 14.2600 | 48.0900 | 12153.0000  | 710                | 2011 | 2.9400 | 29.1900 | 24.3600 | 43.5100 | 10044.0000  |
| 681                | 2011 | 4.3900  | 35.0900 | 19.1300 | 41.3900 | 10861.0000  | 711                | 2011 | 3.0500 | 34.2300 | 17.4300 | 45.2900 | 11547.0000  |



Tabla 13 de 14. Datos utilizados para el cálculo de las correlaciones (801 datos)

| PARÁMETROS MEDIDOS |      |         |         |         |         |             | PARÁMETROS MEDIDOS |      |         |         |         |         |             |
|--------------------|------|---------|---------|---------|---------|-------------|--------------------|------|---------|---------|---------|---------|-------------|
| No.                | Año  | M (%)   | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) | No.                | Año  | M (%)   | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) |
| 712                | 2011 | 2.7400  | 29.9400 | 22.4200 | 44.9000 | 11095.0000  | 742                | 2011 | 9.6500  | 38.0400 | 29.9200 | 22.3900 | 7512.0000   |
| 713                | 2011 | 2.2000  | 19.1000 | 32.4300 | 46.2700 | 9769.0000   | 743                | 2011 | 9.5700  | 37.1700 | 30.7600 | 22.5000 | 7210.0000   |
| 714                | 2011 | 11.5200 | 46.4300 | 5.6400  | 36.4100 | 10946.0000  | 744                | 2011 | 9.0700  | 36.4600 | 31.7700 | 22.7000 | 7199.0000   |
| 715                | 2011 | 11.2400 | 43.4400 | 14.4000 | 30.9200 | 9429.0000   | 745                | 2011 | 1.8900  | 40.1100 | 15.8300 | 42.1700 | 11915.0000  |
| 716                | 2011 | 3.6000  | 30.2500 | 24.5800 | 41.5700 | 9963.0000   | 746                | 2011 | 8.7900  | 37.0100 | 29.4800 | 24.7200 | 7728.0000   |
| 717                | 2011 | 3.5400  | 28.4100 | 26.8600 | 41.1900 | 9553.0000   | 747                | 2011 | 3.0400  | 26.7000 | 46.7300 | 23.5300 | 6175.0000   |
| 718                | 2011 | 10.7700 | 43.0500 | 14.6600 | 31.5200 | 9457.0000   | 748                | 2011 | 11.1500 | 45.1600 | 9.0800  | 34.6100 | 10466.0000  |
| 719                | 2011 | 11.1900 | 45.7800 | 12.3100 | 30.7200 | 9793.0000   | 749                | 2011 | 4.0100  | 31.8900 | 16.6200 | 47.4800 | 11782.0000  |
| 720                | 2011 | 3.7800  | 31.5200 | 22.6300 | 42.0700 | 10448.0000  | 750                | 2011 | 6.6500  | 31.7800 | 29.1200 | 32.4500 | 8201.0000   |
| 721                | 2011 | 3.0600  | 30.2600 | 27.2200 | 39.4600 | 10176.0000  | 751                | 2011 | 6.8500  | 31.2400 | 36.4200 | 25.4900 | 7078.0000   |
| 722                | 2011 | 5.5600  | 32.2500 | 28.9600 | 33.2300 | 9106.0000   | 752                | 2011 | 3.6000  | 28.1100 | 39.8200 | 28.4700 | 7530.0000   |
| 723                | 2011 | 6.0700  | 36.7900 | 20.1100 | 37.0300 | 10335.0000  | 753                | 2011 | 2.6500  | 25.4000 | 44.4100 | 27.5400 | 7141.0000   |
| 724                | 2011 | 5.2700  | 32.8800 | 22.5300 | 39.3200 | 9652.0000   | 754                | 2011 | 3.8300  | 28.2600 | 35.9900 | 31.9200 | 8479.0000   |
| 725                | 2011 | 8.4900  | 36.9500 | 24.6600 | 29.9000 | 8475.0000   | 755                | 2011 | 4.0800  | 17.6800 | 35.9300 | 42.3100 | 8533.0000   |
| 726                | 2011 | 4.6800  | 32.7600 | 27.6900 | 34.8700 | 9436.0000   | 756                | 2011 | 4.1100  | 27.4300 | 34.0200 | 34.4400 | 8583.0000   |
| 727                | 2011 | 9.6600  | 43.1100 | 9.5800  | 37.6500 | 10769.0000  | 757                | 2011 | 5.0600  | 35.9400 | 19.9400 | 39.0600 | 10344.0000  |
| 728                | 2011 | 3.6100  | 34.3000 | 20.4600 | 41.6300 | 10844.0000  | 758                | 2011 | 23.1900 | 46.8300 | 16.4400 | 13.5400 | 6723.0000   |
| 729                | 2011 | 5.4200  | 34.1000 | 23.3000 | 37.1800 | 9579.0000   | 759                | 2011 | 6.1000  | 29.0700 | 43.1700 | 21.6600 | 6199.0000   |
| 730                | 2011 | 6.3300  | 31.4900 | 32.6600 | 29.5200 | 7677.0000   | 760                | 2011 | 6.4000  | 31.3600 | 35.3900 | 26.8500 | 7229.0000   |
| 731                | 2011 | 5.7800  | 30.8200 | 33.3800 | 30.0200 | 7489.0000   | 761                | 2011 | 7.2800  | 33.8600 | 32.6800 | 26.1800 | 7539.0000   |
| 732                | 2011 | 2.6400  | 26.0100 | 34.5900 | 36.7600 | 8937.0000   | 762                | 2011 | 6.1900  | 38.1100 | 16.9600 | 38.7400 | 10034.0000  |
| 733                | 2011 | 5.3200  | 34.1500 | 23.2800 | 37.2500 | 9559.0000   | 763                | 2011 | 6.8500  | 36.9000 | 17.6800 | 38.5700 | 9708.0000   |
| 734                | 2011 | 9.9900  | 39.5500 | 23.4200 | 27.0400 | 8351.0000   | 764                | 2011 | 5.1300  | 33.5000 | 26.4200 | 34.9500 | 8893.0000   |
| 735                | 2011 | 4.2300  | 30.9100 | 33.1100 | 31.7500 | 8602.0000   | 765                | 2011 | 6.4600  | 32.1600 | 30.6100 | 30.7700 | 7772.0000   |
| 736                | 2011 | 3.2000  | 32.7700 | 36.0700 | 27.9600 | 8186.0000   | 766                | 2011 | 10.2700 | 39.9600 | 25.2200 | 24.5500 | 7972.0000   |
| 737                | 2011 | 5.2600  | 36.2700 | 13.2800 | 45.1900 | 11087.0000  | 767                | 2011 | 2.4500  | 27.7000 | 47.9100 | 21.9400 | 6151.0000   |
| 738                | 2011 | 3.0100  | 26.8500 | 40.0000 | 30.1400 | 7724.0000   | 768                | 2011 | 2.8900  | 24.3000 | 48.5400 | 24.2700 | 6259.0000   |
| 739                | 2011 | 4.4500  | 35.7400 | 18.6500 | 41.1600 | 10893.0000  | 769                | 2011 | 4.3800  | 30.9300 | 30.8700 | 33.8200 | 8440.0000   |
| 740                | 2011 | 3.7700  | 35.9500 | 15.9600 | 44.3200 | 11485.0000  | 770                | 2011 | 4.6600  | 26.3900 | 33.2000 | 35.7500 | 7926.0000   |
| 741                | 2011 | 9.2400  | 36.7500 | 29.3900 | 24.6200 | 7517.0000   | 771                | 2011 | 5.8600  | 34.7500 | 26.9400 | 32.4500 | 8730.0000   |

Tabla 14 de 14. Datos utilizados para el cálculo de las correlaciones (801 datos)

| No. | Año  | PARÁMETROS MEDIDOS |         |         |         |             |
|-----|------|--------------------|---------|---------|---------|-------------|
|     |      | M (%)              | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) |
| 772 | 2011 | 23.5900            | 43.7700 | 15.9400 | 16.7000 | 6557.0000   |
| 773 | 2011 | 3.9900             | 28.1500 | 39.4100 | 28.4500 | 7403.0000   |
| 774 | 2011 | 4.6100             | 33.5500 | 26.9500 | 34.8900 | 8987.0000   |
| 775 | 2011 | 4.2400             | 33.6100 | 20.2200 | 41.9300 | 10793.0000  |
| 776 | 2011 | 10.1900            | 41.8700 | 20.6300 | 27.3100 | 8964.0000   |
| 777 | 2011 | 4.6900             | 36.1400 | 18.7800 | 40.3900 | 10918.0000  |
| 778 | 2011 | 4.2000             | 29.8500 | 34.9600 | 30.9900 | 7758.0000   |
| 779 | 2011 | 4.1900             | 30.5300 | 32.1100 | 33.1700 | 8997.0000   |
| 780 | 2012 | 2.7600             | 15.8800 | 16.5100 | 64.8500 | 12101.0000  |
| 781 | 2012 | 1.7100             | 14.8200 | 11.9800 | 71.4900 | 13212.0000  |
| 782 | 2012 | 8.4900             | 35.0300 | 21.9800 | 34.5000 | 9252.0000   |
| 783 | 2012 | 8.0700             | 34.6200 | 22.9500 | 34.3600 | 9222.0000   |
| 784 | 2012 | 4.6300             | 25.9900 | 32.3500 | 37.0300 | 9126.0000   |
| 785 | 2012 | 4.3700             | 35.8300 | 16.2200 | 43.5800 | 10767.0000  |
| 786 | 2012 | 9.3500             | 39.8500 | 11.2100 | 39.5900 | 10478.0000  |
| 787 | 2012 | 10.5600            | 41.4300 | 10.4700 | 37.5400 | 10330.0000  |
| 788 | 2012 | 3.3400             | 25.3600 | 11.3100 | 59.9900 | 12374.0000  |
| 789 | 2012 | 1.5900             | 36.4200 | 17.2300 | 44.7600 | 11950.0000  |
| 790 | 2012 | 1.8600             | 37.6900 | 10.0200 | 50.4300 | 13286.0000  |
| 791 | 2012 | 2.1700             | 30.7500 | 34.6200 | 32.4600 | 8954.0000   |
| 792 | 2012 | 5.0000             | 38.8500 | 5.8900  | 50.2600 | 12448.0000  |
| 793 | 2012 | 2.2800             | 31.6200 | 17.4800 | 48.6200 | 12030.0000  |
| 794 | 2012 | 1.7900             | 32.4100 | 27.7800 | 38.0200 | 10271.0000  |
| 795 | 2012 | 3.4800             | 32.5100 | 22.6200 | 41.3900 | 10366.0000  |
| 796 | 2012 | 1.8800             | 27.1200 | 22.9700 | 48.0300 | 10898.0000  |
| 797 | 2012 | 11.4800            | 46.8600 | 4.4600  | 37.2000 | 11209.0000  |
| 798 | 2012 | 1.6000             | 19.8500 | 24.1200 | 54.4300 | 11341.0000  |
| 799 | 2012 | 4.0300             | 23.9600 | 13.3900 | 58.6200 | 11842.0000  |
| 800 | 2012 | 1.8700             | 29.8400 | 13.2200 | 55.0700 | 12985.0000  |
| 801 | 2012 | 2.1400             | 22.9200 | 36.9300 | 38.0100 | 8904.0000   |

### ANEXO 3

Tabla 1 de 3. Datos utilizados para comparación entre los valores de poder calorífico estimados y los valores reales

| No. | Año  | PARÁMETROS MEDIDOS |         |         |         |             | No. | Año  | PARÁMETROS MEDIDOS |         |         |         |             |
|-----|------|--------------------|---------|---------|---------|-------------|-----|------|--------------------|---------|---------|---------|-------------|
|     |      | M (%)              | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) |     |      | M (%)              | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) |
| 1   | 2012 | 10.4700            | 41.4900 | 15.3900 | 32.6500 | 9749.0000   | 28  | 2012 | 5.9500             | 37.2200 | 16.5200 | 40.3100 | 10337.0000  |
| 2   | 2012 | 4.6400             | 22.9500 | 30.6000 | 41.8100 | 9638.0000   | 29  | 2012 | 8.7200             | 35.3800 | 17.7100 | 38.1900 | 10599.0000  |
| 3   | 2012 | 6.0800             | 33.7400 | 22.6900 | 37.4900 | 9661.0000   | 30  | 2012 | 11.8500            | 40.7100 | 17.7500 | 29.6900 | 9077.0000   |
| 4   | 2012 | 4.3800             | 35.6500 | 15.5700 | 44.4000 | 9657.0000   | 31  | 2012 | 11.4800            | 40.8700 | 16.8600 | 30.7900 | 9620.0000   |
| 5   | 2012 | 7.5000             | 39.0800 | 18.1800 | 35.2400 | 9973.0000   | 32  | 2012 | 14.3400            | 43.6100 | 15.1600 | 26.8900 | 8997.0000   |
| 6   | 2012 | 3.4300             | 38.1200 | 7.4100  | 51.0400 | 13284.0000  | 33  | 2012 | 13.5700            | 43.2100 | 13.2900 | 29.9300 | 9494.0000   |
| 7   | 2012 | 1.1400             | 29.3500 | 13.3500 | 56.1600 | 13172.0000  | 34  | 2012 | 8.2700             | 37.9600 | 14.4200 | 39.3500 | 11026.0000  |
| 8   | 2012 | 6.4200             | 41.8600 | 11.1100 | 40.6100 | 10743.0000  | 35  | 2012 | 7.9200             | 30.3200 | 36.7700 | 24.9900 | 7547.0000   |
| 9   | 2012 | 1.1900             | 23.1300 | 36.7200 | 38.9600 | 8971.0000   | 36  | 2012 | 3.9800             | 16.9500 | 34.1900 | 44.8800 | 9001.0000   |
| 10  | 2012 | 1.9800             | 36.1900 | 12.0400 | 49.7900 | 12715.0000  | 37  | 2012 | 6.3300             | 28.9400 | 28.2400 | 36.4900 | 9496.0000   |
| 11  | 2012 | 4.3800             | 38.8900 | 8.2700  | 48.4600 | 12249.0000  | 38  | 2012 | 4.8700             | 23.6400 | 28.6200 | 42.8700 | 9847.0000   |
| 12  | 2012 | 8.4900             | 43.3000 | 8.2800  | 39.9300 | 11052.0000  | 39  | 2012 | 2.7500             | 42.1400 | 3.3100  | 51.8000 | 14143.0000  |
| 13  | 2012 | 1.8800             | 26.3000 | 34.2600 | 37.5600 | 9240.0000   | 40  | 2012 | 10.5300            | 42.9900 | 13.2900 | 33.1900 | 9912.0000   |
| 14  | 2012 | 2.6600             | 35.3400 | 12.0300 | 49.9700 | 12633.0000  | 41  | 2012 | 7.5800             | 42.8400 | 10.9300 | 38.6500 | 10863.0000  |
| 15  | 2012 | 5.7500             | 42.0500 | 7.5500  | 44.6500 | 11481.0000  | 42  | 2012 | 4.6200             | 42.2200 | 5.0700  | 48.0900 | 12555.0000  |
| 16  | 2012 | 1.3600             | 26.8700 | 31.0200 | 40.7500 | 9972.0000   | 43  | 2012 | 3.6300             | 36.5400 | 12.2300 | 47.6000 | 12289.0000  |
| 17  | 2012 | 2.1800             | 35.0400 | 11.9800 | 50.8000 | 12823.0000  | 44  | 2012 | 3.2600             | 33.8200 | 12.2900 | 50.6300 | 12239.0000  |
| 18  | 2012 | 2.0500             | 31.7700 | 10.9000 | 55.2800 | 13154.0000  | 45  | 2012 | 9.3700             | 43.5800 | 8.7600  | 38.2900 | 10946.0000  |
| 19  | 2012 | 3.7200             | 30.4800 | 31.8700 | 33.9300 | 8866.0000   | 46  | 2012 | 7.1200             | 25.1500 | 25.2000 | 42.5300 | 10175.0000  |
| 20  | 2012 | 3.7100             | 29.6000 | 10.6800 | 56.0100 | 12559.0000  | 47  | 2012 | 6.3300             | 21.8800 | 31.1500 | 40.6400 | 8698.0000   |
| 21  | 2012 | 0.9000             | 26.3500 | 23.4300 | 49.3200 | 11672.0000  | 48  | 2012 | 8.9900             | 42.3700 | 11.5100 | 37.1300 | 10503.0000  |
| 22  | 2012 | 1.2900             | 30.9100 | 16.9200 | 50.8800 | 12416.0000  | 49  | 2012 | 5.2500             | 40.2300 | 6.9150  | 47.6050 | 12082.2300  |
| 23  | 2012 | 2.4500             | 35.5700 | 8.8300  | 53.1500 | 13427.0000  | 50  | 2012 | 10.9100            | 43.9500 | 10.5700 | 34.5700 | 10201.0000  |
| 24  | 2012 | 2.3800             | 35.2000 | 9.7800  | 52.6400 | 13275.0000  | 51  | 2012 | 4.0300             | 37.4400 | 11.7000 | 46.8300 | 12143.0000  |
| 25  | 2012 | 4.5100             | 40.1800 | 6.6000  | 48.7100 | 12473.0000  | 52  | 2012 | 1.2800             | 24.7400 | 8.0800  | 65.9000 | 14153.0000  |
| 26  | 2012 | 3.7100             | 28.5000 | 36.0500 | 31.7400 | 8050.0000   | 53  | 2012 | 11.6500            | 45.2200 | 7.4700  | 35.6600 | 10632.0000  |
| 27  | 2012 | 5.3000             | 35.3500 | 21.2900 | 38.0600 | 9736.0000   | 54  | 2012 | 11.9200            | 45.6300 | 6.9400  | 35.5100 | 10652.0000  |

Tabla 2 de 3. Datos utilizados para comparación entre los valores de poder calorífico estimados y los valores reales

| PARÁMETROS MEDIDOS |      |         |         |         |         |             | PARÁMETROS MEDIDOS |      |         |         |         |         |             |
|--------------------|------|---------|---------|---------|---------|-------------|--------------------|------|---------|---------|---------|---------|-------------|
| No.                | Año  | M (%)   | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) | No.                | Año  | M (%)   | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) |
| 55                 | 2012 | 4.1400  | 37.5700 | 12.0100 | 46.2800 | 12181.0000  | 85                 | 2012 | 2.2900  | 31.5400 | 15.4400 | 50.7300 | 12444.0000  |
| 56                 | 2012 | 4.2400  | 37.5500 | 11.4200 | 46.7900 | 12295.0000  | 86                 | 2012 | 1.9400  | 30.0600 | 13.6900 | 54.3100 | 12917.0000  |
| 57                 | 2012 | 1.6400  | 38.5200 | 10.8900 | 48.9500 | 13244.0000  | 87                 | 2012 | 2.1500  | 29.0500 | 30.5900 | 38.2100 | 9632.0000   |
| 58                 | 2012 | 2.2700  | 27.1900 | 26.7100 | 43.8300 | 10393.0000  | 88                 | 2012 | 5.0900  | 32.7900 | 21.0600 | 41.0600 | 10458.0000  |
| 59                 | 2012 | 2.3000  | 27.7300 | 27.4800 | 42.4900 | 10299.0000  | 89                 | 2012 | 4.3800  | 32.1300 | 24.4100 | 39.0800 | 9684.0000   |
| 60                 | 2012 | 3.7600  | 31.8000 | 19.5600 | 44.8800 | 11331.0000  | 90                 | 2012 | 9.8600  | 41.8300 | 12.6300 | 35.6800 | 10095.0000  |
| 61                 | 2012 | 1.6600  | 27.2200 | 45.5600 | 25.5600 | 7179.0000   | 91                 | 2012 | 1.8200  | 27.9400 | 13.5700 | 56.6700 | 12946.0000  |
| 62                 | 2012 | 1.7900  | 30.9200 | 34.8200 | 32.4700 | 8587.0000   | 92                 | 2012 | 2.2000  | 31.9800 | 12.8400 | 52.9800 | 12951.0000  |
| 63                 | 2012 | 1.6300  | 31.2800 | 30.2400 | 36.8500 | 9785.0000   | 93                 | 2012 | 6.4300  | 30.3200 | 35.7900 | 27.4600 | 7965.0000   |
| 64                 | 2012 | 4.1400  | 35.2700 | 17.3300 | 43.2600 | 11105.0000  | 94                 | 2012 | 9.2000  | 36.2900 | 21.5100 | 33.0000 | 9404.0000   |
| 65                 | 2012 | 2.2100  | 29.7200 | 28.8600 | 39.2100 | 10018.0000  | 95                 | 2012 | 7.0300  | 22.2300 | 31.7600 | 38.9800 | 8753.0000   |
| 66                 | 2012 | 6.8200  | 40.1200 | 10.1700 | 42.8900 | 11496.0000  | 96                 | 2012 | 7.9100  | 26.5700 | 26.3000 | 39.2200 | 9668.0000   |
| 67                 | 2012 | 11.4500 | 44.4600 | 11.1400 | 32.9500 | 10062.0000  | 97                 | 2012 | 1.9300  | 31.5600 | 16.4300 | 50.0800 | 12273.0000  |
| 68                 | 2012 | 2.9400  | 33.3400 | 14.1300 | 49.5900 | 12324.0000  | 98                 | 2012 | 3.2600  | 33.8600 | 11.4700 | 51.4100 | 12684.0000  |
| 69                 | 2012 | 3.3200  | 31.4800 | 13.6800 | 51.5200 | 12392.0000  | 99                 | 2012 | 3.2900  | 33.3600 | 11.9100 | 51.4400 | 12669.0000  |
| 70                 | 2012 | 4.8700  | 33.0900 | 22.9800 | 39.0600 | 10079.0000  | 100                | 2012 | 4.0600  | 36.4700 | 12.6800 | 46.7900 | 12251.0000  |
| 71                 | 2012 | 2.2600  | 29.6900 | 25.8900 | 42.1600 | 10394.0000  | 101                | 2012 | 4.0400  | 36.5300 | 12.7000 | 46.7300 | 12336.0000  |
| 72                 | 2012 | 1.8200  | 31.5100 | 24.1700 | 42.5000 | 10862.0000  | 102                | 2012 | 5.5700  | 32.7200 | 23.7500 | 37.9600 | 9986.0000   |
| 73                 | 2012 | 2.2000  | 32.7500 | 11.0300 | 54.0200 | 13021.0000  | 103                | 2012 | 5.1100  | 33.2700 | 23.0700 | 38.5500 | 10204.0000  |
| 74                 | 2012 | 3.6600  | 33.7300 | 14.5500 | 48.0600 | 11978.0000  | 104                | 2012 | 9.6600  | 39.3500 | 21.7000 | 29.2900 | 8627.0000   |
| 75                 | 2012 | 3.5500  | 34.1100 | 15.0900 | 47.2500 | 11907.0000  | 105                | 2012 | 5.6300  | 28.6700 | 35.6200 | 30.0800 | 8103.0000   |
| 76                 | 2012 | 11.5200 | 44.3400 | 10.8500 | 33.2900 | 10031.0000  | 106                | 2012 | 6.5400  | 36.0700 | 26.7400 | 30.6500 | 9342.0000   |
| 77                 | 2012 | 6.7100  | 35.5400 | 21.1400 | 36.6100 | 9896.0000   | 107                | 2012 | 12.1100 | 40.1000 | 20.6700 | 27.1200 | 8492.0000   |
| 78                 | 2012 | 6.1900  | 35.0000 | 20.5800 | 38.2300 | 10042.0000  | 108                | 2012 | 10.5400 | 38.0600 | 21.7300 | 29.6700 | 8716.0000   |
| 79                 | 2012 | 4.5700  | 33.8600 | 18.8800 | 42.6900 | 10783.0000  | 109                | 2012 | 8.5600  | 25.5200 | 31.1200 | 34.8000 | 8997.0000   |
| 80                 | 2012 | 3.7900  | 31.7100 | 23.4500 | 41.0500 | 10368.0000  | 110                | 2012 | 11.1800 | 42.0100 | 14.7700 | 32.0400 | 9655.0000   |
| 81                 | 2012 | 3.2800  | 33.8000 | 19.5200 | 43.4000 | 10958.0000  | 111                | 2012 | 11.5200 | 43.0700 | 11.0800 | 34.3300 | 10225.0000  |
| 82                 | 2012 | 8.2700  | 40.8100 | 12.7700 | 38.1500 | 10611.0000  | 112                | 2012 | 4.6300  | 35.4400 | 19.0700 | 40.8600 | 10925.0000  |
| 83                 | 2012 | 3.4800  | 33.0900 | 13.3700 | 50.0600 | 12335.0000  | 113                | 2012 | 4.9300  | 32.3900 | 25.4200 | 37.2600 | 9659.0000   |
| 84                 | 2012 | 2.9700  | 29.7000 | 13.6000 | 53.7300 | 12610.0000  | 114                | 2012 | 0.8200  | 29.4000 | 11.7800 | 58.0000 | 13758.0000  |

Tabla 3 de 3. Datos utilizados para comparación entre los valores de poder calorífico estimados y los valores reales

| PARÁMETROS MEDIDOS |      |         |         |         |         |             | PARÁMETROS MEDIDOS |      |         |         |         |         |             |
|--------------------|------|---------|---------|---------|---------|-------------|--------------------|------|---------|---------|---------|---------|-------------|
| No.                | Año  | M (%)   | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) | No.                | Año  | M (%)   | VM (%)  | A(%)    | FC (%)  | HHV(BTU/Lb) |
| 115                | 2012 | 5.2900  | 36.0200 | 17.1900 | 41.5000 | 10465.0000  | 145                | 2012 | 7.8100  | 39.5000 | 15.4800 | 37.2100 | 10055.0000  |
| 116                | 2012 | 11.7400 | 45.5700 | 8.2200  | 34.4700 | 10476.0000  | 146                | 2012 | 8.0200  | 40.0900 | 14.9900 | 36.9000 | 10068.0000  |
| 117                | 2012 | 11.8300 | 45.9200 | 6.8900  | 35.3600 | 10626.0000  | 147                | 2012 | 7.4200  | 39.8900 | 13.4900 | 39.2000 | 10426.0000  |
| 118                | 2012 | 11.8500 | 46.0600 | 6.1600  | 35.9300 | 10721.0000  | 148                | 2012 | 7.4600  | 39.5700 | 14.6000 | 38.3700 | 10261.0000  |
| 119                | 2012 | 11.8000 | 45.8500 | 7.1400  | 35.2100 | 10571.0000  | 149                | 2012 | 7.3300  | 39.7500 | 13.7300 | 39.1900 | 10415.0000  |
| 120                | 2012 | 11.8000 | 45.9500 | 6.5400  | 35.7100 | 10643.0000  | 150                | 2012 | 10.8600 | 43.6700 | 9.9700  | 35.5000 | 10118.0000  |
| 121                | 2012 | 11.7700 | 45.9300 | 7.2300  | 35.0700 | 10570.0000  | 151                | 2012 | 11.2700 | 43.3900 | 11.9100 | 33.4300 | 9747.0000   |
| 122                | 2012 | 2.8500  | 32.1200 | 12.1400 | 52.8900 | 12744.0000  | 152                | 2012 | 11.0200 | 43.0600 | 12.5400 | 33.3800 | 9715.0000   |
| 123                | 2012 | 3.4500  | 35.2600 | 11.8800 | 49.4100 | 12552.0000  | 153                | 2012 | 11.0700 | 43.2700 | 12.2500 | 33.4100 | 9742.0000   |
| 124                | 2012 | 3.8500  | 37.1100 | 11.5800 | 47.4600 | 12439.0000  | 154                | 2012 | 10.8700 | 42.8200 | 13.2700 | 33.0400 | 9644.0000   |
| 125                | 2012 | 3.5600  | 35.6400 | 12.5700 | 48.2300 | 12552.0000  | 155                | 2012 | 3.7900  | 24.8100 | 26.1500 | 45.2500 | 10327.0000  |
| 126                | 2012 | 3.8300  | 35.0900 | 14.8100 | 46.2700 | 11684.0000  | 156                | 2012 | 5.0600  | 22.4900 | 33.0000 | 39.4500 | 8965.0000   |
| 127                | 2012 | 3.1600  | 35.4500 | 10.0800 | 51.3100 | 12902.0000  | 157                | 2012 | 3.5700  | 23.1000 | 23.4200 | 49.9100 | 10818.0000  |
| 128                | 2012 | 10.3800 | 38.1800 | 24.0300 | 27.4100 | 8400.0000   | 158                | 2012 | 5.5300  | 26.2600 | 33.6400 | 34.5700 | 8347.0000   |
| 129                | 2012 | 3.4700  | 26.4800 | 37.5400 | 32.5100 | 8172.0000   | -                  | -    | -       | -       | -       | -       | -           |
| 130                | 2012 | 3.5400  | 19.3600 | 33.1000 | 44.0000 | 9211.0000   | -                  | -    | -       | -       | -       | -       | -           |
| 131                | 2012 | 3.9500  | 20.5400 | 30.8300 | 44.6800 | 9651.0000   | -                  | -    | -       | -       | -       | -       | -           |
| 132                | 2012 | 3.6100  | 23.1900 | 35.5900 | 37.6100 | 8656.0000   | -                  | -    | -       | -       | -       | -       | -           |
| 133                | 2012 | 2.9900  | 35.8600 | 10.5600 | 50.5900 | 12880.0000  | -                  | -    | -       | -       | -       | -       | -           |
| 134                | 2012 | 2.9800  | 35.6800 | 10.5900 | 50.7500 | 12909.0000  | -                  | -    | -       | -       | -       | -       | -           |
| 135                | 2012 | 2.9100  | 35.0600 | 11.1400 | 50.8900 | 12846.0000  | -                  | -    | -       | -       | -       | -       | -           |
| 136                | 2012 | 2.9000  | 35.3600 | 12.7000 | 49.0400 | 12951.0000  | -                  | -    | -       | -       | -       | -       | -           |
| 137                | 2012 | 2.9300  | 35.1000 | 10.1100 | 51.8600 | 12989.0000  | -                  | -    | -       | -       | -       | -       | -           |
| 138                | 2012 | 3.0000  | 35.3000 | 10.6100 | 51.0900 | 12914.0000  | -                  | -    | -       | -       | -       | -       | -           |
| 139                | 2012 | 3.0000  | 35.6600 | 10.2100 | 51.1300 | 12923.0000  | -                  | -    | -       | -       | -       | -       | -           |
| 140                | 2012 | 3.3200  | 34.8700 | 14.1100 | 47.7000 | 11723.0000  | -                  | -    | -       | -       | -       | -       | -           |
| 141                | 2012 | 3.7400  | 35.6400 | 14.3900 | 46.2300 | 11424.0000  | -                  | -    | -       | -       | -       | -       | -           |
| 142                | 2012 | 3.8600  | 35.0900 | 14.3800 | 46.6700 | 11485.0000  | -                  | -    | -       | -       | -       | -       | -           |
| 143                | 2012 | 10.1700 | 51.7000 | 5.1800  | 32.9500 | 10836.0000  | -                  | -    | -       | -       | -       | -       | -           |
| 144                | 2012 | 3.3300  | 36.8600 | 7.9100  | 51.9000 | 12623.0000  | -                  | -    | -       | -       | -       | -       | -           |

