

ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE CARBONO NEGRO EN EL MATERIAL  
PARTICULADO FINO PM2.5 EN LA INDUSTRIA LADRILLERA DE LOS  
DEPARTAMENTOS NORTE DE SANTANDER Y SANTANDER

YESIKA DURAN LEÓN  
SHARITZ DANIELA MANTILLA ESCOBAR

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
SECCIONAL BUCARAMANGA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

2018

ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE CARBONO NEGRO EN EL MATERIAL  
PARTICULADO FINO PM2.5 EN LA INDUSTRIA LADRILLERA DE LOS  
DEPARTAMENTOS NORTE DE SANTANDER Y SANTANDER

YESIKA DURAN LEÓN  
SHARITZ DANIELA MANTILLA ESCOBAR

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO  
AMBIENTAL

Director  
PhD. KENTO TARO MAGARA GÓMEZ

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
SECCIONAL BUCARAMANGA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

2018

NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

FIRMA PRESIDENTE DEL JURADO

---

FIRMA DEL JURADO

---

FIRMA DEL JURADO

Bucaramanga, febrero 05 de 2018

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente, damos gracias a Dios por ser nuestra guía y fortaleza para lograr las metas que nos hemos propuesto en la vida.

A nuestra familia por el apoyo incondicional durante este proceso, por la motivación, el esfuerzo y por sembrar en nosotros la educación.

Agradecemos a nuestro director, el profesor Kento, por su valioso aporte y orientación, por brindarnos las pautas necesarias para llevar a cabo con éxito nuestro proyecto de grado.

Así mismo, queremos hacer extensivo nuestro agradecimiento a la UPB, CAEM y CCAC por toda la colaboración y por la oportunidad de participar en esta labor investigativa, además del apoyo logístico prestado y a todas las personas que contribuyeron de diferentes maneras a la realización de este proyecto.

También queremos agradecer a nuestros compañeros de estudio, por el cariño, la comprensión y el apoyo.

Gracias infinitas.

## CONTENIDO

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO.....	13
GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE .....	14
INTRODUCCIÓN .....	15
1. OBJETIVOS.....	17
1.1. OBJETIVO GENERAL .....	17
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2. ANTECEDENTES.....	18
3. MARCO TEORICO.....	22
3.1. FACTOR DE EMISIÓN .....	24
3.2. MATERIAL PARTICULADO FINO.....	24
3.3. CARBONO NEGRO .....	25
3.4. CARBONO NEGRO PROVENIENTE DE LA INDUSTRIA LADRILLERA.....	26
3.5. CARACTERIZACIÓN DE LOS HORNOS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA LADRILLERA.....	27
3.5.1. <i>Funcionamiento y clasificación de los hornos intermitentes.....</i>	27
3.5.2. <i>Funcionamiento y clasificación de los hornos Semicontínuos.....</i>	28
3.5.3. <i>Funcionamiento y clasificación de los hornos Continuos.....</i>	29
3.5.4. <i>Hornos Artesanales.....</i>	29
3.6. HORNOS SELECCIONADOS PARA LA EJECUCION DE ESTE PROYECTO.....	30
3.6.1. <i>Horno fuego dormido.....</i>	30
3.6.2. <i>Horno Colmena .....</i>	31
3.6.3. <i>Horno Hoffman.....</i>	32
3.7. EQUIPO RATNOZE2.....	34

3.7.1.	SOFTWARE ASOCIADO AL EQUIPO RATNOZE2: .....	35
3.7.2.	Pasos ejecutados en el software RatnozeDataCruncher.....	39
3.8.	<b>CONSUMO DE COMBUSTIBLE ESPECÍFICO (SEC)</b> .....	41
4.	<b>METODOLOGÍA</b> .....	43
4.1.	<b>UBICACIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO</b> .....	43
4.2.	<b>METODOLOGÍA DE MEDICIÓN</b> .....	44
4.3.	<b>MÉTODO DE LABORATORIO</b> .....	46
4.3.1.	<i>Análisis gravimétrico</i> .....	46
4.3.2.	<i>Análisis óptico</i> .....	47
4.3.3.	<i>Análisis de combustible</i> .....	47
4.4.	<b>CÁLCULO DEL CONSUMO ESPECIFICO DE ENERGÍA (SEC) PARA LOS TRES HORNOS EN CUESTIÓN</b> .....	47
4.5.	<b>CÁLCULO DE LOS FACTORES DE EMISIÓN DE BC DE ACUERDO AL TIPO DE COMBUSTIBLE, CONSUMO ENERGÉTICO Y PRODUCCIÓN DE LADRILLO PARA LOS HORNOS DE ESTUDIO</b> .....	48
4.6.	<b>DETERMINACIÓN DE LAS EMISIONES DE PM2.5 Y CARBONO NEGRO PARA LOS HORNOS LADRILLEROS DE LOS DEPARTAMENTOS NORTE DE SANTANDER Y SANTANDER</b> .....	51
4.7.	<b>COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LA INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR LA CORPORACIÓN AMBIENTAL EMPRESARIAL DE UN HORNO ARTESANAL DEL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA</b> .....	52
5.	<b>RESULTADOS</b> .....	53
5.1.	<b>ANÁLISIS DE COMBUSTIBLE</b> .....	53
5.2.	<b>EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS HORNOS EN CUESTIÓN</b> .....	55
5.3.	<b>FACTORES DE EMISIÓN PARA PM2.5 Y BC</b> .....	56
5.4.	<b>TASAS DE EMISIÓN DE PM2.5 Y BC DE LOS HORNOS LADRILLEROS EN ESTUDIO</b> .....	58
5.5.	<b>CONCENTRACIONES DE PM2.5 Y BC EN HORNOS DE EMPRESAS LADRILLERAS</b> .....	61
5.6.	<b>CONCENTRACIÓN DE CO, CO<sub>2</sub>, PM2.5 Y BC</b> .....	65

<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>67</b>
<b>7.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>69</b>
<b>9.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>75</b>

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Registro de factores de emisión de PM2.5 y BC.....	21
Tabla 2 Resultados del Análisis de Combustible (como se recibe en el laboratorio) .....	53
Tabla 3 Tabla 3 Resultados del Análisis de Combustible (base seca).....	54
Tabla 4 Resultados Eficiencia Energética Horno Artesanal.....	56
Tabla 5 Factores de emisión de PM2.5 basados en la producción de ladrillos, masa de combustible y consumo energético para la industria ladrillera .....	57
Tabla 6 Factores de emisión de BC basados en la producción de ladrillos, masa de combustible y consumo energético para la industria ladrillera .....	57
Tabla 7 Tasa de emisión de PM2.5 y BC en los Hornos Hoffman, Colmena y Fuego Dormido .....	59
Tabla 8 Datos colectados en campo - Evento 1.....	75
Tabla 9 Datos colectados en campo - Evento 2.....	76
Tabla 10 Datos colectados en campo - Evento 3.....	77
Tabla 11 Datos colectados en campo - Evento 4.....	78
Tabla 12 Datos colectados en campo - Evento 5.....	79
Tabla 13 Datos colectados en campo - Evento 6.....	80
Tabla 14 Datos colectados en campo - Evento 7.....	81
Tabla 15 Datos colectados en campo - Evento 8.....	82
Tabla 16 Datos colectados en campo - Evento 9.....	83
Tabla 17 Datos colectados en campo - Evento 10.....	84



Tabla 18 Datos colectados en campo - Evento 11.....	85
Tabla 19 Datos colectados en campo - Evento 12.....	86
Tabla 20 Datos registrados de filtros gravimétricos .....	87
Tabla 21 Datos registrados de contenido de BC.....	87
Tabla 22 Resultados Eficiencia Energética Horno Hoffman.....	88
Tabla 23 Resultados factores de emisión de PM2.5 para el horno Hoffman - Combustible Carbón .....	88
Tabla 24 Resultados factores de emisión de PM2.5 para el horno Colmena - Combustible Carbón .....	89
Tabla 25 Resultados factores de emisión de PM2.5 para horno Fuego Dormido - Combustible Carbón .....	89
Tabla 26 Resultados factores de emisión de Carbono negro (BC) para el horno Hoffman - Combustible Carbón.....	90
Tabla 27 Resultados factores de emisión de Carbono negro (BC) para el horno Colmena - Combustible Carbón.....	90
Tabla 28 Resultados factores de emisión de Carbono negro (BC) para el horno Fuego Dormido- Combustible Carbón .....	91
Tabla 29 Concentraciones en tiempo real de PM2.5 y BC en horno Hoffman .....	91
Tabla 30 Concentraciones en tiempo real de PM2.5 Y BC en horno Colmena.....	92
Tabla 31 Concentraciones en tiempo real de PM2.5 y BC en horno Fuego Dormido .....	92
Tabla 32 Concentraciones en tiempo real de gases, PM2.5 y BC .....	93

## LISTADO DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Emisión de PM2.5 y BC en hornos ladrilleros .....	60
Gráfico 2 Concentraciones de PM2.5 y BC.....	62
Gráfico 3 Relación BC/PM2.5 por evento de muestreo.....	63
Gráfico 4 Relación BC/PM2.5 por tecnología.....	64
Gráfico 5 Concentración de gases, PM2.5 Y BC .....	65

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Etapas del proceso para la producción de ladrillos.....	28
Figura 2 Esquema de funcionamiento del horno fuego dormido.....	31
Figura 3 Esquema del funcionamiento del horno Colmena .....	32
Figura 4 Esquema del funcionamiento del horno Hoffman .....	34
Figura 5 Equipo Ratnoze 2 .....	35
Figura 6 Sistema de archivos del software RatnozeDataCruncher.....	37
Figura 7 Diagrama de flujo RatnozeDataCruncher .....	38
Figura 8 Ubicación de la empresa ladrillera del departamento de Santander.....	43
Figura 9 Ubicación de la empresa ladrillera departamento de Norte de Santander .....	44
Figura 10 Contenido inicial RatnozeDataCruncher.py .....	50
Figura 11 Pasos de procesamiento de datos.....	51
Figura 12 Horno Fuego Dormido .....	61

## LISTADO DE ANEXOS

A Formato de recolección de datos en campo .....	75
B Datos del análisis gravimétrico de PM2.5.....	87
C Datos análisis de BC .....	87
D Información de producción y consumo de empresas ladrilleras .....	88
E Factores de emisión de PM2.5 según tipo de horno .....	88
F Factores de emisión de BC según tipo de horno .....	90
G Concentración de PM2.5 y BC para diferentes tipos de hornos.....	91
H Concentraciones en tiempo real de CO, CO2, SO2, PM2.5 y BC .....	93
I Resultados generados por el software.....	94

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE CARBONO NEGRO EN EL MATERIAL PARTICULADO FINO PM2.5 EN LA INDUSTRIA LADRILLERA DE LOS DEPARTAMENTOS NORTE DE SANTANDER Y SANTANDER

**AUTOR(ES):** Yesika Durán León  
Sharitz Daniela Mantilla Escobar

**PROGRAMA:** Facultad de Ingeniería Ambiental

**DIRECTOR(A):** Kento Taro Magara Gómez

### RESUMEN

Con el fin de determinar las emisiones de Material Particulado Fino (PM2.5) y Carbono Negro (BC por sus siglas en inglés) para el sector ladrillero, se llevaron a cabo dos muestreos en empresas ladrilleras seleccionadas con diferente tecnología, ubicadas en los departamentos de Santander y Norte de Santander, mediante un equipo isocinético diseñado específicamente para tomar muestras de Material Particulado Fino. Adicionalmente, se solicitó a la Corporación Ambiental Empresarial, información de un muestreo isocinético realizado en Cundinamarca en un horno ladrillero artesanal con el fin de comparar los tres tipos de tecnologías más usados en Colombia (Continuo, intermitente y artesanal). Se estimaron las emisiones promedio de BC, en un horno continuo (0.5896 g BC/h), horno intermitente (40.8915 g BC/h) y horno artesanal (0.3362 g BC/h) y para PM2.5 en horno continuo (7.8445 gPM2.5/h), horno intermitente (113.02257 gPM2.5/h) y horno artesanal (61.5938 gPM2.5/h) a partir de la relación de los factores de emisión de combustible promedio de cada uno de los contaminantes por la tasa de consumo de combustible. Se encontró que el horno Hoffman de tecnología continua consume menos combustible manteniendo su alta producción. Adicional a esto los valores de emisión y concentración resultaron muy bajos a comparación del horno Colmena y Fuego Dormido, considerándose así la mejor tecnología. Es recomendable que las empresas que utilicen hornos de tecnología artesanal, consideren mejorar su tecnología a una intermitente y las empresas que trabajen con una tecnología intermitente, mejorarla a una continua. En las empresas en las que el cambio de tecnología resulte difícil, se recomienda que la temperatura, alimentación de combustible y oxígeno se realicen de manera controlada, y de esta manera disminuir las emisiones de PM2.5 Y BC.

### PALABRAS CLAVE:

Material Particulado, Black Carbon, Industria ladrillera, Factor de Emisión, Tecnología

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

## GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

**TITLE:** ESTIMATION OF BLACK CARBON EMISSIONS IN FINE PARTICULATE MATTER PM<sub>2.5</sub> IN THE BRICK INDUSTRY OF NORTE DE SANTANDER AND SANTANDER DEPARTMENTS

**AUTHOR(S):** Yesika Durán León  
Sharitz Daniela Mantilla Escobar

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Ambiental

**DIRECTOR:** Kento Taro Magara Gómez

### ABSTRACT

In order to determine the emissions of Fine Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub>) and Black Carbon (BC) to brick sector, two samplings were carried out in selected brickworks companies with different technology, located in Santander and Norte de Santander departments, by isokinetic equipment designed specifically to take samples of Fine Particulate Matter. Additionally, we requested the information of an isokinetic sampling carried out in Cundinamarca in an artisanal brick kiln at CAEM in order to compare the three most used technologies in Colombia (Continuous, intermittent and artisanal) The average BC emissions were estimated, in a continuous kiln (0.5896 g BC / h), intermittent kiln (40.8915 g BC / h) and artisanal kiln (0.3362 g BC / h) and for PM<sub>2.5</sub> in continuous kiln (7.8445 g PM<sub>2.5</sub> / h), intermittent kiln (113.02257 g PM<sub>2.5</sub> / h) and artisanal kiln (61.5938 g PM<sub>2.5</sub> / h) from the ratio of the average fuel emission factors of each of the pollutants by the rate of fuel consumption. According to the results, the Hoffman continuous kiln technology, consumes less fuel while keeping its high production. In addition to this, the emission and concentration values were very low compared to the intermittent and artisanal kilns, thus being considered the best technology. We recommend that companies that use artisanal technology ovens, consider improving their technology to an intermittent and companies that work with an intermittent technology, improve it to a continuous one. In companies where the change of technology is difficult, it is recommended that the temperature, fuel supply and oxygen are made in a controlled manner, and thus reduce PM<sub>2.5</sub> and BC emissions.

### KEYWORDS:

Particulate Matter, Black Carbon, Brick Industry, Emission Factor, Technology

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, en Colombia las emisiones de Carbono Negro (BC, por sus siglas en inglés) no han sido suficientemente cuantificadas ni clasificadas por tipo de fuente ni procesos de combustión, además estas no están reguladas por la ley, lo cual aumenta la probabilidad de que un riesgo social y ambiental se materialice.

La reducción de emisiones de PM2.5 y BC puede tener un impacto importante e inmediato en la mitigación del calentamiento global, generando a su vez beneficios inmensos para la humanidad; por ejemplo, ayuda a prevenir millones de muertes causadas cada año por la contaminación del aire, evita pérdidas anuales de casi 50 millones de toneladas de productos agrícolas, reduce el ritmo de desglaciación, evita la pérdida de biodiversidad y reduce el riesgo de cruzar los límites que conducirían a cambios irreversibles en la salud de la tierra (CCAC, 2016)

El presente proyecto es un trabajo que se realizó en convenio con la Corporación ambiental empresarial filial a la cámara de comercio de Bogotá (CAEM) y la Coalición de Clima y Aire Limpio para la reducción de contaminantes de vida corta (CCAC), el cual tiene como fin calcular los factores de emisión de BC para los departamentos Norte de Santander y Santander de acuerdo con el consumo de combustible, consumo de energía y producción de ladrillos durante un periodo de producción, siguiendo el protocolo propuesto por CCAC y CAEM. Se realizaron 7 mediciones de PM2.5 y BC usando el equipo Ratnoze 2. Las primeras 2 mediciones se realizaron en un horno Hoffman de una ladrillera del departamento de Santander y las últimas 5 mediciones se ejecutaron en la chimenea de una ladrillera del departamento Norte de Santander. A su vez, se tomaron los datos de los monitoreos realizados en abril del presente año por la CAEM en horno Fuego Dormido de una ladrillera artesanal del departamento de Cundinamarca, con el fin de comparar los tres tipos de operación principales que maneja la industria ladrillera en Colombia, que son artesanal, intermitente y continuo, siendo el horno Hoffman de operación continua y el Horno Colmena de operación intermitente.

Para calcular los factores de emisión, se utilizó el software asociado al equipo, llamado Ratnoze2. Se tuvieron en cuenta otros parámetros como las concentraciones de PM2.5 y Carbono negro, eficiencia energética y otros contaminantes como CO y CO2, para evaluar su comportamiento junto al PM2.5 y BC.

El presente proyecto pretende generar información y bases referentes a los factores de emisión de PM2.5 y BC, ya que no se cuenta con factores de emisión adecuados a las condiciones reales de la industria ladrillera colombiana, adicionalmente por la escasa información basada en inventarios en el país sobre este contaminante. La realización de este tipo de estudios permite acceder a cambios de tecnología o alternativas de mejora para este sector empresarial, también funciona como sustento para la toma de decisiones frente a la gestión de la calidad del aire en muchas zonas, y de esta manera reducir las emisiones que actualmente contribuyen al cambio climático y afectaciones a la salud.

El capítulo 3 de este documento contiene las bases conceptuales referentes al tema de estudio, así como los resultados de investigaciones similares que se han realizado en otros países, en el capítulo 4 se hace una descripción detallada de la metodología que se siguió para el desarrollo del proyecto, el capítulo 5 presenta los resultados obtenidos de eficiencia energética, factores de emisión y tasas de emisión de PM2.5 Y BC, análisis del comportamiento de las concentraciones de PM2.5,BC,CO y CO2 y de forma paralela el análisis de los tres tipos de tecnologías; finalmente, en el capítulo 6 se establecen algunas conclusiones y en el capítulo 7 las recomendaciones.



## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Determinar las emisiones de Carbono Negro en el PM2.5 para hornos de empresas ladrilleras seleccionadas en los departamentos Norte de Santander y Santander.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Calcular los factores de emisión de Carbono Negro de acuerdo con el tipo de combustible, consumo energético y producción de ladrillo para los hornos en estudio.
- Cuantificar las emisiones de material particulado fino (PM2.5) en 2 hornos ladrilleros en los departamentos de Norte de Santander y Santander, respectivamente.
- Determinar el contenido de Carbono Negro (BC por sus siglas en ingles) en las muestras colectadas de PM2.5.
- Comparar los resultados obtenidos con la información suministrada por la Corporación Ambiental Empresarial de un horno artesanal del departamento de Cundinamarca

## 2. ANTECEDENTES

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), el material particulado (PM) es una mezcla compleja de partículas líquidas y sólidas de sustancias orgánicas e inorgánicas suspendidas en el aire. Las partículas se clasifican en función de su diámetro aerodinámico: PM10 (partículas con un diámetro inferior a 10  $\mu\text{m}$ ) y PM2.5 (diámetro inferior a 2,5  $\mu\text{m}$ ) (OMS, 2011). El carbono negro (BC por sus siglas en inglés) es un aerosol o material particulado formado por la combustión incompleta de combustibles fósiles, biocombustibles y/o biomasa, que incide negativamente en la salud humana y en la calidad del aire. El BC se emite directamente a la atmósfera en forma de partículas finas (PM 2,5) y puede absorber un millón de veces más energía que el dióxido de carbono (EPA, 2017).

En 1861 el físico y químico británico Michael Faraday señala el hollín como contaminante compuesto de carbono. Desde 1950, el hollín cobra mayor relevancia social, a raíz de un grave episodio de contaminación por carbón ocurrido en Londres. Más adelante, en la década de los 70, diversos estudios sobre el BC y el hollín ponen de manifiesto su presencia en Estados Unidos y Europa y su capacidad de absorber la luz visible. Durante los años 80 se detectan altas concentraciones de BC en la troposfera del Ártico Oeste y el Polo Norte y se estudia su influencia sobre el calor y la radiación en la zona. Y finalmente a comienzos del siglo XXI, los estudios sobre este material son cada vez más numerosos y diversas entidades públicas comienzan a introducir la reducción del BC como parte de sus estrategias de acción frente al cambio climático (Solaun et al. 2014).

De acuerdo con el Instituto de Gobernanza y Desarrollo Sostenible (IGSD, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos, las emisiones de BC constituyen la segunda mayor contribución al cambio climático ya que estas partículas absorben la luz solar convirtiéndola en calor y reduciendo la cantidad de partículas que se reflejan y se

redistribuyen al espacio y según el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) “su reducción podría ralentizar la tasa de calentamiento durante los dos a cuatro próximos años mientras que el mundo aborda el problema a largo plazo de las emisiones de CO<sub>2</sub> y realiza el cambio hacia una economía baja en carbono. Dada su corta permanencia, reducir estas emisiones tendría un efecto muy rápido sobre su concentración atmosférica, pudiendo incidir de forma relativamente rápida en el clima, en contraste con lo que sucede con las emisiones de gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub> (Solaun et al. 2014).

La CCAC fue creada en 2012, por los gobiernos de Bangladesh, Canadá, Ghana, México, Suecia y Estados Unidos, con el acompañamiento del Programa de PNUMA, cuyo objetivo es impulsar iniciativas para mitigar los impactos de los contaminantes de vida corta, como el BC, el metano (CH<sub>4</sub>), el ozono troposférico (O<sub>3</sub>) y los hidrofluorocarbonos (HFCs), quienes son responsables del cambio climático actual, con impactos importantes en la salud y sobre el medio ambiente (CAEM, 2015). Con el fin de proteger el medio ambiente y la salud pública, la CAEM lidera una alianza interinstitucional donde se ha dado la realización de un inventario del sector ladrillero a nivel nacional y la caracterización de emisiones de BC para cinco regiones del país financiada por la organización CCAC - United Nations Environment Programme (UNEP). Los inventarios de emisiones constituyen herramientas de suma utilidad pues facilitan a investigadores y responsables de la definición de políticas la labor de evaluar la magnitud de las emisiones de contaminantes atmosféricos, la contribución de distintas categorías de fuentes y las estrategias de mitigación más prometedoras (CCA, 2015)

La mayoría de la producción a nivel internacional se encuentra en Asia. Por ejemplo, hay más de 100,000 hornos en India, que producen entre 150 a 200 millones de ladrillos anuales y en Bangladesh se producen casi 20 billones de ladrillos anualmente en hornos que han venido operando por más de un siglo. En Latinoamérica también se ha considerado una gran cantidad de industrias

ladrilleras; hay un estimado de 300 en Chile, y entre 8 mil y 10 mil en Perú, y aproximadamente 17000 en México. En el año 2015, CAEM en alianza con la CCAC, realizó un estudio del inventario de industrias ladrilleras en Colombia, en el cual se identificaron 1378 industrias ladrilleras con 2430 hornos distribuidos en diferentes modelos tecnológicos para la cocción, categorizados en hornos artesanales, intermitentes, semi-continuos y continuos, en 15 regiones del país, que a la fecha suman una importante cantidad de la producción de ladrillo en Colombia (CAEM, 2015).

La iniciativa de trabajo de la CCAC con apoyo de CAEM en Colombia, va encaminada hacia la reducción de las emisiones de BC en los hornos de producción de ladrillos, siendo estos en su mayoría artesanales, que funcionan principalmente a base de combustibles como el carbón, la leña, gas y otros materiales de biomasa, y como resultado las emisiones de BC y de otros gases de efecto invernadero son emitidos a la atmosfera, contaminando recursos no renovables como el aire, agua y la tierra, junto con millones de pulmones de personas que viven o trabajan cerca a estas industrias.

En Colombia el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible impulsa la mejora del desempeño ambiental del sector ladrillero. Por su parte, el Ministerio de Minas y Energía, como en otros países, tiene un papel clave en el licenciamiento de la actividad, pues es quien otorga permisos de explotación de canteras de arcilla. Respecto al sector ladrillero, se han emitido resoluciones que establecen normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera según fuentes y tipo de combustible, y especifican el tipo de ductos o chimeneas que deben contar los hornos ladrilleros para medir los gases que se producen. La banca privada colombiana realiza una labor muy importante, pues incentiva con mejores condiciones crediticias a los productores que formalizan sus actividades o reducen sus emisiones contaminantes (CCAC, 2016)

Otros países han realizado estudios cuyo fin ha sido determinar el factor de emisión para PM2.5 y BC en ladrilleras artesanales cuyas empresas usaban como combustible leña, guadua y carbón. En la Tabla 1 se resumen los resultados de estos estudios, los cuales fueron realizados mediante el método de emisiones totales y el método de emisiones parciales para el caso de México (Maíz, 2012) y con relación a Quindío y Bogotá en Colombia se realizó mediante el uso del Ratnoze2 (CAEM, 2017).

**Tabla 1** Registro de factores de emisión de PM2.5 y BC

<b>Ubicación</b>	<b>Tipo de Horno</b>	<b>Combustible</b>	<b>EFCN</b>	<b>EFPM2.5</b>	<b>Unidades</b>
México, 2012	Fijo tipo MK2	Leña	2.63	241	g/Mg de ladrillo cocido
México, 2012	Campaña	Leña	12.02	1141	g/Mg de ladrillo cocido
Quindío, 2017	Pampa	Guadua	0.1861	0.6959	g/Kg de Combustible
Quindío, 2017	Pampa	Guadua	0.0086	0.0321	g/MJ
Quindío, 2017	Pampa	Guadua	0.0429	0.1605	g/Kg de ladrillo

Fuente: CAEM, 2017; Maíz, 2012

### 3. MARCO TEORICO

La contaminación atmosférica afecta gravemente la salud pública, el bienestar humano y la integridad de los ecosistemas. El impacto del calentamiento global en las escalas local, regional y global ha aumentado dramáticamente en los últimos años. Estos efectos nocivos son extremadamente costosos, moralmente inaceptables y perjudican en gran medida a los grupos más vulnerables de la población, incluidos los niños y ancianos, así como a los enfermos y pobres. La contaminación atmosférica, sus efectos y costos disuaden en gran medida el logro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio y el potencial de desarrollo nacional. La Organización Mundial de la Salud (OMS), estima que más de 100 millones de personas en América Latina están expuestas a altos niveles de contaminación atmosférica que exceden las directrices recomendadas. La Organización Panamericana de la Salud (OPS), también señala que, entre otros efectos para la salud pública, la contaminación del aire urbano en la región causa al menos 35.000 muertes prematuras por año. Además, el Banco Mundial estima, que el costo relacionado con la salud de la contaminación atmosférica urbana en algunos países de América Latina y el Caribe representa aproximadamente el 1% del PIB nacional. En 2050, la contaminación del aire exterior se proyecta para convertirse en la principal causa de muertes relacionadas con el medio ambiente en todo el mundo (UNEP, 2012)

Las principales culpables son partículas pequeñas contaminantes de menos de una décima parte del espesor de un cabello humano, producidas por la combustión incompleta de los combustibles fósiles y la biomasa. Estas partículas penetran profundamente en los pulmones y el torrente sanguíneo, causando ataques cardíacos, cáncer y, en muchos casos, la muerte. Al mismo tiempo, la más pequeña de estas partículas, llamadas de carbono negro (BC por sus siglas en inglés), absorbe la luz solar y calientan la atmósfera, contribuyendo al cambio climático (Steiner, 2014).

La producción de ladrillos es todavía una práctica antigua en muchos países, generalmente se producen en hornos artesanales, alimentados por carbón, leña, estiércol y/o biomasa. Esta práctica, junto con la producción de hierro y acero ha sido reconocida como una de las principales fuentes de carbono negro en el mundo, pues contribuye con 20% de las emisiones globales (CCAC, 2015). Según el inventario realizado por la CAEM en el año 2015, el 76% de la industria ladrillera está concentrada en los departamentos de Boyacá, Cundinamarca, Valle del Cauca, Antioquia y Norte de Santander, siendo Cundinamarca la región con mayor producción (26%), debido a que la mayoría de sus industrias han desarrollado procesos de conversión tecnológica a hornos continuos como Túnel, Hoffman o Zigzag. El 91.4% de los hornos identificados tienen tecnologías artesanales o intermitentes (CAEM, 2015).

La Coalición de Clima y Aire Limpio para la reducción de contaminantes de vida corta (CCAC por sus siglas en inglés, Climate and Clean Air Coalition), fue creada en 2012, por los gobiernos de Bangladesh, Canadá, Ghana, México, Suecia y Estados Unidos, con el acompañamiento del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, UNEP por sus siglas en inglés, United Nations Environment Program). El objetivo de esta coalición es impulsar iniciativas para mitigar los impactos de los contaminantes de vida corta, como el carbono negro, el metano (CH<sub>4</sub>), el ozono troposférico (O<sub>3</sub>) y los hidrofluorocarbonos (HFCs), quienes son responsables del cambio climático actual, con impactos importantes en la salud y sobre el medio ambiente. Una de las iniciativas de trabajo de la CCAC en alianza con CAEM, es la reducción de carbono negro en las emisiones durante la producción de ladrillos. La CAEM en Colombia ayuda a construir un mejor entorno y promover la gestión ambiental empresarial (Steiner, 2014).

### **3.1. FACTOR DE EMISIÓN**

Un factor de emisión es la relación entre la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera y una unidad de actividad. Los factores de emisión pueden determinarse basados en procesos o en censos. Los primeros se usan para realizar estimaciones de emisiones provenientes de fuentes puntuales, y a menudo se combinan con los datos de actividad recopilados con encuestas o con balances de materiales. Por otra parte, los factores de emisión basados en censos se usan mucho para hacer estimaciones de las emisiones de fuentes de área. Para los EU, la fuente más completa de factores de emisión de contaminantes de criterio es la publicación AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors (U.S. EPA, 1995a). Asimismo, el documento Factor Information Retrieval System (FIRE) (Sistema de Recuperación de Información sobre Factores de la EPA) es una reunión de factores de emisión de contaminantes del aire, tanto criterio como tóxicos (EPA, 1996)

### **3.2. MATERIAL PARTICULADO FINO**

El material particulado fino, o PM<sub>2.5</sub> se define como el conjunto de partículas respirables sólidas y/o líquidas en suspensión con diámetros aerodinámicos menores a 2.5 micrómetros. A comparación de las partículas gruesas (diámetros mayores a 10 micras), el PM<sub>2.5</sub> tiene mayor tiempo de residencia y afecta significativamente la visibilidad y el cambio climático, además de la salud de las personas. Tanto las propiedades ópticas de los aerosoles, como los efectos sobre la salud y el medio ambiente, dependen de la composición química de la partícula, que a su vez depende de la fuente emisora del contaminante (Deng et al. 2016). Este contaminante se origina durante la combustión de biomasa y combustibles fósiles. Estudios recientes indican que el carbono negro actúa como vehículo de



transporte de material particulado (PM2.5) y de otros compuestos tóxicos. Las partículas contaminantes de menos de 2,5 micras (incluido el carbono negro) están asociadas a diversos impactos en la salud humana a nivel respiratorio y cardiovascular, y son causa de millones de muertes prematuras al año, especialmente en los países en desarrollo. La Organización Mundial de la Salud (OMS) cataloga la contaminación del aire entre los primeros diez factores de riesgo en países de ingreso alto-medio.

### **3.3. CARBONO NEGRO**

El carbono negro (BC por sus siglas en inglés) es un aerosol o material particulado fino (PM2.5) formado por la combustión incompleta de combustibles fósiles, biocombustibles y/o biomasa, que incide negativamente en la salud humana y en la calidad del aire (EPA, 2017). Este contaminante afecta la salud humana: genera problemas respiratorios, e incluso puede producir asma y cáncer de pulmón. Su tiempo de permanencia en la atmósfera varía desde unos pocos días hasta algunas semanas, pero durante ese tiempo su potencial de calentamiento a la atmósfera puede ser entre 460 y 1500 veces más potente que el CO<sub>2</sub>. Este contaminante influye en el calentamiento global, porque sus partículas oscuras, al absorber la luz, emiten calor e incrementan la temperatura de la atmósfera. Se ha comprobado que estas partículas también se depositan sobre los glaciares y la nieve, lo que contribuye al derretimiento de dichas superficies. Adicionalmente, altera las propiedades de las nubes y cambian los patrones de precipitación (CCAC, 2016).

Se estima que en el mundo se emiten ocho millones de toneladas de carbono negro al año y es preocupante que hasta el momento no se haya estudiado ni dado importancia suficiente a este contaminante, a pesar de que el abatir las emisiones de carbono negro permitirá conseguir beneficios a corto plazo de los que generaría una estrategia enfocada solo a los GEI (Gases de efecto invernadero) (INECC,

2014). La combustión de carbón contribuye aproximadamente con 9% de las emisiones globales de carbono negro, principalmente por el uso de calderas pequeñas, hornos de cal y de ladrillo y por la producción de coque para acerías (CCAC, 2016).

#### **3.4. CARBONO NEGRO PROVENIENTE DE LA INDUSTRIA LADRILLERA**

El sector de la fabricación de ladrillos se caracteriza por la baja eficiencia energética y la pobreza de sus trabajadores que operan en un sector informal que rara vez incluye políticas sociales, económicas y medio ambientales. Es importante prestar especial atención a los impactos que tendría para la salud y el bienestar una transformación del sector. Desde la perspectiva de una estrategia de mitigación, más allá de mejorar los procesos de producción de ladrillos se deben considerar posibles materiales de construcción con un enfoque más amplio (por ejemplo, usar ladrillos huecos).

Es importante resaltar que hay empresas que han implementado mejores tecnologías y otras que continúan utilizando metodologías artesanales, las cuales son mayoría en Colombia. La producción ladrillera con hornos artesanales consume casi 50% más energía que un horno de eficiencia media y casi 3 veces más que un horno de alta eficiencia (CCAC, 2016).

Generalmente se usan combustibles no convencionales en los hornos de ladrillo como el carbón, la madera, la biomasa local, el aceite desechado, las ruedas usadas, el aserrín, o cualquier otro combustible de bajo precio.

Estudios recientes muestran que la aplicación de tecnologías más eficientes, principalmente durante la cocción de ladrillos, puede reducir significativamente las emisiones contaminantes de 10 a 50%, dependiendo del proceso, la escala y el combustible utilizado. La transición a prácticas amigables modernas de

conservación de energía y medio ambiente para fabricación de ladrillos no es una tarea fácil, ya que la tradición y la pobreza limitan contra el cambio (CCAC, 2015).

La reducción de este contaminante (BC) tiene un impacto importante e inmediato en la mitigación del calentamiento global, y genera, a su vez, beneficios inmensos para la humanidad; por ejemplo, ayuda a prevenir millones de muertes causadas cada año por la contaminación del aire, evita pérdidas anuales de casi 50 millones de toneladas de productos agrícolas, reduce el ritmo de desglaciación, evita la pérdida de biodiversidad, y reduce el riesgo de cruzar los límites que conducirían a cambios irreversibles en la salud de la tierra (CCAC, 2016).

### **3.5. CARACTERIZACIÓN DE LOS HORNOS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA LADRILLERA**

En el sector ladrillero actual existen diferentes tipos de tecnologías de hornos, los cuales son denominados y clasificados de acuerdo con la región o institución donde se realice el estudio. Hoy en día hay gran cantidad de hornos híbridos (con características tanto geométricas como funcionales de más de un solo horno), razón por la cual resulta tedioso realizar una tipificación que los incluya a todos o en su defecto encontrar una única caracterización para los hornos utilizados en toda esta industria pues actualmente no hay un ente regulador o una norma legal que los clasifique bajo un único estándar. Para la ejecución de este proyecto se decidió utilizar la clasificación realizada por equipo técnico EELA (Eficiencia energética en ladrilleras de América Latina para mitigar el cambio climático) Colombia en el año 2011 (EELA, 2011). A continuación, se enuncia dicha clasificación:

#### **3.5.1. Funcionamiento y clasificación de los hornos intermitentes**

Son hornos de cámaras individuales en los que los productos tanto en la instalación para el proceso de cocción como en el enfriamiento quedan en posición fija durante

la todo el ciclo. Las etapas del proceso que se lleva a cabo para la producción de ladrillos en este tipo de tecnología se observan en la Figura 1.

**Figura 1** Etapas del proceso para la producción de ladrillos



Fuente: EELA, 2011

Los tiempos de cada etapa difieren considerablemente según el producto a cocer y la naturaleza del proceso. A continuación, se listan algunos hornos que cuentan con esta tecnología (EELA, 2011):

- Hornos de Fuego Dormido
- Hornos Pampa
- Horno Baúl
- Horno Colmena

### **3.5.2. Funcionamiento y clasificación de los hornos Semicontinuos**

Este tipo de horno es similar al continuo en la carga de producto y su recorrido en el túnel. Se diferencia del continuo porque todos los vagones cargados en uno o dos turnos de trabajo deben ser introducidos completamente en el túnel, sin almacenamiento de reserva. Como funcionamiento, los hornos semicontinuos se aproximan bastante más a los hornos continuos entre más tiempo duran los turnos de trabajo y el ciclo de cocción; son tanto más semejantes a los hornos intermitentes en el caso inverso. Los hornos semicontinuos son en ocasiones, agrupaciones de hornos intermitentes tendientes hacia una operación continua. Los hornos que operan bajo los parámetros de funcionamiento nombrados anteriormente son (Ibíd, 4):

- Horno Vagón
- Horno Rápido Intermitente

### **3.5.3. Funcionamiento y clasificación de los hornos Continuos**

Los hornos continuos aparecieron como una solución más rentable en la fabricación de productos cerámicos. El funcionamiento continuo de los hornos se caracteriza por el desarrollo ininterrumpido de la cocción y la posibilidad de efectuar las diferentes etapas sin variar el ritmo de la producción, a continuación, se listan algunos hornos que cuentan con esta tecnología (Ibíd, 5):

- Horno Hoffman
- Horno Hoffman de Bock
- Horno Bull's Trench Kiln (BTK)
- Horno Hoffman Abierto Horno Túnel
- Horno de Rodillos
- Horno de Cámaras Múltiples
- Horno Vertical VSBK
- Horno MK
- Horno MK-3

### **3.5.4. Hornos Artesanales**

La gran mayoría de empresas ladrilleras de micro y pequeño tamaño distribuidas a nivel nacional presentan un alto grado de informalidad y utilizan técnicas artesanales para la fabricación de sus productos. Las ladrilleras artesanales emplean para la cocción hornos fijos de fuego directo, techo abierto y tiro ascendente también denominada quemado o simplemente quema de ladrillos. Las paredes de estos hornos no proveen un buen aislamiento porque son delgadas, y en su geometría tienden a tener una gran área horizontal de cocción; características que les restan eficiencia tanto en velocidad de cocción como en calidad de producto sobre todo cuando se usan combustibles sólidos como el carbón. Generalmente cada artesano

ladrillero levanta su horno en la periferia de las ciudades en zonas donde la materia prima abunda o está muy cerca y es asequible, o las condiciones climáticas principalmente abundante viento y pocas lluvias les favorecen. De esta manera van llegando más artesanos ladrilleros al lugar, conformando una zona de actividad ladrillera (Ministerio de Producción, 2010).

### **3.6. HORNOS SELECCIONADOS PARA LA EJECUCION DE ESTE PROYECTO**

Para la ejecución de este proyecto se seleccionaron tres tipos de hornos, el horno Fuego Dormido, Colmena y Hoffman, de tecnología artesanal, intermitente y continua, respectivamente. A continuación, se menciona el funcionamiento y características de cada horno.

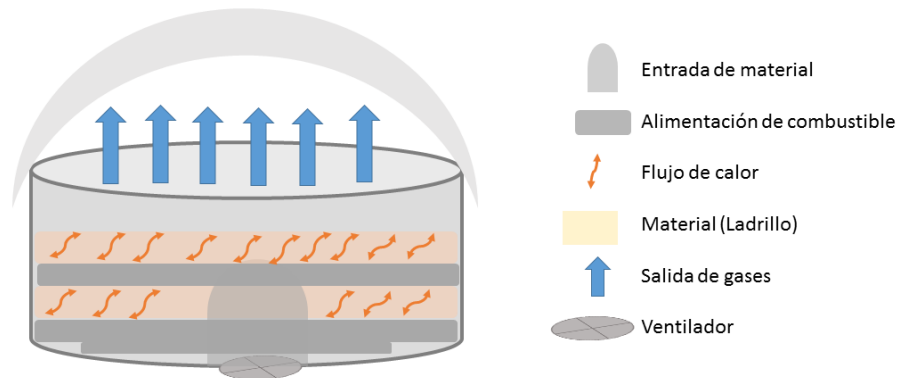
#### **3.6.1. Horno fuego dormido**

Es un horno artesanal, construido en forma circular, en forma de una bóveda igualmente circular (Figura 2). En estos hornos la distribución de las piezas se realiza de manera intercalada, donde se pone una capa de carbón seguida de una de ladrillos, hasta que se alcanza la altura máxima del horno. Una vez se termina el endague, se prende el horno. La cocción de ladrillos dura 30 días y la producción de ladrillos, depende del tamaño del horno y de las dimensiones de los ladrillos (García et al. 2004).

Entre las ventajas se puede destacar que son hornos económicos por su construcción, y entre las desventajas se destaca que debido a su baja eficiencia térmica (1209 kcal/kg), este horno provoca que los ladrillos obtengan características inferiores a las ofrecidas por el horno árabe, ya que son hornos de baja producción y alta contaminación que presentan una quema no homogénea. Es decir, algunos

ladrillos se queman, mientras otros quedan crudos. Adicionalmente aumenta la cantidad de combustible necesario para completar el proceso por la baja eficiencia térmica que presentan (Ibíd, 60). En la Figura 2 se aprecia la estructura de este tipo de horno.

**Figura 2** Esquema de funcionamiento del horno fuego dormido



Adaptación por Autoras

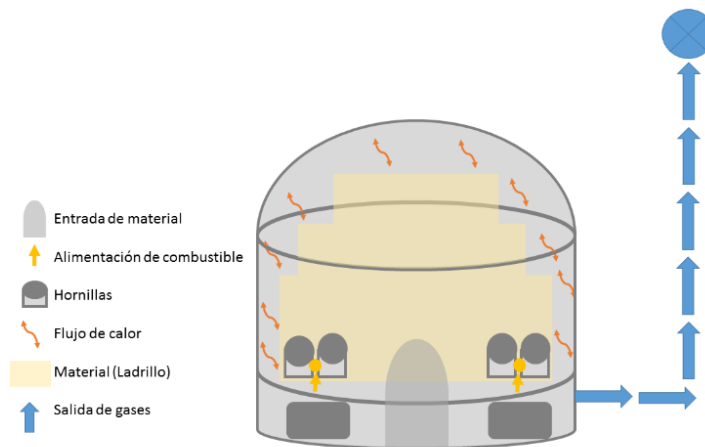
### 3.6.2. Horno Colmena

La estructura del horno Colmena se puede apreciar en la Figura 3. El horno colmena es un modelo intermitente de tiro invertido. El suministro del combustible puede realizarse de forma manual o mecánica en diferentes hornillas distribuidas perimetralmente sobre la circunferencia del horno. En estas hornillas se generan varias corrientes de calor que fluyen de forma ascendente hasta el centro de la bóveda, bajando entre la masa cargada de horno, llegando hasta los diferentes ductos del piso que se interconectan a un colector principal conduciendo los gases residuales hacia la chimenea. Generalmente este horno alcanza temperaturas entre 1000 a 1200 °C, teniendo un comportamiento descendente, es decir que el umbral térmico fluye de arriba hacia abajo, cocinando primero la masa superior hasta llegar

a la masa inferior. El proceso de quema termina una vez el umbral llegue al piso del horno (Ibíd)

Una de las ventajas de este horno es que permite que la coloración de los productos presente tonalidades rojizas muy homogéneas en algunos ladrillos y se reduzcan los productos tiznados por efectos del humo o de las cenizas. Adicionalmente, en los hornos colmena se pueden fabricar productos vitrificados. También es otra ventaja la facilidad con la cual se pueden utilizar los gases de combustión y el aire de enfriamiento en otros hornos o en secaderos; brindando una mayor uniformidad en las temperaturas del material durante el proceso de quema, presentando costos moderados de construcción y capacidad para altas temperaturas de cocción (Ibíd, 61). Entre las desventajas se destaca que la eficiencia térmica (1077 kcal/kg) está muy cercana a la ofrecida en los hornos árabes, aumentando ésta en un 11.5%.

**Figura 3** Esquema del funcionamiento del horno Colmena



Adaptación por Autoras

### 3.6.3. Horno Hoffman

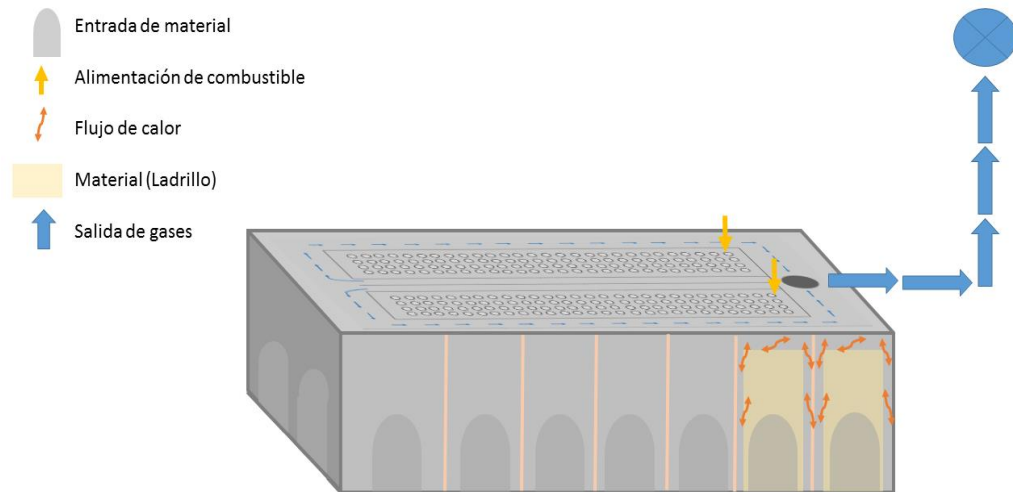
Está constituido por dos cámaras paralelas, formadas por compartimientos contiguos (Figura 4). En este tipo de horno el fuego se mueve a través del mismo



en dirección opuesta a las manecillas del reloj, de manera que este sistema permite obtener una alta eficiencia térmica y de producción, ya que el calor obtenido en la cámara de combustión se utiliza en el precalentamiento de las cámaras precedentes. Aproximadamente una semana es el tiempo que toma realizar un ciclo completo de quema (el fuego llega al punto de donde se partió). Como podemos apreciar en la Figura 4, cada galería está formada por varias cámaras, cada una de ellas con su respectiva puerta, para el cargue y descargue del horno y un canal de salida que va al colector principal que conduce a la chimenea; cada cámara comunica con el colector, por un conducto de humos, los cuales se cierran herméticamente con válvulas (Ibíd, 62).

Entre las ventajas se destaca que son hornos de alta producción, ya que permiten que las piezas roten constantemente logrando la continuidad del flujo del proceso. La eficiencia térmica que alcanzan es de 519 kcal/kg. El horno alcanza un ciclo completo en una semana. La emisión de gases de combustión incompleta y de material particulado es prácticamente nula, permitiendo la captación de gases calientes y no contaminados para usarlos para los secaderos. Una de las desventajas es el costo, ya que para un horno oscila entre 350 y 600 millones de pesos dependiendo de las dimensiones relacionadas con la capacidad. La bóveda es el ítem más costoso entre los elementos constructivos que integran la instalación de este tipo de horno. Adicional a la construcción de los arcos de la bóveda, demandan mano de obra calificada y asesoría de expertos en el tema, ya que son hornos con grandes dimensiones y accesos relativamente pequeños (Ibíd, 63).

**Figura 4** Esquema del funcionamiento del horno Hoffman



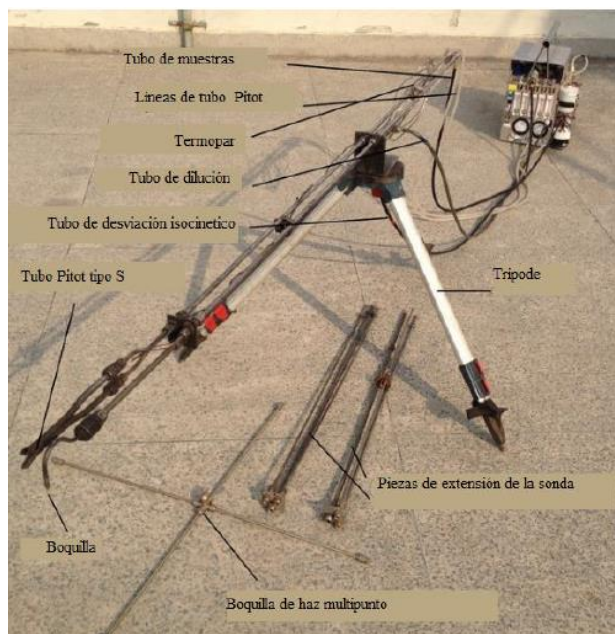
Adaptación por Autoras

### 3.7. EQUIPO RATNOZE2

El Ratnoze2 es un sistema de muestreo portátil especializado para medir emisiones de gases de combustión (Figura 5). Es ideal para medir las emisiones generadas por los hornos de ladrillos y otras fuentes de combustión industrial de pequeña y gran escala con acumuladores para extracción y sin ello (Thompson, 2016). Es un muestreador de dilución, distinto de otros equipos convencionales para medir emisiones, puesto que acondiciona la muestra de extracción con aire de dilución para la medición representativa de la materia particulada condensable y otras especies semivolátiles. Está diseñado para determinar factores de emisión por el método de balance de carbono, pero también puede usarse para determinar las concentraciones de extracción no diluidas y el índice de flujo de extracción para muchas otras medidas de emisión.

El Ratnoze2 es un kit completo que incluye una caja de sensores, sonda, estuche de transporte y todos los accesorios necesarios para realizar el muestreo de emisión. El tren de muestreo contiene una entrada selectiva de tamaño PM2.5 y dos soportes de filtros paralelos de 47 mm que pueden ser utilizados para recoger muestras del filtro para realizar el análisis de laboratorio. Los datos pueden visualizarse y ser ploteados en tiempo real utilizando la computadora y el software proporcionados (Thompson, 2016). En la Figura 5 se puede apreciar el equipo y se señalan algunos de sus componentes.

**Figura 5** Equipo Ratnoze 2



Fuente: Thompson, 2016

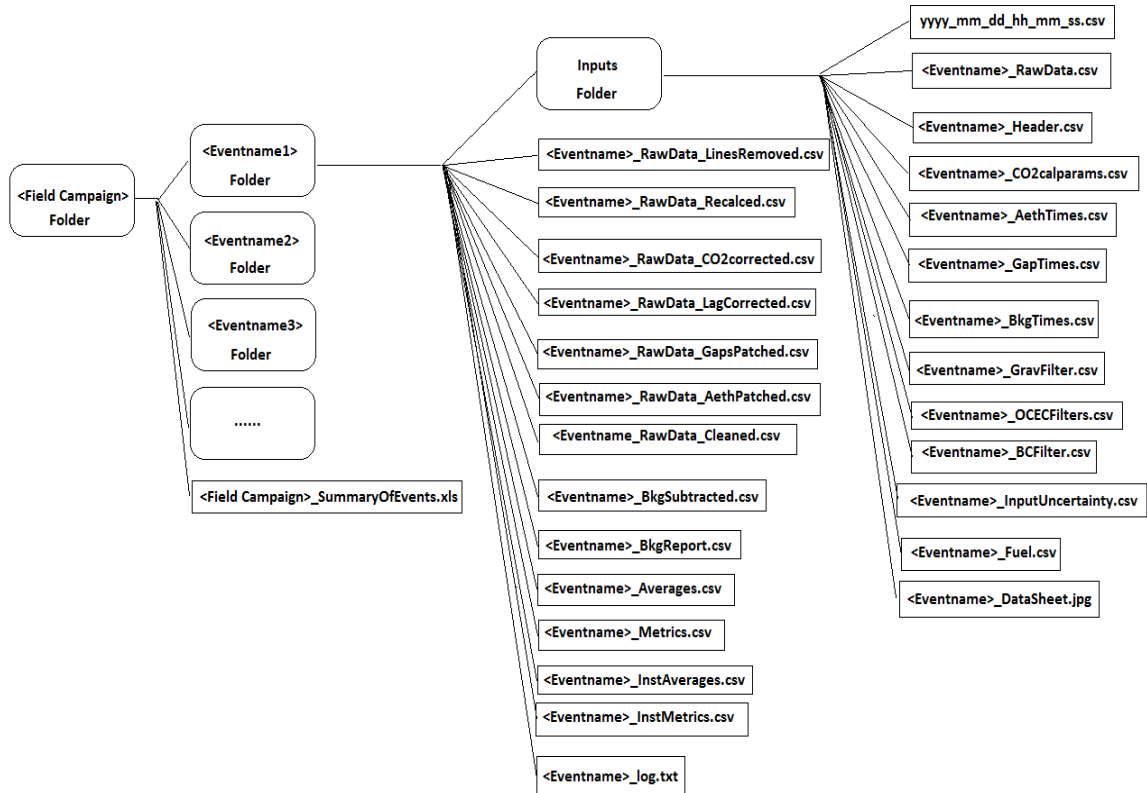
### **3.7.1. SOFTWARE ASOCIADO AL EQUIPO RATNOZE2:**

El software se denomina Ratnoze Data Cruncher, escrito en Python. Python es un lenguaje de programación poderoso y fácil de aprender. Cuenta con estructuras de datos eficientes y de alto nivel y un enfoque simple pero efectivo a la programación orientada a objetos (Van & Drake, 2009). Está diseñado para brindar una interfaz gráfica de usuario (GUI, por sus singlas en inglés) amigable para este, la cual sirve

para plotear los datos en tiempo real, configurar parámetros y calibrar (Thompson, 2017). El software genera por cada evento de muestreo, resultados de factor de emisión de carbono negro de acuerdo al consumo de combustible, gasto de energía y producción de ladrillos, a su vez genera otra serie de datos como las concentraciones de SO<sub>2</sub>, CO y CO<sub>2</sub>; Consumo De Combustible Especifico (SEC); y la tasa de emisión, las cuales se tendrán en cuenta en los análisis del proyecto.

RatnozeDataCruncher interactúa con el sistema de archivos mostrado en la Figura 6. Los conjuntos de datos se organizan por campaña de campo <Fiel Campaing>, la cual contiene los eventos de muestreo realizados <Eventname1>. Cada evento contiene archivos de entrada en la carpeta <Inputs folder> como se aprecia en la Figura 6 (*yy\_mm\_dd\_hh\_mm\_ss.csv*, *Eventname\_RawData.csv*, *Eventname\_header.csv* y otros). Se denominan archivos de entrada porque es la información que hay que suministrarle al software para que realice sus respectivos cálculos. A medida que el software va ejecutando cada paso se van generando archivos de salida dentro de la carpeta de cada evento (*Eventname\_RawData\_LinesRemoved.csv*, *Eventname\_RawDataRecalced.csv*, *Eventname\_RawData\_CO2Corrected.csv* y otros). Estos archivos de salida se crean con base a los archivos de entrada que se introdujeron por el usuario. En el último paso ejecutado por el software se genera un archivo en la carpeta <Field Campaign> llamado *FielCampaing\_SummaryOfEvents.xls*, el cual contiene en resumen los datos de cada evento de muestreo. Finalmente se promedian los resultados de los eventos correspondientes a cada horno.

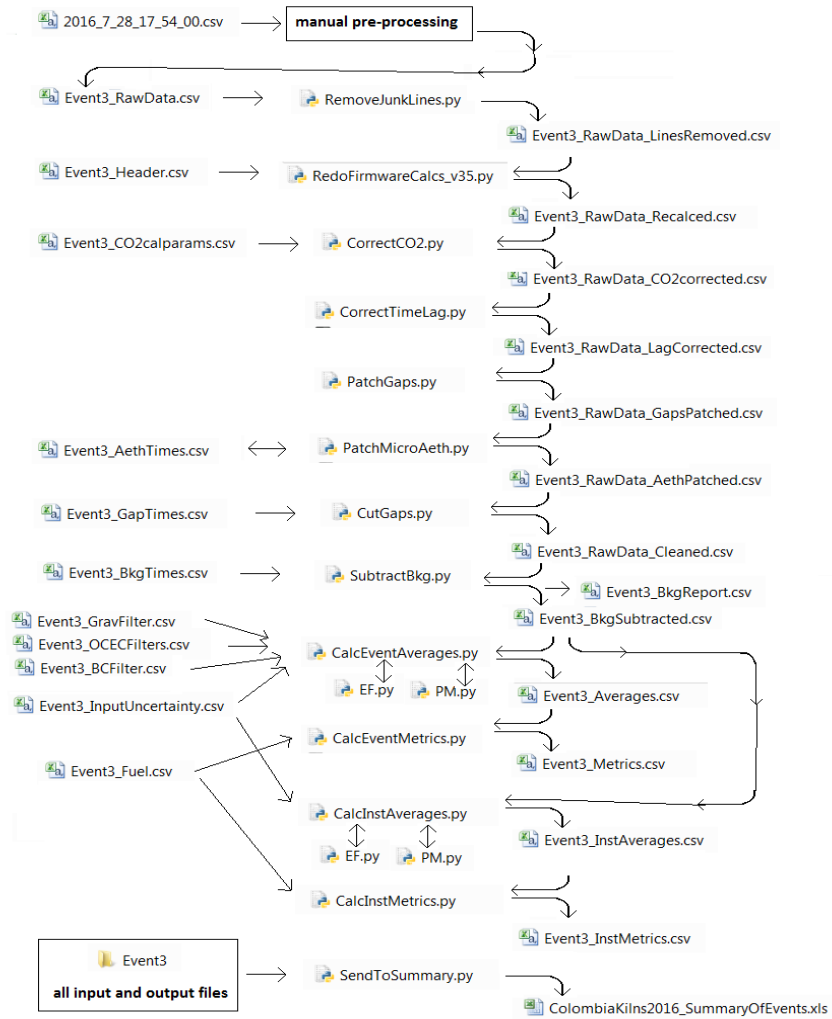
**Figura 6** Sistema de archivos del software RatnozeDataCruncher



Fuente: Thompson, 2017

El software realiza todos los cálculos descritos en el protocolo “*Brick Kiln Emissions Sampling Protocol: Dilution sampling for climate-relevant particle emissions*”. El diagrama de flujo que se presenta en la Figura 7 es un ejemplo del procesamiento de datos en el software de un evento de muestreo. En esta figura se puede apreciar lo mencionado anteriormente de los archivos de entrada y los archivos de salida que el software va generando a medida que ejecuta los pasos, estos pasos son mencionados de manera detallada en la metodología (página 48). En el diagrama de la Figura 7 se visualizan tres columnas, en la columna izquierda se aprecian los datos de entrada, en la columna del centro se aprecian las funciones o los pasos que va ejecutando el software y en la columna derecha se aprecian los archivos de salida generados en cada paso que el software va ejecutando.

**Figura 7** Diagrama de flujo RatnozeDataCruncher



Fuente: Thompson, 2017

### **3.7.2. Pasos ejecutados en el software *RatnozeDataCruncher***

#### *3.7.2.1. Elimina líneas que no hacen parte de la corriente de datos*

Este paso elimina líneas intermedias del datalogger que no hacen parte de la corriente normal de datos, estas líneas extras incluyen: líneas en banco, líneas parciales, encabezados extras causados por un reinicio, y líneas de comando guardadas durante modo configuración.

#### *3.7.2.2. Rehace los cálculos con los parámetros de calibración*

Esta función recalcula los datos base usando nuevos parámetros de calibración en el caso que algún paso se haya omitido, se hayan ingresado unidades equivocadas o se necesite corregir algún otro dato dentro del encabezado, esta función es específica para el firmware versión kilnbox\_35.ino, y se debe usar una función diferente en caso de contar con un firmware diferente.

#### *3.7.2.3. Aplica correcciones de presión y temperature del sensor de CO<sub>2</sub>*

Esta función aplica las correcciones por diferencia de temperatura y presión al sensor de CO<sub>2</sub> usando la ecuación de los gases ideales, las salidas del sensor de CO<sub>2</sub> son dependientes de la temperatura y la presión, cuando la temperatura y la presión de muestreo son diferentes a las temperaturas y presión de calibración las concentraciones deben ser corregidas.

#### *3.7.2.4. Aplica corrección de tiempo*

Esta función realiza una corrección a los datos de tiempo a los sensores de gas; esta señal presenta un retraso respecto a los otros sensores debido al tiempo de residencia dentro de la cámara de sensores, la función pone en línea todos los datos para que coincidan los tiempos con los demás sensores.

#### *3.7.2.5. Une Brechas de tiempo en series de datos*

Esta función une brechas dentro de los datos base; las brechas de datos ocurren cuando el Ratnoze pierde el suministro eléctrico o entra dentro del modo calibración.

Debido a que los datos deben ser continuos es necesario unir los datos, lo cual es realizado por esta función.

#### 3.7.2.6. *Corrige las lecturas del MicroAeth*

Esta función recalcula los datos del MicroAeth durante los cambios de filtro y aplica una corrección para el equipo MicroAeth interpolando los datos entre cambios de filtro.

#### 3.7.2.7. *Recorta lagunas de datos*

Esta función elimina los períodos de tiempo de las series de datos que no deben incluirse en el período de muestra, como los períodos de medición de fondo intermedios.

#### 3.7.2.8. *Resta concentraciones de fondo*

Esta función resta las concentraciones de fondo del período de muestreo y elimina todos los puntos de serie de datos que están fuera del período de muestreo, la función cuenta con tres métodos para determinar las concentraciones de fondo: 1) usa los datos del tiempo pre-medición, 2) Usa los datos del tiempo post-medición, o 3) usa un promedio de los dos anteriores, no todos los sensores deben ser ajustados para sustraer la concentración de fondo por lo que también existe la opción de mantener los datos tomados en tiempo real.

#### 3.7.2.9. *Calcula del promedio de eventos*

Esta función calcula los valores medios para el evento de muestreo. Los datos de series temporales se promedian a partir del archivo de datos procesados en el paso anterior, y las concentraciones medias de especies PM2.5 y BC se determinan a partir de los resultados del análisis de laboratorio de cada filtro, por tanto, estos datos deben ser ingresados en un archivo en formato CSV.



#### 3.7.2.10. *Calcula las métricas de salida del evento*

Esta función calcula las métricas promedio del evento; para esto se deben ingresar los datos de consumo de combustible del horno y producción de ladrillo, así como los datos de análisis de laboratorio del combustible con su respectiva incertidumbre.

#### 3.7.2.11. *Calcula los promedios instantáneos*

Esta función calcula los promedios instantáneos de los datos de series de tiempo. Básicamente, suaviza la serie de datos transformándola de una base de tiempo de 1 segundo a una base de tiempo de 1 minuto para permitir que las métricas instantáneas se calculen con menos ruido.

#### 3.7.2.12. *Calcula las métricas instantaneas*

Esta función calcula las métricas de salida instantánea a medias de un minuto para la serie de datos.

#### 3.7.2.13. *Crea el resumen de los eventos*

Esta función guarda los datos del evento de medición en una hoja de cálculo con otros eventos de muestreo de la misma campaña de campo. Antes de procesar datos para una campaña de muestreo se debe crear una hoja de cálculo de resumen de eventos. Una vez todos los eventos son procesados se promedian las métricas de los eventos que corresponden al mismo monitoreo de horno con el fin de obtener un valor promedio para cada tipo de horno.

### **3.8. CONSUMO DE COMBUSTIBLE ESPECÍFICO (SEC)**

El parámetro de eficiencia energética denominado Consumo de Combustible Específico (SEC por sus siglas en inglés) tiene como objetivo garantizar que los

productos eléctricos y de combustibles que se comercializan en el país no constituyan un peligro para las personas y cosas (UPME, 2001).

## 4. METODOLOGÍA

Para el cumplimiento de los objetivos planteados se describen a continuación las actividades desarrolladas.

### 4.1. Ubicación de puntos de muestreo

Las empresas seleccionadas para realizar las mediciones para cada departamento fueron elegidas por CAEM basados en el inventario de empresas ladrilleras de Colombia realizado el año 2015 (CAEM, 2015).

**Empresa de estudio 1:** La ladrillera estudiada del departamento de Santander está ubicada en la vereda Llanadas en el municipio de Girón. La empresa cuenta con un horno Hoffman de operación continua. En la chimenea de este horno se realizaron dos mediciones, la primera medición se realizó durante el día por 7 horas aproximadamente y la segunda medición se realizó durante toda la noche y fue de 15 horas aproximadamente.

**Figura 8** Ubicación de la empresa ladrillera del departamento de Santander



*Tomada de Google Earth*

**Empresa de estudio 2:** La segunda ladrillera estudiada está ubicada en el municipio Cúcuta, Norte de Santander. La empresa cuenta con 11 hornos Colmena de operación intermitente. En la chimenea de un horno se realizaron 3 mediciones de noche y dos de día. Las mediciones diurnas duraban aproximadamente 7 horas y las mediciones nocturnas 15 horas aproximadamente.

**Figura 9** Ubicación de la empresa ladrillera departamento de Norte de Santander



*Tomada de Google Earth*

#### **4.2. Metodología de medición**

Cada una de las mediciones realizadas están fundamentadas en el protocolo suministrado por CAEM y la CCAC llamado “Brick Kiln Emissions Sampling Protocol: Dilution sampling for climate-relevant particle emissions” (Thompson et al. 2016). En la chimenea de cada horno se llevaron a cabo mediciones isocinéticas mediante el equipo Ratnoze2. Se realizó un seguimiento al horno durante el monitoreo con el fin de recolectar diferentes datos como el tipo de combustible, consumo de combustible, método de alimentación de combustible, producción del horno en estudio, proceso productivo, entre otros. En ambas ladrilleras, para la determinación del número de ladrillos, se tomaron los datos de producción suministrados por cada empresa según la carga previa del horno en estudio.

La metodología de medición consistió en preparar de forma previa en el Laboratorio de Estudios Ambientales de la UPB filtros de fibra de vidrio recubiertos con teflón y filtros de fibra de vidrio, para la colección de muestra de PM2.5 y de BC respectivamente. Posteriormente se transportaron los filtros correspondientes y el equipo Ratnoze2 (realizando una comprobación previa de éste) a las empresas ladrilleras en estudio. Una vez ubicados en el lugar de medición se localizó el horno y la plataforma, realizando allí el montaje del equipo e iniciando el proceso de medición con el equipo Ratnoze2, el cual consistió en:

- Iniciar una nueva hoja de datos (Anexo A)
- Iniciar vigilancia del combustible
- Recoger muestras de combustible
- Monitorear proceso de ladrillo y pesaje de ladrillos
- Determinar el diámetro de la pila

La configuración del equipo constó de:

- Seleccionar la boquilla
- Realizar montaje de la sonda
- Ensamblar el equipo
- Comprobar fugas
- Ajustar el flujo de dilución
- Determinar el flujo de dilución apropiado
- Ajustar los caudales del filtro
- Ajustar flujo a través del ciclón
- Medir la velocidad de la pila
- Ajustar el flujo de muestreo isocinético
- Medir los flujos del sistema
- Medir las condiciones ambientales

Una vez ejecutado lo anterior se iniciaron los periodos de muestra de la emisión: período de fondo previo a la prueba, período de prueba y período de fondo posterior a la prueba; estos periodos y tiempos registrados fueron fundamentales para el posterior análisis de los datos ya que permitieron identificar el tiempo preciso en que el equipo tomó la muestra cuyos datos fueron seleccionados. Después de que fue tomada la muestra de emisión se midieron nuevamente las condiciones ambientales, se comprobó el flujo y verificaron las fugas posteriores al ensayo dándose por terminado el periodo de medición. Luego se retiraron los filtros de los soportes y se almacenaron en porta filtros; ya finalizada la medición (por cada evento que se realizó) se limpió el tren de muestra.

### **4.3. Método de laboratorio**

Para el cálculo de los factores de emisión fue necesario el análisis gravimétrico, análisis óptico, y el análisis de combustible, de los cuales, el análisis de combustible fue realizado por el Laboratorio Mintec Ceramic y los restantes fueron realizados en el Laboratorio de Estudios Ambientales de la Universidad Pontificia Bolivariana. Estos análisis se describen a continuación:

#### **4.3.1. Análisis gravimétrico**

Las muestras colectadas en campo en filtros de fibra de vidrio recubiertos se llevaron al Laboratorio de Estudios Ambientales de la UPB donde fueron acondicionados y pesados (registro posterior a la medición). El pesaje se realizó en una balanza analítica (modelo BP211D, con un error de 0.01 mg y confianza de 95.45%) siguiendo el protocolo propuesto por CCAC y CAEM.

### 4.3.2. Análisis óptico

En el Laboratorio de Estudios Ambientales de la Universidad Pontificia Bolivariana sede Bucaramanga, se realizó la medición por el método óptico de BC en los filtros de fibra de vidrio colectados, por medio del equipo Transmisómetro Óptico OT21 Magee Scientific.

### 4.3.3. Análisis de combustible

Las muestras colectadas de combustible durante las mediciones en los diferentes departamentos fueron enviadas por parte de CAEM al laboratorio Mintec Ceramic Ltda., quienes fueron los encargados de realizar el análisis correspondiente al combustible (Análisis próximo y análisis último del carbón, así como el índice de hinchamiento).

## 4.4. Cálculo del Consumo Especifico de Energía (SEC) para los tres hornos en cuestión

Para el análisis de eficiencia energética se calculó el SEC para los tres hornos (Colmena, Fuego Dormido y Hoffman) usando la ecuación 1, la cual relaciona el consumo energético con la producción de ladrillos.

$$SEC = \frac{fuel_{rate}}{brick_{rate}} fuel_{LHV,eff} \quad (1)$$

*SEC*: Consumo específico de energía (MJ/kgbrick)

*fuel<sub>rate</sub>*: Tasa de consumo de combustible seco (kg/hr)

*brick<sub>rate</sub>*: Tasa de producción de ladrillo (kgbrick/hr)

$fuel_{LHV,eff}$ : Poder calorífico de Carbón (Kcal/Kg)

#### 4.5. Cálculo de los factores de emisión de BC de acuerdo al tipo de combustible, consumo energético y producción de ladrillo para los hornos de estudio

Para el cálculo de los factores de emisión se utilizó el software denominado RatnozeDataCruncher. A continuación, se detallan las fórmulas manejadas por el mismo para los respectivos cálculos según Thompson, R et al. 2016.

##### 4.5.1. Factor de emisión basados en consumo de combustible

La fracción de carbón de combustible eficaz se utiliza para realizar un balance de masa de carbono para relacionar el carbono emitido con la masa de combustible consumida. Entonces, los factores de emisión basados en masa se calculan a partir de las relaciones de emisión de carbono en gramos de contaminante por kg de combustible seco.

La fracción de carbono combustible efectiva es el carbono liberado del combustible dividido por el combustible seco total consumido durante el período de medición de la emisión (Ecuación 2).

$$Fuel_{CF,eff} = \frac{\sum^a (fuel_{mass,a} (1 - fuel_{MC,a}) fuel_{CF,a})}{\sum^a (fuel_{mass,a} (1 - fuel_{MC,a}))} \quad (2)$$

a: tipo de combustible (Carbón)

$Fuel_{CF,eff}$ : fracción efectiva de combustible y carbono, base seca (kgC/Kgfuel)



$fuel_{mass,a}$  : combustible húmedo consumido por tipo de combustible a (kg)

$fuel_{MC,a}$ : contenido de humedad, base húmeda para tipo de combustible a (-)

$fuel_{CF,a}$ : fracción de carbono combustible, base seca, para el tipo de combustible a (kgC/kgfuel).

Posteriormente el Software calcula el factor de emisión basado en el consumo de combustible como muestra la ecuación 3.

$$BC_{EF,mass} = BC_{CER} fuel_{CF,eff} 1000 \quad (3)$$

$BC_{EF,mass}$ : Factor de emisión de BC, basado en masa (gBC/kgfuel)

$BC_{CER}$ : Proporción de emisión de carbono BC (gBC/gC).

#### 4.5.2. Factor de emisión basados en consumo de energía:

Se calculan a partir de factores de emisión basados en masa y el poder calorífico efectivo del combustible (Ecuación 4). El valor efectivo de calentamiento del combustible es la energía liberada del combustible dividida por el combustible seco total consumido durante el período de medición de la emisión.

$$Fuel_{LHV,eff} = \frac{\sum^a (fuel_{mass,a} (1 - fuel_{MC,a}) fuel_{LHV,a})}{\sum^a (fuel_{mass,a} (1 - fuel_{MC,a}))} \quad (4)$$

$Fuel_{LHV,eff}$ : Poder calorífico efectivo del combustible (MJ/kgfuel)

$fuel_{LHV,a}$ : menor valor de calentamiento del combustible seco para el tipo de combustible a (MJ/kgfuel)

$$BC_{EF,energy} = BC_{EF,mass} fuel_{LHV,eff} 1000 \quad (5)$$

$BC_{EF, energy}$  : Factor de emisión de BC, basado en energía (gBC/MJ)

#### 4.5.3. Factor de emisión basado en producción de ladrillo

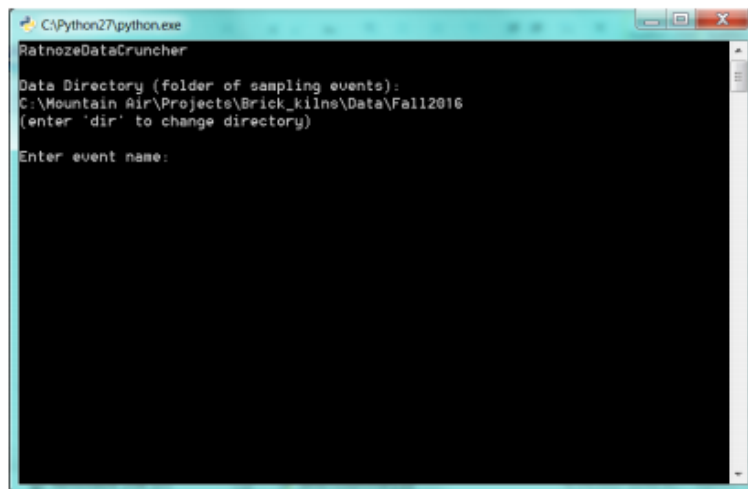
El factor de emisión basado en ladrillos es el producto del factor de emisión basado en la energía y el consumo de energía específico.

$$BC_{EF, brick} = BC_{EF, energy} SEC \quad (6)$$

$BC_{EF, brick}$ : Factor de emisión de BC, basado en ladrillos (gBC/kgbrick).

En la Figura 10 y en la Figura 11 podemos apreciar del software RatnozeDataCruncher la pantalla de comandos y de forma general la manera como se procesan los datos.

**Figura 10** Contenido inicial RatnozeDataCruncher.py



```
C:\Python27\python.exe
RatnozeDataCruncher

Data Directory (folder of sampling events):
C:\Mountain Air\Projects\Brick_kilns\Data\Fall2016
(enter 'dir' to change directory)

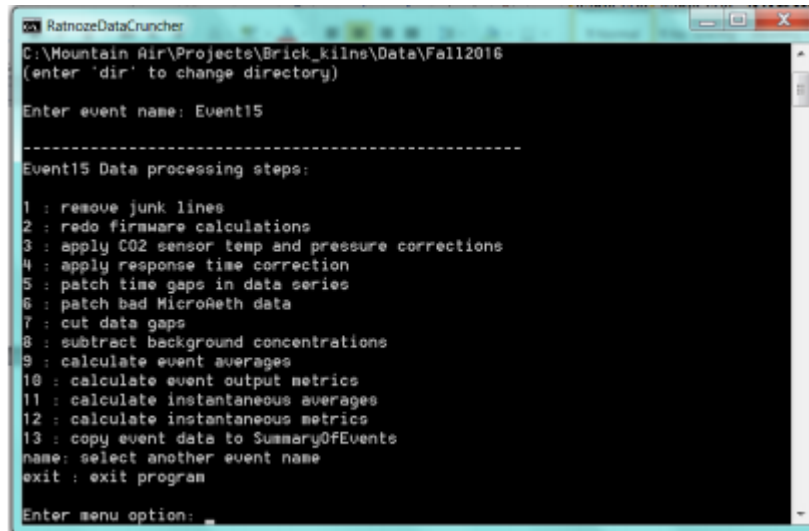
Enter event name:
```

Fuente: Thompson, 2017

Para procesar los datos se ingresó el nombre del evento y a continuación la pantalla mostro un listado de pasos de procesamiento que se observan en la Figura 11. Los pasos se realizaron en orden de 1 a 13. Ninguno de los pasos se puede omitir. Cada uno de los pasos llama una función específica. No es necesario completar todos los

pasos en la misma sesión, lo que significa que se pueden realizar los pasos 1-3, luego cerrar el programa y realizar los pasos 4-13 posteriormente. Si algún dato cambia se deben correr nuevamente los pasos anteriores para propagar los resultados hacia los pasos finales.

**Figura 11** Pasos de procesamiento de datos



```
RatnozeDataCruncher
C:\Mountain Air\Projects\Brick_kilns\Data\Fall2016
(enter 'dir' to change directory)

Enter event name: Event15
-----
Event15 Data processing steps:
1 : remove junk lines
2 : redo firmware calculations
3 : apply CO2 sensor temp and pressure corrections
4 : apply response time correction
5 : patch time gaps in data series
6 : patch bad MicroAeth data
7 : cut data gaps
8 : subtract background concentrations
9 : calculate event averages
10 : calculate event output metrics
11 : calculate instantaneous averages
12 : calculate instantaneous metrics
13 : copy event data to SummaryOfEvents
name: select another event name
exit : exit program
Enter menu option: _
```

Fuente: Thompson, 2017

#### **4.6. Determinación de las emisiones de PM2.5 y Carbono Negro para los hornos ladrilleros de los departamentos Norte de Santander y Santander**

Con base en los factores de emisión obtenidos del software RatnozeDataCruncher se calcularon las emisiones de Material Particulado Fino (PM2.5) y Carbono Negro (BC) para los hornos ladrilleros de los departamentos de Norte de Santander y Santander. Calculándose a partir de los factores de emisión basados en el combustible y la tasa de consumo de combustible. El cálculo de la velocidad de muestreo requiere la medición de la masa de combustible y el contenido de humedad para cada tipo de combustible consumido durante el período de medición de la emisión:

$$fuel_{rate} = \frac{\sum^a (fuel_{mass,a} (1 - fuel_{MC,a}))}{\Delta t_{test}} 60 \quad (7)$$

$\Delta t_{test}$ : Duración del periodo de prueba (min)

La ecuación para la tasa de emisión de BC se muestra a continuación. Otras especies siguen la misma fórmula:

$$BC_{ER} = BC_{EF, mass} fuel_{rate} \quad (8)$$

$BC_{ER}$ : Tasa de emisión de BC (gBC/hr)

#### **4.7. Comparación de los resultados obtenidos con la información suministrada por la Corporación Ambiental Empresarial de un horno artesanal del departamento de Cundinamarca**

La Corporación Ambiental Empresarial suministró los datos de un monitoreo realizado en abril en un horno artesanal de una empresa ladrillera ubicada en el departamento de Cundinamarca. Estos datos se corrieron en el software para determinar las mismas variables calculadas para los hornos de las empresas Norte de Santander y Santander, con el fin de comparar los tres tipos de tecnologías (intermitente, continuo y artesanal).

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Análisis de combustible

El análisis de combustible proporciono datos de entrada al software RatnozeDataCruncher para el cálculo del factor de emisión basado en el combustible y en la energía que puede producir. Este análisis lo realizó el laboratorio Mintec Ceramic Ltda., especializado en asesoría técnica para el sector cerámico, donde se analizaron las muestras colectadas en campo, que en este caso fueron de carbón para los tres hornos ladrilleros en cuestión. En el archivo de entrada *Event\_fuel* se introdujeron los datos relacionados con el combustible y la producción de ladrillo; algunos de estos datos se tomaron en campo como la masa de combustible consumida y tiempo en el que se midió; de igual forma, la cantidad de ladrillos producidos y el tiempo de producción de estos. Los datos restantes se tomaron del análisis de laboratorio, los cuales son: Humedad residual, poder calorífico y porcentaje de carbono en base seca (véase Tabla 2 y 3).

**Tabla 2** Resultados del Análisis de Combustible (como se recibe en el laboratorio)

Parámetro	Cundinamarca	Santander	Norte de Santander	Inc. %
	Artesanal	Continuo	Intermitente	
Humedad residual (%masa)	1.14	1.71	2.67	0.30
Ceniza (%masa)	11.44	11.18	9.46	0.50
Material Volátil (%masa)	33.61	40.42	38.58	0.70
Carbono fijo (%masa)	53.81	46.69	49.29	1.50
Azufre Total (%masa)	0.75	1.01	0.96	0.05
Poder calorífico (Kcal/kg)	7483	7316	7700	28.00
Poder calorífico (BTU/lb)	13.46	13.16	13.851	28.00
Poder calorífico (MJ/kg)	56.36	55.1	57.99	28.00
Índice de hinchamiento	1 1/2	1 1/2	2 1/2	-

Fuente: Laboratorio Mintec Ceramic Ltda.

**Tabla 3** Tabla 3 Resultados del Análisis de Combustible (base seca)

Parámetro	Artesanal	Continuo	Intermitente	Inc. (%)
	Base seca (%)	Base seca (%)	Base seca (%)	
Carbono	55.43	74.58	76.13	0.3
Hidrógeno	4.82	5.54	5.64	0.7
Oxígeno	4.97	5.92	5.92	0.7
Nitrógeno	1.72	1.56	1.6	0.7

Fuente: Laboratorio Mintec Ceramic Ltda.

De acuerdo con los datos reportados por el laboratorio Mintec Ceramic Ltda., y la respectiva evaluación de los mismos, el laboratorio ha considerado que el carbón analizado es apto para el uso en los hornos ladrilleros de acuerdo a los siguientes parámetros (Mintec Ceramic, 2017):

- **Cenizas:** El valor máximo recomendado es del 10% ya que si este es mayor se baja el poder calorífico del combustible
- **Humedad:** Se considera que la humedad máxima permitida es del 3% ya que por encima de este valor la energía que se debe usar para la cocción del ladrillo se utilizaría en secar el material combustible con lo que se generarían sobre costos en el proceso productivo.
- **Material volátil:** El contenido en material volátil nos indica la facilidad que tiene el para que haga ignición. Para el caso de los combustibles sólidos este contenido no debe ser menor del 30% para que la ignición se realice con facilidad.
- **Azufre:** Por normatividad ambiental se exigen contenidos menores al 1%.  
Azufre

- **Poder Calorífico:** Para que el proceso resulte económicamente rentable el poder calorífico debe ser superior a 6.500 Kcal/Kg.

## 5.2. Eficiencia Energética de los hornos en cuestión

El consumo específico de energía (SEC) es una medida de la eficiencia del proceso del horno, en la cual se relaciona el consumo de energía con la producción de ladrillos. La SEC es alta cuando hay altas pérdidas de energía en un horno. Los diferentes tipos de ladrillos requieren diferentes temperaturas de cocción y ciclos de tratamiento térmico, por lo que la SEC varía con el tipo de ladrillo hasta cierto punto, pero en general es la más métrica apropiada para comparar la eficiencia energética del horno. El contenido de energía de los combustibles fue bastante uniforme en los tres hornos estudiados, lo que implica que las diferencias en el SEC se deben a las diferencias en la alimentación de combustible normalizada de ladrillo (kg de combustible / kg de ladrillo).

La Tabla 4 presenta los datos recolectados de producción de ladrillo, consumo de combustible y consumo de energía, que son relevantes para el cálculo de los factores de emisión por el software, adicionalmente se encontró el valor del Consumo Específico de Combustible (SEC).

Si se compara el valor de SEC obtenido para este monitoreo con el promedio de la línea estandarizada año base 2016 desarrollada por la CAEM durante la ejecución del proyecto de Eficiencia Energética en Ladrilleras de América Latina EELA, los hornos Colmena que funcionan con carbón en Colombia presentan un SEC promedio de aproximadamente 5.0 MJ/kg; los hornos Hoffman que funcionan con carbón en Colombia presentan un SEC promedio de aproximadamente 0.8 MJ/kg,

y los hornos artesanales presentan un SEC promedio de 2.3 MJ/kg, por tanto, comparando los datos, los hornos estudiados funcionan de forma menos eficiente que el promedio. Como se puede observar en la Tabla 4 el horno de mayor eficiencia energética es el continuo a diferencia del artesanal y el intermitente.

**Tabla 4** Resultados Eficiencia Energética Horno Artesanal

Tecnología	Producción de ladrillo (kg/hr)	Consumo de combustible (kg/hr)	Consumo de Energía (MJ/hr)	SEC (MJ/kg_brick)
	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio
Continuo	1667.00	67.16	3700.52	2.22
Intermitente	1821.43	229.20	13291.52	7.30
Artesanal	354.86	30.21	1702.54	4.80

Fuente: Autoras

### 5.3. Factores de emisión para PM2.5 y BC

La Tabla 5 y la Tabla 6 presentan los factores de emisión de PM2.5 y BC, respectivamente; basados en la producción de ladrillo, la masa de combustible y el consumo energético, determinados a partir de los muestreos isocinéticos realizados en este estudio (Ladrillera Santander y Norte de Santander) y el suministrado por CAEM (Ladrillera Cundinamarca). Estos factores de emisión son calculados para estimar las emisiones de PM2.5 y Carbono negro generadas por los hornos ladrilleros en estudio.



**Tabla 5** Factores de emisión de PM2.5 basados en la producción de ladrillos, masa de combustible y consumo energético para la industria ladrillera

Horno	Tecnología	Factor de Emisión PM2.5					
		EFPM2.5 (g/kg brick)	$\sigma$	EFPM2.5 (g/kg fuel)	$\sigma$	EFPM2.5 (g/MJ energy)	$\sigma$
Hoffman	Continuo	0.0047	0.0023	0.1168	0.0583	0.0021	0.0010
Colmena	Intermitente	0.0621	0.0354	0.4931	0.2809	0.0085	0.0048
Fuego Dormido	Artesanal	0.1736	0.1247	2.0390	1.4652	0.0362	0.0259

Fuente: Autoras

\* $\sigma$ : Desviación estándar

**Tabla 6** Factores de emisión de BC basados en la producción de ladrillos, masa de combustible y consumo energético para la industria ladrillera

Horno	Tecnología	Factor de Emisión BC					
		EF BC (g/kgbrick)	$\sigma$	EFBC (g/kgfuel)	$\sigma$	EFBC (g/MJ energy)	$\sigma$
Hoffman	Continuo	0.0004	0.0001	0.0088	0.0027	0.0002	0.0000
Colmena	Intermitente	0.0224	0.0244	0.4625	0.1940	0.0031	0.0033
Fuego Dormido	Artesanal	0.0009	0.0008	0.0111	0.0094	0.0002	0.0002

Fuente: Autoras

\* $\sigma$ : Desviación estándar

Se calculó la desviación estándar de los factores de emisión de cada contaminante con el fin de conocer la incertidumbre de los resultados obtenidos. Esta desviación indica que entre más alta esta sea, mayor es la dispersión de los datos. Como podemos ver en la Tabla 5, la desviación estándar de los factores de emisión de PM2.5 calculados para el horno Fuego Dormido fue mayor que la de los factores de emisión calculados para el horno Hoffman y Colmena; esto puede deberse al proceso de combustión que realiza la empresa ladrillera, el cual no es continuo debido a que es un horno netamente artesanal, y por lo tanto no se logra una

combustión completa. Además de que el proceso no cuenta con una dosificación de combustible estándar.

En la Tabla 6, estudiando la dispersión de los datos, el horno Hoffman obtuvo un valor bajo de desviación estándar en comparación con los otros hornos, y por ende es probable que las emisiones sean mínimas. Esto indica que el proceso de combustión que se da dentro del horno es eficiente; de igual forma cabe, resaltar que, comparado con el horno intermitente, el consumo energético es menor; lo mismo sucede con el consumo de combustible (se comparó el continuo con el intermitente porque la producción de ambos hornos es cercana).

En la Tabla 6 se puede observar que los resultados correspondientes a los factores de emisión de BC para el horno fuego dormido son bajos, se esperaba que por ser un horno de tecnología artesanal estos valores fueran mayores a comparación de los otros hornos, esto significa que en este tipo de hornos las emisiones de BC no son significativas.

#### **5.4. Tasas de emisión de PM<sub>2.5</sub> y BC de los hornos ladrilleros en estudio**

En la Tabla 7 se observan los resultados de tasas de emisión para los hornos Hoffman, Colmena y Fuego Dormido de tecnología continua, intermitente y artesanal respectivamente.

**Tabla 7** Tasa de emisión de PM2.5 y BC en los Hornos Hoffman, Colmena y Fuego Dormido

<b>Tecnología</b>	<b>Evento</b>	<b>Jornada</b>	<b>ERPM2.5 (g/hr)</b>	<b>ERBC (g/hr)</b>
<b>Continuo</b>	<b>E vent01</b>	Diurno	3,9807	0,4092
	<b>Event02</b>	Nocturno	9,5179	0,6678
<b>Intermitente</b>	<b>Event03</b>	Nocturno	153,8080	108,8809
	<b>Event04</b>	Diurno	134,0941	72,6293
	<b>Event05</b>	Nocturno	28,3471	13,4826
	<b>Event06</b>	Diurno	59,6385	0,7667
	<b>Event07</b>	Nocturno	179,9278	34,1540
<b>Artisanal</b>	<b>Event08</b>	Diurno	52,4455	0,5462
	<b>Event09</b>	Nocturno	73,8654	0,2748
	<b>Event10</b>	Diurno	109,0650	0,5498
	<b>Event11</b>	Nocturno	25,5600	0,1768
	<b>Event12</b>	Diurno	136,8434	0,9030

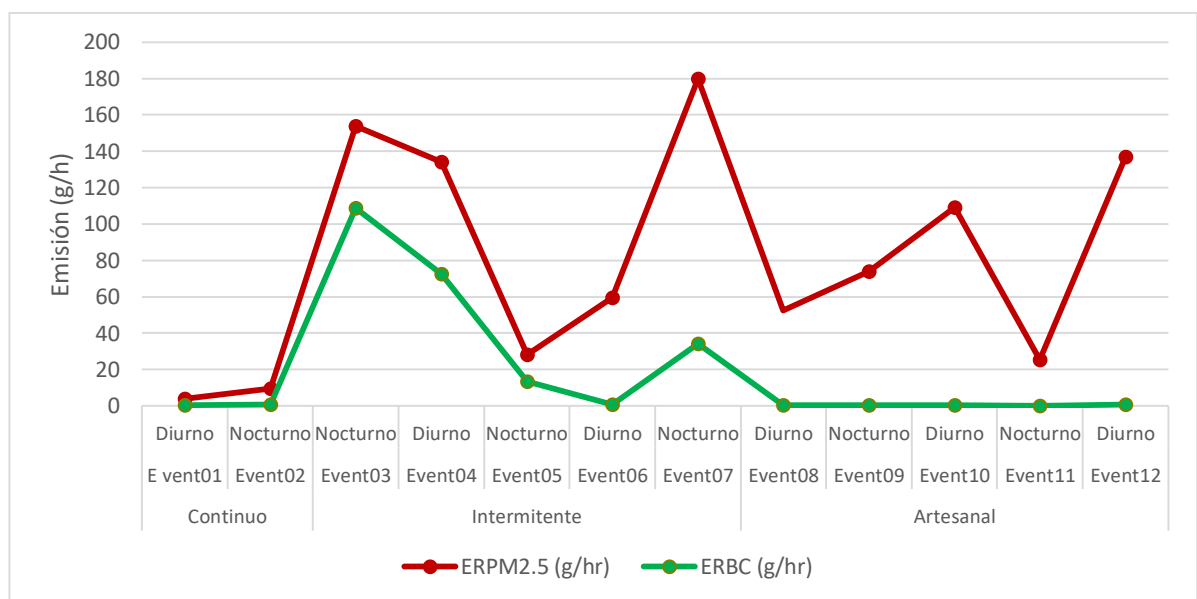
Fuente: Autoras

La Tabla 7 presenta las tasas de emisión de PM2.5 y BC que fueron calculadas a partir de los factores de emisión basados en el combustible y la tasa de consumo. Las emisiones de los hornos ladrilleros dependen principalmente del tipo de tecnología y de combustible. Debido a que los hornos en estudio manejan el mismo combustible (Carbón), se compararon las emisiones de acuerdo con el tipo de tecnología. En la Gráfica 1 se puede observar que el horno Hoffman de operación continua es el que presenta menores emisiones de PM2.5 Y BC. El horno que presenta mayores emisiones de PM2.5 es el Colmena y Fuego dormido, de tecnología intermitente y artesanal respectivamente, como se muestra en la Tabla 7. Otro factor que interviene en el aumento de las emisiones es el contenido de humedad de los ladrillos con el que ingresa al horno.

El horno colmena posee una pieza llamada Dumper, la cual permite o restringe la salida de los gases. Este es usado con el fin de impedir el paso del humo cuando la

quema está finalizando para darle cierta tonalidad a los ladrillos. Una vez termina este proceso, el Dumper se abre, permitiendo la salida de los gases, causando de esta manera un aumento significativo de las emisiones, es por esta razón que en el último evento de muestreo realizado en el horno Colmena del departamento Norte de Santander, se registraron valores mayores de PM2.5 y BC.

**Gráfico 1** Emisión de PM2.5 y BC en hornos ladrilleros



Fuente: Autoras

El horno artesanal exhibió características de emisión y de combustión diferentes a los otros hornos. Los factores de emisión fueron sustancialmente mayores para PM2.5 (véase Tabla 5), mientras que las emisiones de BC fueron más bajas que todos los demás hornos. Esta tendencia es característica de la combustión lenta. La estructura de este horno es cerrada. En la superficie quedan algunas aberturas que es por donde salen los gases en el momento de la quema; el color del humo era completamente blanco como podemos ver en la Figura 12.

Según estudios anteriores, las emisiones de Carbono Orgánico son bastantes significativas a comparación con las de Carbono Negro para este tipo de tecnología de horno (Thompson et al. 2016). En este proyecto no se estudió este compuesto, pero sería muy interesante analizar su comportamiento.

**Figura 12** Horno Fuego Dormido



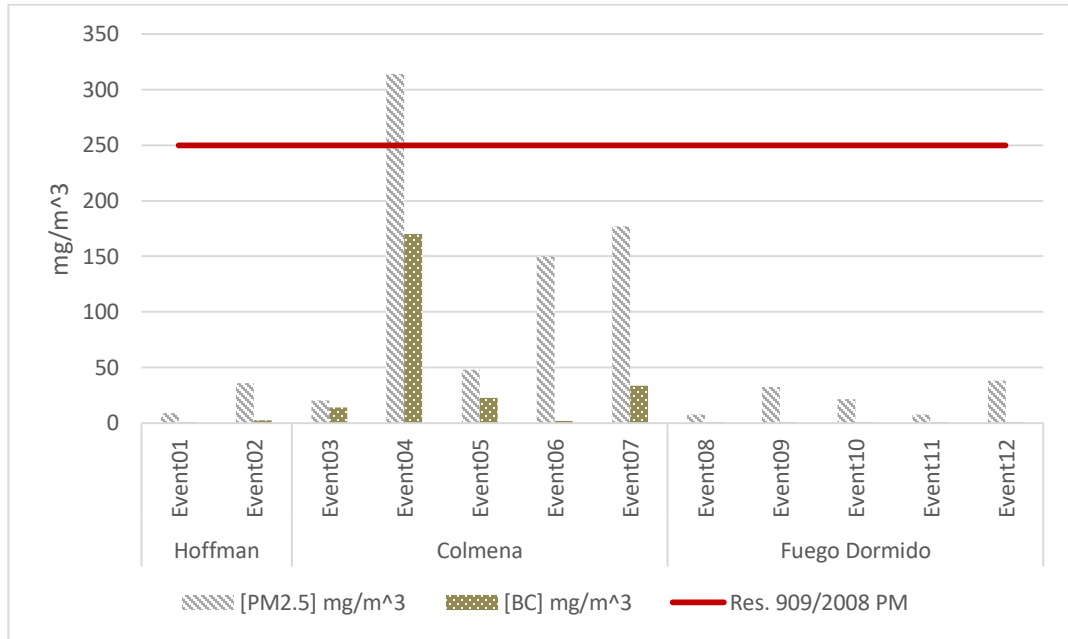
Fuente: CAEM,2017

### **5.5. Concentraciones de PM2.5 y BC en hornos de empresas ladrilleras**

En la Tabla 29,30 y 31 del Anexo G se encuentran las concentraciones de PM2.5 y BC del Horno Hoffman, Colmena, y fuego dormido respectivamente.

En el Gráfico 2 se observa el comportamiento de las concentraciones de PM2.5 y BC durante los eventos de muestreo realizados en los tres hornos ladrilleros.

**Gráfico 2** Concentraciones de PM2.5 y BC

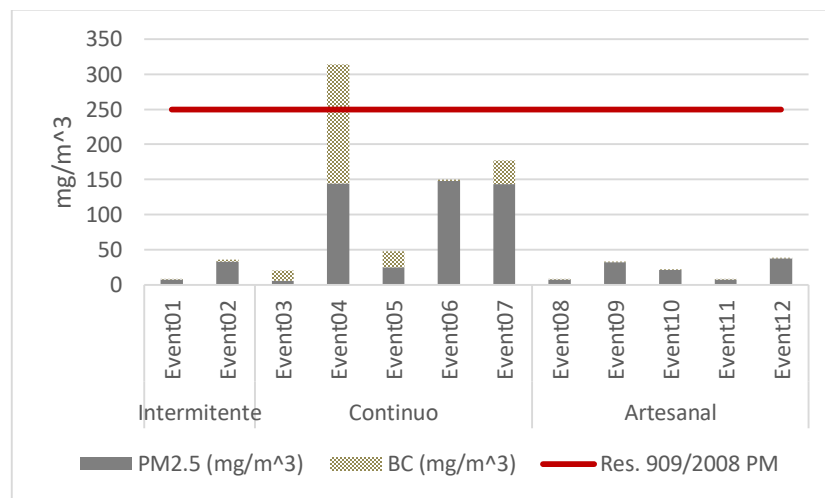


Fuente: Autoras

En el Gráfico 2 se puede observar que la concentración máxima de PM2.5 es de 314 mg/m<sup>3</sup> para el evento 4, siendo este el único evento que supera el estándar admisible de 250 mg/m<sup>3</sup> para material particulado por la Resolución 909 del 2008 “Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones” (MINAMBIENTE, 2008). Para este mismo evento, se da la máxima concentración de BC de 170.17 mg/m<sup>3</sup>, siendo el horno colmena el que presenta las mayores concentraciones de PM2.5 y de BC con promedios de 119.50 mg/m<sup>3</sup> y 40.48 mg/m<sup>3</sup> respectivamente. El horno fuego Dormido presenta concentraciones de PM2.5 promedio de 24.91 mg/m<sup>3</sup> y de BC de 0.13 mg/m<sup>3</sup> y el horno Hoffman 22.34 mg/m<sup>3</sup> y BC de 1.71 mg/m<sup>3</sup>.

Según lo anterior la concentración de BC más baja la presenta el horno fuego dormido, por lo cual se puede manifestar de acuerdo con los resultados de CAEM en el 2016, en las cuales se realizaron análisis térmico óptico, donde se apreciaron concentraciones bajas de carbono elemental el cual se puede asociar como carbono negro, en cambio las concentraciones de carbono orgánico fueron altas. Para el horno fuego dormido no es relevante evaluar las concentraciones de carbono negro lo cual se puede aludir a que la salida de humo expulsado presenta pigmentación gris – blancuzco en comparación con los otros hornos donde el humo presento pigmentación negruzca. El contenido de BC en el PM2.5 por evento medido se puede apreciar en el Gráfico 3.

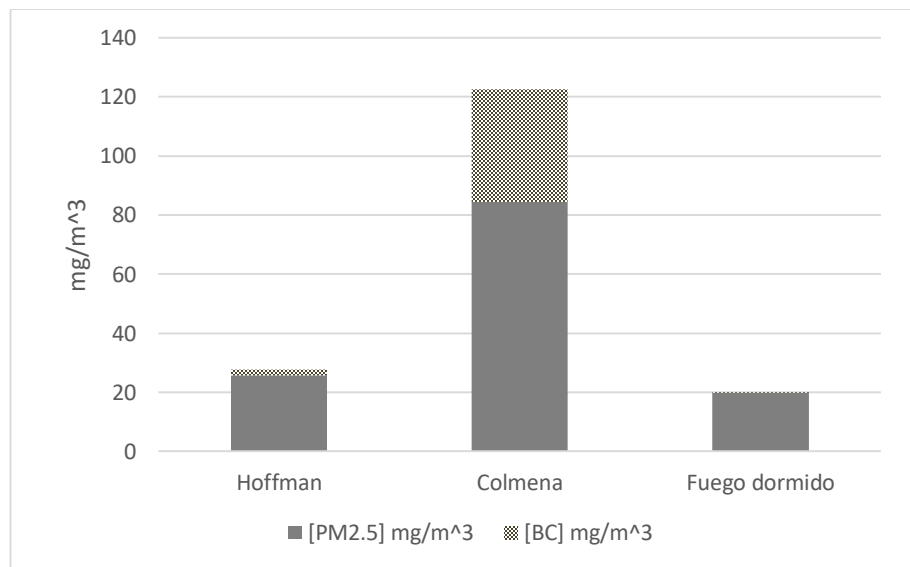
**Gráfico 3 Relación BC/PM2.5 por evento de muestreo**



Fuente: Autoras

En el gráfico 4 se aprecia el contenido de BC en el PM2.5 en el horno Hoffman; el BC es relativamente bajo (no mayor al 8% del PM2.5). Para el horno Colmena se determinó un contenido de carbono negro en el material particulado mayor al 30%, lo cual se atribuye a la combustión incompleta, debido a que la reacción de oxidación es menos eficiente en comparación con el horno Hoffman. Para el horno fuego dormido se determinó un contenido muy bajo (aproximadamente de 0.5% de BC) y una concentración mayor de PM2.5 en comparación con el Hoffman.

**Gráfico 4 Relación BC/PM2.5 por tecnología**



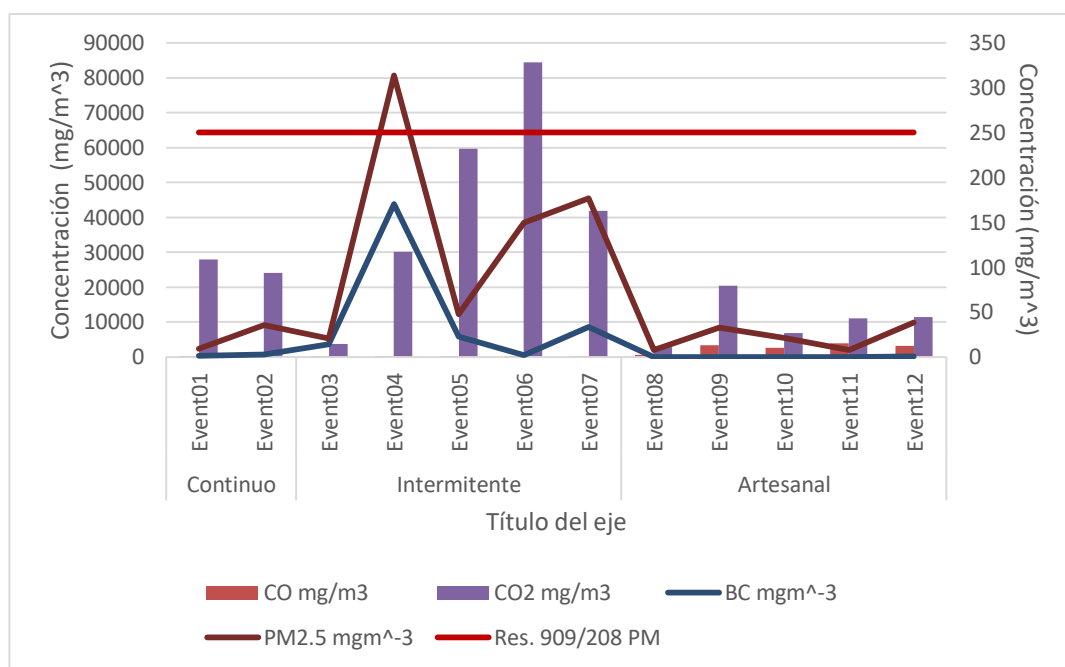
Fuente: Autoras



## 5.6. CONCENTRACIÓN DE CO, CO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub> Y BC

En la tabla 32 del Anexo H se presentan las concentraciones en tiempo real de CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub> y BC para los diferentes eventos de muestreos realizados en los tres tipos de hornos y en el Grafico 5 se aprecia el comportamiento de estas especies según el tipo de tecnología de cada horno.

**Gráfico 5 Concentración de gases, PM<sub>2.5</sub> Y BC**



Fuente: Autoras

En condiciones de combustión óptimas, el contenido total de carbono de los combustibles debería convertirse en CO<sub>2</sub> (GCE, 2013), pero cuando se tiene una combustión ineficiente el carbono es liberado de forma inmediata a la atmósfera y una parte de esta no se oxida por lo que se emite como CO. En el gráfico 5 se puede observar que cuando las concentraciones de carbono negro son altas, las de CO<sub>2</sub> disminuyen. El monóxido de carbono (CO) que se observa en el horno artesanal se

forma por la combustión lenta (llamada smoldering combustion en inglés) que predomina dentro del horno fuego dormido, incluyendo la ineficiente mezcla de oxígeno y carbón y al no control de temperatura dentro del horno, este gas predomina sobre el carbono negro porque el aire pasa a través del lecho de carbón, quedando este retenido dentro del horno.

## 6. CONCLUSIONES

La desviación estándar de los factores de emisión de PM<sub>2.5</sub> calculados para el horno Fuego Dormido fue mayor (0.1247, 1.4652 y 0.0259, con base en la producción de ladrillo, consumo de combustible y consumo energético respectivamente) que la de los factores de emisión calculados para el horno Hoffman (0.0023, 0.0583 y 0.0010, con base en la producción de ladrillo, consumo de combustible y consumo energético respectivamente) y Colmena (0.0354, 0.2809 y 0.0048, con base en la producción de ladrillo, consumo de combustible y consumo energético respectivamente); esto se debe al proceso de combustión que realiza la empresa ladrillera, el cual no cuenta con una dosificación de combustible estándar.

Se estimaron las emisiones promedio de BC, en un horno continuo (0.5896 g BC/h), horno intermitente (40.8915 g BC/h) y horno artesanal (0.3362 g BC/h) y para PM<sub>2.5</sub> en horno continuo (7.8445 gPM<sub>2.5</sub>/h), horno intermitente (113.02257 gPM<sub>2.5</sub>/h) y horno artesanal (61.5938 gPM<sub>2.5</sub>/h) a partir de la relación de los factores de emisión de combustible promedio de cada uno de los contaminantes por la tasa de consumo de combustible. Teniendo así el horno colmena de tecnología intermitente con las mayores emisiones. Comparando las emisiones de PM<sub>2.5</sub> y BC provenientes del horno intermitente, las emisiones de estas especies disminuyen más del 92% si se utiliza el horno de tecnología continua.

Según la actualización del inventario nacional del sector ladrillero del 2015 realizado por la CAEM, el 91.4% de los hornos identificados son tecnologías artesanales e intermitentes. En este estudio se evidenciaron altas concentraciones de PM<sub>2.5</sub> y BC en el horno Colmena de tecnología intermitente, especialmente durante el cuarto evento de muestreo con 314.19 mg/m<sup>3</sup> y 170.19 mg/m<sup>3</sup> respectivamente, superando el nivel máximo permisible según la resolución 909 del 2008 (250 mg/m<sup>3</sup>) para el material particulado en fuentes fijas. Durante este evento se mantiene la máxima temperatura del horno, permitiéndose la quema total de ladrillos; estos ladrillos

generalmente ingresan al horno con un contenido de humedad alto y este parámetro influye en el aumento de las concentraciones de estas especies.

La SEC fue baja para el horno Hoffman, mientras que la SEC para el horno colmena fue más del triple, una de las razones que explican este comportamiento es la estructura, ya que los hornos continuos generalmente son diseñados para conservar energía porque tienen paredes de ladrillo grueso y techo que aíslan la cámara de combustión, y reciclan el calor residual precalentando ladrillos fríos con gases de escape calientes, a diferencia del horno colmena, en el cual los ladrillos no están tan bien empaquetados a comparación con cualquier otro horno y por ende las pérdidas de calor convectivas en las puertas son altas en este horno. En este horno el consumo de combustible también es casi el doble, por esto y por el proceso de combustión (intermitente) el contenido de BC en el PM2.5 superó el 30%, todo lo contrario, sucedió con el horno Hoffman, del cual el contenido de BC fue del 7%, de lo anterior podemos concluir que a mayor SEC mayor serán las emisiones del horno y el contenido de BC en el PM2.5.

Es importante generar este tipo de estudios en Colombia debido a la inexistencia de información correspondiente a factores de emisión de BC para carbón mineral ya que este combustible es empleado por el 70% de los hornos de la industria ladrillera colombiana. Se espera que esta investigación sirva como base técnica para la toma de decisiones por parte de las entidades encargadas y el gremio académico dedicados a estudiar y regular el fenómeno de la contaminación ambiental en el país junto con el gremio industrial ladrillero.

## 7. RECOMENDACIONES

Se recomienda tomar los datos de la cantidad de carbón inyectado de manera específica por cada periodo de medición, ya que este es un factor que influye en el porcentaje de error de los factores de emisión hallados. Por esta razón, la dosificación debe ser considerada, así como si las mediciones se hacen durante periodos de día o noche.

Es necesario que se realice la misma cantidad de mediciones (eventos) por cada tipo de horno, incluyendo el tiempo de medición con el fin de tener la misma cantidad de eventos para las diferentes tecnologías, y así poder argumentar mejor en el momento de comparar resultados. De igual forma para el caso de tecnologías diferentes a la continua sería preferible realizar las mediciones para el periodo completo de quema.

Se recomienda incluir el análisis de Carbono Orgánico en las investigaciones que se realicen en hornos ladrilleros artesanales, ya que en este estudio se evidenció que el Carbono Negro no es significativo para esta tecnología, pero según estudios realizados, el carbono orgánico si puede llegar a ser un factor determinante de contaminación muy importante.

Las factores de emisión disponibles en la literatura, usan como combustible en su mayoría biomasa en diferentes tecnologías, por el contrario para hornos que usan el carbón se registra en un solo tipo de tecnología, siendo esta una demostración de la importancia de llevar a cabo este tipo de estudios ya que el carbón es el más usado en la industria ladrillera nacional, teniendo en cuenta que Colombia cuenta con importantes reservas de carbón y permite abastecer las demandas nacionales y algunos mercados externos, es de esperarse que el carbón continúe como un energético representativo para la combustión en los hornos de la industria ladrillera nacional, por lo cual se debe contar con factores de emisión que permitan el desarrollo de una política pública apropiada y articulada con la realidad de nuestras

condiciones. Además de esto, es necesario implementar alternativas de mejora energética o tecnológica para este sector, como, por ejemplo, la adecuación de dosificadores con inyección de aire en hornos colmena, ya que uno de los problemas es que la dosificación no es continua y las cantidades son irregulares. Otra adecuación tecnológica es la optimización granulométrica del carbón.

## 8. BIBLIOGRAFIA

CAEM (2015). Validate inventory of the brick sector.

CAEM (2017). Reporte de mediciones de Carbono Negro y PM2. 5 en la Ladrillera La Campana, ubicada en la región del Quindío.

CCA (2015), Directrices para la estimación de las emisiones de carbono negro de América del Norte: métodos recomendados, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, 105 pp.

CCAC (2015). Mitigating Black Carbon and Other Pollutants From Brick Production, 1–10.

CCAC. (2016). Manual capacitación sector ladrillero en América Latina.

Steiner, A. (2014). Sustainability. EXECUTIVE PERSPECTIVE: Air Pollution – A Silent Killer. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente de las Naciones Unidas y Ejecutivo. <http://sustainability.thomsonreuters.com/2014/06/19/executive-perspective-air-pollution-silent-killer/>.

EELA (2011). Caracterización de los hornos usados en la industria ladrillera. pp. 1–14.

Ministerio de producción (2010). Guía de buenas prácticas para ladrilleras artesanales, Perú.

Ibíd., P.4

Ibíd., P.5

EPA. (1996). Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México. Volumen III - Técnicas Básicas de Estimación de Emisiones.

EPA. (2017). Basic information. Black Carbon. Tomado de: Tomado de: <https://www3.epa.gov/airquality/blackcarbon/basic.html> [Acceso 2 Mar. 2017].

Solaun, K., Sopelana, A., Arraibi, E., & Perez, M., (2014). Black Carbon y sus efectos en el clima.

INECC (2014). Evaluación de PM 2.5, compuestos orgánicos volátiles y ozono para definir medidas de control en la Zona Metropolitana de Guadalajara: Etapa III.

J. Deng, Y. Zhang, Y. Hong, L. Xu, Y. Chen, W. Du, and J. Chen. (2016). Optical properties of PM2.5 and the impacts of chemical compositions in the coastal city Xiamen in China, *Sci. Total Environ.*, vol. 557–558, pp. 665–675.

García, M., Santacoloma, M., Sánchez, B., Dávila, & Leticia, L. (2004). Rediseño de procesos productivos mediante reconversión tecnológica de las pequeñas empresas ladrilleras ubicadas en el parque minero industrial del Mochuelo.

Ibid., P. 60

Ibíd., P. 61

Ibíd., P. 62

Ibíd., P. 63

GCE, (2013). Manual del sector de energía. Quema de combustibles.



Maíz, P. (2012). Taller sobre Políticas Públicas para Mitigar Impacto Ambiental de Ladrilleras Artesanales Experiencias en Medición de Emisiones en Hornos para Manufactura Artesanal de Ladrillos en México.

MINAMBIENTE (2008). Resolución 909. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible del gobierno de Colombia.

OMS (2011). Organización Mundial de la Salud. Calidad del aire y salud. Public Health and Environment - World Health Organization (WHO). Disponible en <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>.

Rajarithnam, U., Athalye, V., Ragavan, S., Maithel, S., Lalchandani, D., Kumar, S., Bond, T. (2014). Assessment of air pollutant emissions from brick kilns. Atmospheric Environment (Vol. 98). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.075>

Thompson, R (2016). Ratnoze2 User Guide.

Thompson, R., Floess, E., Weyant, C., Bond, T., & Baum, E. (2016). Brick kiln measurements in Colombia: Energy and emissions.

Thompson, R., Weyant, C., Bond, T., & Baum, E. (2016). Brick Kiln Emissions Sampling Protocol: Dilution sampling for climate-relevant particle emissions, 1–36.

Thompson, R. (2017). Ratnoze Data Processing Instructions For RatnozeDataCruncher version 1.0, 1–29.

Van, G., & Drake, F. (2009). El tutorial de python.

UNEP (2012). XIX Meeting of the Forum of Ministers of Environment for Latin America and the Caribbean. 1–6.

UPME (2001). Determinación de eficiencia energética en el subsector industrial colombiano de ladrillo, vidrio y cerámica.

U.S. EPA (1995a). Compilation of Air Pollutant Emission Factors - Volume I: Stationary Point and Area Sources, Fifth Edition and Supplement A, AP-42, U.S. Environmental Protection Agency. Research Triangle Park, North Carolina. January 1995.

Mintec Ceramic (2017). Informe de Resultados Análisis Próximo Carbón Ladrillera.P.3

## 9. ANEXOS

A Formato de recolección de datos en campo

i. Evento 1 Bucaramanga, Santander

**Tabla 8** Datos colectados en campo - Evento 1

Ratnoze Kiln Data Sheet			Holder #		Filter ID					
Date	18/07/2017		3103	F1	Stage 1	BC-C-14				
Time	8:45 llegada				Stage 2					
Technician	FRE,FA,YE,SHA		3102	F2	Stage 1	PM2.5-C-12				
Computer	Azul				Stage 2					
Site	Santander		Initial Conditions							
			AethFlow	IsoFlow	F1Flow	F2Flow	GasFlow	DilFlow	Cyclone	
Event	1		Sensor (sccm)	48	314	99	813	281	104	-
Medicion dia			Bubble (ccm)	-	-	159.9	938.1	354	183.9	1497
Probe	1 seccion		Dilution Ratio	15.82		Ambient Temperature (C)		32.8		Ambient RH (%)
			Stack Velocity (m/s)	7.11		Ambient Pressure (hPa)		918.72		58.3
Nozzle #	3		Final Conditions							
			AethFlow	IsoFlow	F1Flow	F2Flow	GasFlow	DilFlow	Cyclone	
Nozzle Diam. (m)	2.381		Sensor (sccm)	48	1176	103	817	256	1138	-
Fuel	carbon mineral		Bubble (ccm)	0	1022	160.4	934.8	223.3	1354	1422
			Dilution Ratio	13.52		Ambient Temperature (C)		30.7		Ambient RH (%)
			Stack Velocity (m/s)	7.59		Ambient Pressure (hPa)		916.35		80.8
Time			Pre-background		Sample Period		Post-background			
			start	stop	start	stop	start	stop		
			9:12	9:56	9:57	16:15	16:30	16:35		
Time	Notes									
9:12	encendido									
	no se presentaron inconvenientes durante esta primera medicion									
Make dimensional drawing of stack cross-section and sample points on back side										

ii. Evento 2 Bucaramanga, Santander

**Tabla 9** Datos colectados en campo - Evento 2

Ratnoze Kiln Data Sheet		Holder #		Filter ID			
Date	18/07/2017	3026	F1	Stage 1	BC-C-12		
Time	17:40	3023	F2	Stage 1	PM2.5-C-08		
Site	Santander Ladrillera el Diamante	Initial Conditions					
Event	2 Noche	AethFlow	IsoFlow	F1Flow	F2Flow	GasFlow	DilFlow Cyclone
Probe	1 Sección	Sensor (scm)	0	1248	99	799	281 1070 -
Nozzle #	3	Bubble (ccm)	-	1302	138.8	897.3	403 1232 1503
Nozzle Diam. (mm)	2.381	Dilution Ratio	23	Ambient Temperature (C)	22.8	Ambient RH (%)	
Fuel	Carbón mineral	Stack Velocity (m/s)	7	Ambient Pressure (hPa)	918.05		86
		Final Conditions					
		AethFlow	IsoFlow	F1Flow	F2Flow	GasFlow	DilFlow Cyclone
		Sensor (scm)	0	1058	81	761	376 1182 -
		Bubble (ccm)	-	1222	137.8	891.9	476.9 1387 1501
		Dilution Ratio	22	Ambient Temperature (C)	27.3	Ambient RH (%)	
		Stack Velocity (m/s)	6.36	Ambient Pressure (hPa)	920.76		79.5
		Pre-background		Sample Period		Post-background	
		start	stop	start	stop	start	stop
		17:55	18:13	18:14	8:48	8:50	9:05
Time	Notes						
17:40							
18:09	Segunda prendida						
78	HR sensor, para esta medición las condiciones de lluvia						
19 de Julio	El equipo se encontro operando en condiciones normales						
Make dimensional drawing of stack cross-section and sample points on back side							

iii. Evento 3 Cúcuta, Norte de Santander

Tabla 10 Datos colectados en campo - Evento 3

Ratnoze Kiln Data Sheet			Holder #		Filter ID					
Date	24/07/2017		3103	F1	Stage 1		BC-C-08			
Time	18:52		3102	F2	Stage 1		PM2.5-C-10			
Technician	FRE, FA, YE, SHA									
Computer	AZUL									
Site	Cúcuta									
Event	1 Noche		Initial Conditions							
Probe	2 secciones		AethFlow	IsoFlow	F1Flow	F2Flow	GasFlow	DilFlow Cyclone		
Nozzle #	3		Sensor (sccm)	-	1166	97	802	453	1266	1493
Nozzle Diam. (m)	2.381		Bubble (ccm)	-	1241	129.2	869.3	506.6	1347	-
Fuel	Carbón mineral		Dilution Ratio	-		Ambient Temperature (C)		28.9		Ambient RH (%)
			Stack Velocity (m/s)	-		Ambient Pressure (hPa)		976.63		58.1
			Final Conditions							
			AethFlow	IsoFlow	F1Flow	F2Flow	GasFlow	DilFlow Cyclone		
			Sensor (sccm)	-	367	88	815	444	1204	1511
			Bubble (ccm)	-	437.2	132.6	868.7	509.6	1313	-
			Dilution Ratio	7		Ambient Temperature (C)		27.8		Ambient RH (%)
			Stack Velocity (m/s)	1.69		Ambient Pressure (hPa)		978.66		60.9
Time	Pre-background		Sample Period		Post-background					
	start	stop	start	stop	start	stop				
	19:26	19:40	19:41	9:07	9:08	9:22				
Time	Notes									
Make dimensional drawing of stack cross-section and sample points on back side										

iv. Evento 4 Cúcuta, Norte de Santander

**Tabla 11** Datos colectados en campo - Evento 4

<b>Ratnoze Kiln Data Sheet</b>		Holder #			Filter ID					
Date	25/07/2017	3026	F1	Stage 1	BC-B-13					
Time	10:02	3023	F2	Stage 1	PM2.5-B-13					
Technician	FRE, FA, YE, SHA									
Computer	AZUL									
Site	Cúcuta									
Event	2	<b>Initial Conditions</b>								
Día		AethFlow	IsoFlow	F1Flow	F2Flow	GasFlow	DilFlow	Cyclone		
Probe	2 secciones	Sensor (sccm)	49	366	99	797	405	1203	-	
Nozzle #	4	Bubble (ccm)	-	438.8	141.4	860.3	466.3	1294	1510	
Nozzle Diam. (m)	3.175	Dilution Ratio	15.47		Ambient Temperature (C)		29.4		Ambient RH (%)	
Fuel	Carbón mineral	Stack Velocity (m/s)	1.42		Ambient Pressure (hPa)		977.65		53.1	
		<b>Final Conditions</b>								
		AethFlow	IsoFlow	F1Flow	F2Flow	GasFlow	DilFlow	Cyclone		
		Sensor (sccm)	49	686	93	787	394	1248	1520	
		Bubble (ccm)	-	788	143	860.3	462.8	1362	-	
		Dilution Ratio	16.85		Ambient Temperature (C)		29.3		Ambient RH (%)	
		Stack Velocity (m/s)	2		Ambient Pressure (hPa)		974.94		57.9	
		Pre-background		Sample Period		Post-background				
		start	stop	start	stop	start	stop			
		Time	10:33	10:48	10:49	16:00	16:17	16:25		
Time	Notes									
	Se cambio boquilla para hornos con tiro natural, se evidencio que con ambas boquillas la velocidad de la chimena no variaba									
Make dimensional drawing of stack cross-section and sample points on back side										



vi. Evento 6 Cúcuta, Norte de Santander

**Tabla 13** Datos colectados en campo - Evento 6

Ratnoze Kiln Data Sheet		Holder #		Filter ID																																																			
Date	26/07/2017	3026	F1	Stage 1	BC-B-04																																																		
Time	10:55	3023	F2	Stage 1	PM2.5-B-04																																																		
Technician	FRE, FA																																																						
Computer	AZUL																																																						
Site	Cúcuta																																																						
Event	4	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="8">Initial Conditions</th> </tr> <tr> <th></th> <th>AethFlow</th> <th>IsoFlow</th> <th>F1Flow</th> <th>F2Flow</th> <th>GasFlow</th> <th>DilFlow</th> <th>Cyclone</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sensor (sccm)</td> <td>49</td> <td>801</td> <td>96</td> <td>797</td> <td>378</td> <td>1241</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Bubble (ccm)</td> <td>-</td> <td>906.5</td> <td>139.7</td> <td>862.7</td> <td>447.8</td> <td>1334</td> <td>1515</td> </tr> <tr> <td>Dilution Ratio</td> <td>15.12</td> <td colspan="2">Ambient Temperature (C)</td> <td>31.9</td> <td colspan="3">Ambient RH (%)</td> </tr> <tr> <td>Stack Velocity (m/s)</td> <td>3.38</td> <td colspan="2">Ambient Pressure (hPa)</td> <td>976.63</td> <td></td> <td colspan="2">48.3</td> </tr> </tbody> </table>						Initial Conditions									AethFlow	IsoFlow	F1Flow	F2Flow	GasFlow	DilFlow	Cyclone	Sensor (sccm)	49	801	96	797	378	1241	-	Bubble (ccm)	-	906.5	139.7	862.7	447.8	1334	1515	Dilution Ratio	15.12	Ambient Temperature (C)		31.9	Ambient RH (%)			Stack Velocity (m/s)	3.38	Ambient Pressure (hPa)		976.63		48.3	
Initial Conditions																																																							
	AethFlow	IsoFlow	F1Flow	F2Flow	GasFlow	DilFlow	Cyclone																																																
Sensor (sccm)	49	801	96	797	378	1241	-																																																
Bubble (ccm)	-	906.5	139.7	862.7	447.8	1334	1515																																																
Dilution Ratio	15.12	Ambient Temperature (C)		31.9	Ambient RH (%)																																																		
Stack Velocity (m/s)	3.38	Ambient Pressure (hPa)		976.63		48.3																																																	
Día																																																							
Probe	2 secciones																																																						
Nozzle #	4	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="8">Final Conditions</th> </tr> <tr> <th></th> <th>AethFlow</th> <th>IsoFlow</th> <th>F1Flow</th> <th>F2Flow</th> <th>GasFlow</th> <th>DilFlow</th> <th>Cyclone</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sensor (sccm)</td> <td>-</td> <td>801</td> <td>82</td> <td>774</td> <td>359</td> <td>1207</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Bubble (ccm)</td> <td>48</td> <td>922.8</td> <td>138.6</td> <td>845.9</td> <td>441.4</td> <td>1354</td> <td>1486</td> </tr> <tr> <td>Dilution Ratio</td> <td></td> <td colspan="2">Ambient Temperature (C)</td> <td>33.6</td> <td colspan="3">Ambient RH (%)</td> </tr> <tr> <td>Stack Velocity (m/s)</td> <td>4.71</td> <td colspan="2">Ambient Pressure (hPa)</td> <td>973.58</td> <td></td> <td colspan="2">50.2</td> </tr> </tbody> </table>						Final Conditions									AethFlow	IsoFlow	F1Flow	F2Flow	GasFlow	DilFlow	Cyclone	Sensor (sccm)	-	801	82	774	359	1207	-	Bubble (ccm)	48	922.8	138.6	845.9	441.4	1354	1486	Dilution Ratio		Ambient Temperature (C)		33.6	Ambient RH (%)			Stack Velocity (m/s)	4.71	Ambient Pressure (hPa)		973.58		50.2	
Final Conditions																																																							
	AethFlow	IsoFlow	F1Flow	F2Flow	GasFlow	DilFlow	Cyclone																																																
Sensor (sccm)	-	801	82	774	359	1207	-																																																
Bubble (ccm)	48	922.8	138.6	845.9	441.4	1354	1486																																																
Dilution Ratio		Ambient Temperature (C)		33.6	Ambient RH (%)																																																		
Stack Velocity (m/s)	4.71	Ambient Pressure (hPa)		973.58		50.2																																																	
Nozzle Diam. (m)	3.175																																																						
Fuel	Carbón mineral																																																						
Time	Pre-background		Sample Period		Post-background																																																		
	start	stop	start	stop	start	stop																																																	
	11:00	11:15	11:25	16:00	16:01	16:20																																																	
Time	Notes																																																						
	Medición carbono negro con equipo educor día																																																						
	Make dimensional drawing of stack cross-section and sample points on back side																																																						









x. Evento 10 Nemocón, Cundinamarca

**Tabla 17** Datos colectados en campo - Evento 10

Ratnoze Kiln Data Sheet		Holder #		Filter ID	
Date	26/04/2017	3026	F1	Stage 1	BC-CN-12
Time	11:35	3023	F2	Stage 1	PM2.5-CN-08
Technician					
Computer					
Site	Cundinamarca . Nemocon, Horno fuego dormido - La despensa				
Event	3 Dia				
Probe	Multiaraña				
Nozzle #	-				
Nozzle Diam. (m)	-				
Fuel	Carbón mineral				

Initial Conditions							
	AethFlow	IsoFlow	F1Flow	F2Flow	GasFlow	DilFlow	Cyclone
Sensor (sccm)	-	951	99	800	141	16	-
Bubble (ccm)	-	1341	166.7	119	223	68.8	1497
Dilution Ratio		0.02	Ambient Temperature (C)		22.4	Ambient RH (%)	
Stack Velocity (m/s)		-	Ambient Pressure (hPa)		750.42	84.4	

Final Conditions							
	AethFlow	IsoFlow	F1Flow	F2Flow	GasFlow	DilFlow	Cyclone
Sensor (sccm)	-	918	47	771	124	302	-
Bubble (ccm)	-	1314	104.1	1073	216.6	521.8	1390
Dilution Ratio		-	Ambient Temperature (C)		25.3	Ambient RH (%)	
Stack Velocity (m/s)		-	Ambient Pressure (hPa)		747.37	68.4	

Time	Pre-background		Sample Period		Post-background	
	start	stop	start	stop	start	stop
		11:45	12:06	12:07	16:05	16:20

Time	Notes
	Cambio de ubicación de la sonda a donde hay mayor concentración de humo

Make dimensional drawing of stack cross-section and sample points on back side

xi. Evento 11 Nemocón, Cundinamarca

**Tabla 18** Datos colectados en campo - Evento 11

<b>Ratnoze Kiln Data Sheet</b>		<b>Holder #</b>			<b>Filter ID</b>		
Date	26/04/2017	3103	F1	Stage 1	BC-CN-13		
Time	17:00	3102	F2	Stage 1	PM2.5-CN-04		
Technician	FRE, FA						
Computer							
Site	fuego dormido - La despensa	<b>Initial Conditions</b>					
Event	4 Noche	AethFlow	IsoFlow	F1Flow	F2Flow	GasFlow	DilFlow Cyclone
Probe	Multiaraña	Sensor (sccm)	-	933	105	804	132 - 1502
Nozzle #	-	Bubble (ccm)	-	1294	179.3	1094	236.9 47.73 -
Nozzle Diam. (m)	-	Dilution Ratio	-	Ambient Temperature (C)	20.4	Ambient RH (%)	
Fuel	Carbón mineral	Stack Velocity (m/s)	-	Ambient Pressure (hPa)	747.71	54.1	
		<b>Final Conditions</b>					
		AethFlow	IsoFlow	F1Flow	F2Flow	GasFlow	DilFlow Cyclone
		Sensor (sccm)	-	918	47	771	124 302 -
		Bubble (ccm)	-	1314	104.1	1073	216.6 521.8 1390
		Dilution Ratio	-	Ambient Temperature (C)	25.3	Ambient RH (%)	
		Stack Velocity (m/s)	-	Ambient Pressure (hPa)	747.37	68.4	
		<b>Pre-background</b>		<b>Sample Period</b>		<b>Post-background</b>	
		start	stop	start	stop	start	stop
Time		16:40	17:00	17:10	9:13	9:33	10:02
		<b>Notes</b>					
Time		11:02 Se realiza ajuste de flujo					

Make dimensional drawing of stack cross-section and sample points on back side

xii. Evento 12 Nemocón, Cundinamarca

**Tabla 19** Datos colectados en campo - Evento 12

Ratnoze Kiln Data Sheet		Holder #		Filter ID						
Date	27/04/2017	3026	F1	Stage 1	BC-CN-14					
Time	9:34	3023	F2	Stage 1	PM2.5-CN-05					
Technician	FRE, FA									
Computer Site	fuego dormido - La despensa									
Event	5 día									
Probe	Multiaraña									
Nozzle #	-									
Nozzle Diam. (m)	-									
Fuel	Carbón mineral									
		Initial Conditions								
		AethFlow	IsoFlow	F1Flow	F2Flow	GasFlow	DilFlow	Cyclone		
		Sensor (sccm)	49	940	102	801	122	-	1505	
		Bubble (ccm)	-	1300	167.6	1073	196	39.38	-	
		Dilution Ratio	-	Ambient Temperature (C)		18.5	Ambient RH (%)			
		Stack Velocity (m/s)	-	Ambient Pressure (hPa)		750.76	69.5			
		Final Conditions								
		AethFlow	IsoFlow	F1Flow	F2Flow	GasFlow	DilFlow	Cyclone		
		Sensor (sccm)	48	921	97	442	110	-8	-	
		Bubble (ccm)	-	1337	173.3	808.5	193.3	41.48	1088	
		Dilution Ratio	-	Ambient Temperature (C)		24.7	Ambient RH (%)			
		Stack Velocity (m/s)	-	Ambient Pressure (hPa)		746.36	64.1			
		Pre-background		Sample Period		Post-background				
		start	stop	start	stop	start	stop			
Time		10:48	11:02	11:17	14:31	14:57	15:12			
Time	Notes									
11:02	Medicion con el Aethalometro									
	Ubicación de la sonda en el centro distancia se escogio un punto de salida de gases									
		Make dimensional drawing of stack cross-section and sample points on back side								

## B Datos del análisis gravimétrico de PM2.5

**Tabla 20** Datos registrados de filtros gravimétricos

Evento	Departamento	Nombre filtro	Fecha preparacion	Fecha muestreo	Fecha analisis	Peso pre (mg)	Inc. pre	peso post (mg)	Inc. post	Lote
1	Santander	PM2.5-C-12	04/05/2017	18/07/2017	03/08/2017	83.15	0.0033	83.35	0.0033	T16234CW
2	Santander	PM2.5-C-08	04/05/2017	18-19/07/2017	03/08/2017	78.60	0.0000	79.48	0.0033	T16234CW
3	Norte de Santander	PM2.5-C-10	04/05/2017	24-25/07/2017	08/08/2017	81.51	0.0033	82.01	0.0033	T16234CW
4	Norte de Santander	PM2.5-C-13	04/05/2017	25/07/2017	08/08/2017	78.20	0.0000	79.76	0.0033	T16234CW
5	Norte de Santander	PM2.5-B-05	27/04/2017	25-26/07/2017	08/08/2017	84.60	0.0033	86.65	0.0000	T16234CW
6	Norte de Santander	PM2.5-B-04	27/04/2017	26/07/2017	08/08/2017	84.48	0.0000	86.18	0.0033	T16234CW
7	Norte de Santander	PM2.5-B-03	27/04/2017	26-27/07/2017	08/08/2017	83.17	0.0033	93.15	0.0000	T16234CW
8	Cundinamarca	PM2.5-CN-06	21/04/2017	25/04/2017	23/05/2017	86.37	0.0033	87.01	0.0033	T16234CW
9	Cundinamarca	PM2.5-CN-07	21/04/2017	25-26/04/2017	23/05/2017	87.59	0.0033	106.98	0.0033	T16234CW
10	Cundinamarca	PM2.5-CN-08	21/04/2017	26/04/2017	23/05/2017	86.46	0.0000	90.25	0.0000	T16234CW
11	Cundinamarca	PM2.5-CN-04	21/04/2017	26-27/04/2017	23/05/2017	88.44	0.0033	93.83	0.0033	T16234CW
12	Cundinamarca	PM2.5-CN-05	21/04/2017	27/04/2017	23/05/2017	87.7	0.0033	92.3	0.0000	T16234CW

## C Datos análisis de BC

**Tabla 21** Datos registrados de contenido de BC

Evento	Nombre filtro	Fecha preparacion	Fecha muestreo	Fecha de analisis	UV ATN	Inc. UV ATN	IR ATN	Inc. IR ATN	LOTE
1	BC-C-14	04/05/2017	18/07/2017	03/08/2017	10	0.5	4	0.5	GF1640514
2	BC-C-12	04/05/2017	18-19/07/2017	03/08/2017	17	0.5	10	0.5	GF1640514
3	BC-C-08	04/05/2017	24-25/07/2017	08/08/2017	94	0.5	57	0.5	GF1640514
4	BC-B-13	27/04/2017	25/07/2017	08/08/2017	180	0.5	121	0.5	GF1640514
5	BC-B-05	27/04/2017	25-26/07/2017	08/08/2017	191	0.5	146	0.5	GF1640514
6	BC-B-04	27/04/2017	26/07/2017	08/08/2017	10	0.5	4	0.5	GF1640514
7	BC-B-03	27/04/2017	26-27/07/2017	08/08/2017	442	0.5	312	0.5	GF1640514
8	BC-CN-10	21/04/2017	25/04/2017	23/05/2017	28	0.5	2	0.5	GF1640514
9	BC-CN-11	21/04/2017	25-26/04/2017	23/05/2017	421	0.5	14	0.5	GF1640514
10	BC-CN-12	21/04/2017	26/04/2017	23/05/2017	185	0.5	3	0.5	GF1640514
11	BC-CN-13	21/04/2017	26-27/04/2017	23/05/2017	320	0.5	8	0.5	GF1640514
12	BC-CN-14	21/04/2017	27/04/2017	23/05/2017	340	0.5	7	0.5	GF1640514

D Información de producción y consumo de empresas ladrilleras

**Tabla 22** Resultados Eficiencia Energética Horno Hoffman

Medición	Producción de ladrillo	Consumo de combustible	Consumo de Energía	SEC	
	kg/hr	kg/hr	MJ/hr	MJ/kg_brick	MJ/kg_brick UC
Bucaramanga	1667	67.16	3700.52	2.2203	0.6730
Cúcuta	1821.42857	229.2036	13291.5177	7.29730	2.29060
Cundinamarca	354.865	30.2083	1702.5417	4.797722	1.542749

E Factores de emisión de PM2.5 según tipo de horno

i. DEPARTAMENTO DE SANTANDER

**Tabla 23** Resultados factores de emisión de PM2.5 para el horno Hoffman - Combustible Carbón

Medición	EFPM2.5fuel			EFPM2.5energy			EFPM2.5brick		
	g/kg fuel	T (min)	g/kg fuel UC	g/MJ	T (min)	g/MJ UC	g/kg_brick	T (min)	g/kg_brick UC
Event01	0,0593	378	0,0042	0,0011	378	0,0003	0,0024	378	0,0007
Event02	0,1417	874	0,0095	0,0026	874	0,0007	0,0057	874	0,0017
<b>Promedio ponderado</b>	0,1168		0,0079	0,0021		0,0006	0,0047		0,0014
<b>Desviación</b>	0,0583			0,0011			0,0023		



ii. DEPARTAMENTO NORTE DE SANTANDER

**Tabla 24** Resultados factores de emisión de PM2.5 para el horno Colmena - Combustible Carbón

Medición	EFPM2.5fuel			EFPM2.5energy			EFPM2.5brick		
	g/kg_fuel	T (min)	g/kg_fuel UC	g/MJ	T (min)	g/MJ UC	g/kg_brick	T (min)	g/kg_brick UC
Event03	0,6711	506	0,0508	0,0116	506	0,0034	0,0844	506	0,0245
Event04	0,5850	311	0,0392	0,0101	311	0,0029	0,0736	311	0,0212
Event05	0,1237	960	0,0082	0,0021	960	0,0006	0,0156	960	0,0045
Event06	0,2602	275	0,0173	0,0045	275	0,0013	0,0327	275	0,0094
Event07	0,7850	1028	0,0521	0,0135	1028	0,0039	0,0988	1028	0,0284
<b>Promedio ponderado</b>	0,4931		0,0338	0,0085		0,0025	0,0621		0,0179
<b>Desviación</b>	0,2809			0,0048			0,0354		

iii. DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA

**Tabla 25** Resultados factores de emisión de PM2.5 para horno Fuego Dormido - Combustible Carbón

Medición	EFPM2.5fuel			EFPM2.5energy			EFPM2.5brick		
	g/kg_fuel	T (min)	g/kg_fuel UC	g/MJ	T (min)	g/MJ UC	g/kg_brick	T (min)	g/kg_brick UC
Event08	1,7361	225	0,1169	0,0308	225	0,0089	0,1478	225	0,0426
Event09	2,4452	885	0,1519	0,0434	885	0,0124	0,2082	885	0,0598
Event10	3,6105	238	0,2133	0,0641	238	0,0183	0,3073	238	0,0881
Event11	0,8461	963	0,0497	0,0150	963	0,0043	0,0720	963	0,0206
Event12	4,5300	194	0,2796	0,0804	194	0,0230	0,3856	194	0,1107
<b>Promedio ponderado</b>	2,0390		0,1252	0,0362		0,0104	0,1736		0,0498
<b>Desviación</b>	1,4652			0,0260			0,1247		

F Factores de emisión de BC según tipo de horno

i. DEPARTAMENTO DE SANTANDER

**Tabla 26** Resultados factores de emisión de Carbono negro (BC) para el horno Hoffman - Combustible Carbón

Medición	EFBCfuel (g/kg_fuel)			EFBCenergy (g/MJ)			EFBCbrick (g/kg_brick UC)		
	g/kg_fuel	T (min)	g/kg_fuel UC	g/MJ	T (min)	g/MJ UC	g/kg_brick	T (min)	g/kg_brick UC
Event01	0,0061	378	0,0014	0,0001	378	0,0000	0,0002	378	0,0001
Event02	0,0099	874	0,0017	0,0002	874	0,0001	0,0004	874	0,0001
<b>Promedio ponderado</b>	0,0088		0,0016	0,0002		0,0001	0,0004		0,0001
<b>Desviación</b>	0,0027			0,0000			0,0001		

ii. DEPARTAMENTO NORTE DE SANTANDER

**Tabla 27** Resultados factores de emisión de Carbono negro (BC) para el horno Colmena - Combustible Carbón

Medición	EFBCfuel			EFBCenergy			EFBCbrick		
	g/kg_fuel	T (min)	g/kg_fuel UC	g/MJ	T (min)	g/MJ UC	g/kg_brick	T (min)	g/kg_brick UC
Event03	0,4750	506	0,0825	0,0081	506	0,0027	0,0597	506	0,0197
Event04	0,3168	311	0,0530	0,0054	311	0,0017	0,0398	311	0,0130
Event05	0,0588	960	0,0094	0,0010	960	0,0003	0,0074	960	0,0023
Event06	0,0033	275	0,0008	0,0000	275	0,0000	0,0004	275	0,0001
Event07	0,1490	1028	0,0225	0,0025	1028	0,0008	0,0187	1028	0,0059
<b>Promedio ponderado</b>	0,46249		0,02945	0,00308		0,00100	0,02245		0,00730
<b>Desviación</b>	0,19398			0,00335			0,02441		

iii. DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA

**Tabla 28** Resultados factores de emisión de Carbono negro (BC) para el horno Fuego Dormido- Combustible Carbón

Medición	EFBCfuel			EFBCenergy			EFBCbrick		
	g/kg_fue l	T(mi n)	g/kg_fue l UC	g/MJ	T(min )	g/MJ UC	g/kg_bric k	T(mi n)	g/kg_ brick UC
Event08	0.0181	225	0.0095	0.000 3	225	0.0002	0.0015	225	0.000 9
Event09	0.0091	885	0.0015	0.000 2	885	0.0001	0.0008	885	0.000 3
Event10	0.0182	238	0.0058	0.000 3	238	0.0001	0.0015	238	0.000 7
Event11	0.0059	963	0.0009	0.000 1	963	0.0000	0.0005	963	0.000 2
Event12	0.0299	194	0.0052	0.000 5	194	0.0002	0.0025	194	0.000 8
<b>Promedio ponderado</b>	0.0111		0.0027	0.0002		0.0001	0.0009		0.000 4
<b>Desviación</b>	0.0094			0.0002			0.0008		

G Concentración de PM2.5 y BC para diferentes tipos de hornos

i. DEPARTAMENTO DE SANTANDER

**Tabla 29** Concentraciones en tiempo real de PM2.5 y BC en horno Hoffman

Evento	PM2.5conc	PM2.5conc_uc	BCconc	BCconc_uc
	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>
Event01	8,8520	0,0703	0,9099	0,0329
Event02	35,8364	0,2027	2,5144	0,0545
<b>Promedio</b>	27,6894	0,1627	2.0299	0.0479

ii. DEPARTAMENTO NORTE DE SANTANDER

**Tabla 30** Concentraciones en tiempo real de PM2.5 Y BC en horno Colmena

Evento	PM2.5conc	PM2.5conc_uc	BCconc	BCconc_uc
	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>
Event03	20,2368	0,1231	14,3257	0,3267
Event04	314,1905	1,5971	170,1748	3,2122
Event05	47,8604	0,3075	22,7636	0,5248
Event06	150,0061	0,9534	1,9286	0,0666
Event07	177,1620	1,2075	33,6290	0,7695
<b>Promedio</b>	122,4913	0,7655	38,0283	0,8044

iii. DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA

**Tabla 31** Concentraciones en tiempo real de PM2.5 y BC en horno Fuego Dormido

Evento	PM2.5conc	PM2.5conc_uc	BCconc	BCconc_uc
	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>
Event08	7,5195	0,1656	0,0783	0,0208
Event09	32,5127	1,4538	0,1210	0,0187
Event10	21,4410	0,8754	0,1081	0,0327
Event11	7,5868	0,3257	0,0525	0,0081
Event12	38,0955	1,7555	0,2514	0,0429
Promedio	20,0659	0,8728	0,0997	0,0180

H Concentraciones en tiempo real de CO, CO2, SO2, PM2.5 y BC

**Tabla 32** Concentraciones en tiempo real de CO, CO2, SO2, PM2.5 y BC

Tecnología	Evento	CO (mg/m3)	CO2 (mg/m3)	SO2 (mg/m3)	Bcconc (mg/m3)	Pmconc (mg/m3)
Continuo	Event01	10.7138061	27960.3482	0	0.90989029	8.85201759
	Event02	12.6407413	24057.3506	19.7118248	2.51439491	35.8364096
Intermitente	Event03	6.26252971	3728.6148	0.11527725	14.3256703	20.2368166
	Event04	41.9125739	30221.1458	5.39531468	170.174845	314.190496
	Event05	74.1078306	59754.5483	17.3813467	22.7636389	47.8604495
	Event06	29.205339	84467.4317	41.0894924	1.92855334	150.006101
	Event07	56.6463743	41911.9362	32.4604945	33.6289819	177.162032
Artesanal	Event08	622.178846	2797.55519	15.0345063	0.07830775	7.51948188
	Event09	3307.71727	20384.9302	44.3950764	0.12097098	32.5126846
	Event10	2546.8914	6863.05232	22.0940583	0.10808952	21.4409717
	Event11	3844.7049	11036.7132	18.2601973	0.05248125	7.58680048
	Event12	3071.8782	11392.2182	16.8709522	0.25137564	38.0954868

I Resultados generados por el software

i Métricas de medición

Eventname	length	length_uc	LHV	LHV_uc	Cfrac	Cfrac_uc	brickrate	brickrate_uc	fuelrate	fuelrate_uc	energyrate
units	hr	hr	MJ/kg	MJ/kg	gC/gfuel	gC/gfuel	kg/hr	kg/hr	kg/hr	kg/hr	MJ/hr
Event01	6.300277777	0.0	55.1	15.42799999	0.7458	0.0022374	1666.666666	175.6820922	67.16	3.266337726	3700.516
Event02	14.56694444	0.0	55.1	15.42799999	0.7458	0.0022374	1666.666666	175.6820922	67.16	3.266337726	3700.516
Event03	13.43083333	0.0	57.99	16.2372	0.7613	0.002283899	1821.428571	257.5888988	229.2036156	2.624695449	13291.51766
Event04	5.183611111	0.0	57.99	16.2372	0.7613	0.002283899	1821.428571	257.5888988	229.2036156	2.624695449	13291.51766
Event05	16.00027777	0.0	57.99	16.2372	0.7613	0.002283899	1821.428571	257.5888988	229.2036156	2.624695449	13291.51766
Event06	4.580833333	0.0	57.99	16.2372	0.7613	0.002283899	1821.428571	257.5888988	229.2036156	2.624695449	13291.51766
Event07	17.11694444	0.0	57.99	16.2372	0.7613	0.002283899	1821.428571	257.5888988	229.2036156	2.624695449	13291.51766
Event08	4.033611111	0.0	56.36	15.7808	0.5343	0.0016029	354.8645833	39.67506655	30.20833333	3.377394341	1702.541666
Event09	14.75027777	0.0	56.36	15.7808	0.5343	0.0016029	354.8645833	39.67506655	30.20833333	3.377394341	1702.541666
Event10	3.966944444	0.0	56.36	15.7808	0.5343	0.0016029	354.8645833	39.67506655	30.20833333	3.377394341	1702.541666
Event11	16.05027777	0.0	56.36	15.7808	0.5343	0.0016029	354.8645833	39.67506655	30.20833333	3.377394341	1702.541666
Event12	3.233611111	0.0	56.36	15.7808	0.5343	0.0016029	354.8645833	39.67506655	30.20833333	3.377394341	1702.541666

energyrate_uc	SEC	SEC_uc	SSA	SSA_uc	MSC	MSC_uc	MAC	MAC_uc	OCEC	OCEC_uc	ECOC
MJ/hr	MJ/kg_brick	MJ/kg_brick	-	-	m^2/g	m^2/g	m^2/g	m^2/g	-	-	-
1051.658908	2.220309599	0.673001040	0.041322585	0.015829528	0.840592605	0.212718744	nan	nan	nan	nan	nan
1051.658908	2.220309599	0.673001040	nan	nan	0.513812501	0.124458317	nan	nan	nan	nan	nan
3724.736090	7.297303818	2.290599536	nan	nan	1.891272903	0.413807795	nan	nan	nan	nan	nan
3724.736090	7.297303818	2.290599536	0.343968628	0.077850217	1.782908099	0.368486909	nan	nan	nan	nan	nan
3724.736090	7.297303818	2.290599536	nan	nan	1.849360847	0.387267263	nan	nan	nan	nan	nan
3724.736090	7.297303818	2.290599536	0.639579264	0.087324375	0.218771403	0.047810559	nan	nan	nan	nan	nan
3724.736090	7.297303818	2.290599536	nan	nan	1.326446679	0.273209878	nan	nan	nan	nan	nan
513.3099596	4.797722135	1.542749311	nan	nan	4.091427127	0.844577424	nan	nan	nan	nan	nan
513.3099596	4.797722135	1.542749311	nan	nan	5.373315530	1.102060376	nan	nan	nan	nan	nan
513.3099596	4.797722135	1.542749311	nan	nan	4.941295991	1.011843558	nan	nan	nan	nan	nan
513.3099596	4.797722135	1.542749311	nan	nan	6.536456988	1.341005245	nan	nan	nan	nan	nan
513.3099596	4.797722135	1.542749311	0.986931102	0.004537285	4.240086915	0.870899643	nan	nan	nan	nan	nan

ECOC_uc	TCconc	TCconc_uc	OCTC	OCTC_uc	ECTC	ECTC_uc	BCPM	BCPM_uc	OCPM	OCPM_uc	ECPM
-	gm^-3	gm^-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	0.102789028	0.023414453	nan	nan	nan
nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	0.070163136	0.011915349	nan	nan	nan
nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	0.707901378	0.118831160	nan	nan	nan
nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	0.541629511	0.089372916	nan	nan	nan
nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	0.475625264	0.075554920	nan	nan	nan
nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	0.012856499	0.003048863	nan	nan	nan
nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	0.189820479	0.028159981	nan	nan	nan
nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	0.010413982	0.005466736	nan	nan	nan
nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	0.003720731	0.000599850	nan	nan	nan
nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	0.005041260	0.001613668	nan	nan	nan
nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	0.006917442	0.001117396	nan	nan	nan
nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	0.006598567	0.001167152	nan	nan	nan

ECPM_uc	TCPM	TCPM_uc	Cconc	Cconc_uc	Fuelconc	Fuelconc_uc	Energyconc	Energyconc_uc	MCE	MCE_uc	CERCO	
-	-	-	gm^-3	gm^-3	kgm^-3	kgm^-3	MJm^-3	MJm^-3	-	-	g/gC	
nan	CERCO_uc	CERCO2	CERCO2_uc	CERSO2	CERSO2_uc	CERPMscat	CERPMscat_uc	CERPMabs	CERPMabs_uc	CERPM	CERPM_uc	CERBC
nan	g/gC	g/gC	g/gC	g/gC	g/gC	m^2/gC	m^2/gC	m^2/gC	m^2/gC	g/gC	g/gC	g/gC
nan	0.000824977	3.662241121	0.267232937	0.0	0.000331218	6.679205955	1.693815576	0.001115659	0.000233558	7.945830012	5.646178705	8.167441477
nan	0.000974688	3.661423077	0.268498556	0.003002652	0.000571288	9.761712703	2.381525891	nan	nan	0.000189985	1.278268634	1.333000622
nan	0.005944006	3.654799999	0.320639406	0.000113093	0.002578916	0.001667076	0.000372184	nan	nan	0.000881457	6.662176517	0.000623984
nan	0.000983051	3.656477530	0.265980627	0.000653348	0.000351899	0.001370127	0.000285810	0.001980521	0.000411853	0.000768479	5.144218722	0.000416230
nan	0.000622048	3.657318575	0.262260060	0.001064758	0.000220611	0.000300436	6.344702327	nan	nan	0.000162454	1.075754446	7.726743314
nan	0.000318626	3.662456354	0.261668574	0.001783158	0.000222068	7.477215220	1.646129086	3.036283155	7.303198903	0.000341782	2.265796202	4.394121495
nan	0.000789099	3.656679962	0.263851641	0.002834525	0.000397921	0.001367761	0.000284378	nan	nan	0.001031147	6.832936916	0.000195732
nan	0.047338388	2.715436210	0.227297724	0.014605827	0.003363107	0.013294644	0.002768286	nan	nan	0.003249390	0.000218575	3.383909632
nan	0.031849962	2.919913567	0.197334511	0.006364607	0.000746050	0.024591038	0.005033583	nan	nan	0.004576511	0.000283943	1.702797088
nan	0.056839391	2.314640457	0.161150130	0.007457921	0.001294175	0.033390264	0.006822307	nan	nan	0.006757390	0.000398605	3.406576119
nan	0.053500616	2.368105971	0.158479156	0.003921415	0.000774924	0.010351362	0.002115274	nan	nan	0.001583635	9.286528726	1.095470432
nan	0.045858287	2.573833144	0.174299623	0.003814940	0.000799255	0.035949462	0.007344302	0.000340272	7.492374911	0.008478473	0.000522678	5.594577533

EFBCenergy_EFOCenergy	EFOCenergy_EFECenergy	EFECenergy_EFCObrick	EFCObrick_u	EFCO2brick	EFCO2brick_EFSO2brick	EFSO2brick_EFPMscatbrick
g/MJ	g/MJ	g/MJ	g/MJ	g/MJ	g/kg_brick	g/kg_brick
3.994649858	nan	nan	nan	nan	0.042178277	0.027584432
5.932048987	nan	nan	nan	nan	0.057824962	0.033657761
0.002699026	nan	nan	nan	nan	0.588149091	0.592783096
0.001782709	nan	nan	nan	nan	0.485867499	0.165490689
0.000327740	nan	nan	nan	nan	0.434587727	0.135523533
2.122317861	nan	nan	nan	nan	0.121329652	0.045678251
0.000817527	nan	nan	nan	nan	0.473524964	0.152655925
0.000191062	nan	nan	nan	nan	27.47146683	7.997306402
5.211719656	nan	nan	nan	nan	21.55235911	6.213734378
0.000137274	nan	nan	nan	nan	39.07350080	11.25572682
3.351864564	nan	nan	nan	nan	37.52580797	10.79863783
0.000175299	nan	nan	nan	nan	31.57052120	9.093681311

EFPMscatbrick	EFPMabsbrick	EFPMabsbrick	EFPMbrick	EFPMbrick_u	EFBCbrick	EFBCbrick_u	EFOCbrick	EFOCbrick_u	EFECbrick	EFECbrick_u	ERCO
m^2/kg_brick	m^2/kg_brick	m^2/kg_brick	g/kg_brick	g/kg_brick	g/kg_brick	g/kg_brick	g/kg_brick	g/kg_brick	g/kg_brick	g/kg_brick	g/hr
0.000768295	0.033528641	0.011902201	0.002387940	0.000705307	0.000245454	8.996844304	nan	nan	nan	nan	70.29712988
0.001104355	nan	nan	0.005709599	0.001681343	0.000400603	0.000133993	nan	nan	nan	nan	96.37493819
0.057202096	nan	nan	0.084443555	0.024496825	0.059777709	0.019698769	nan	nan	nan	nan	1071.271560
0.045838672	0.189733844	0.066186346	0.073620234	0.021200166	0.039874891	0.013011092	nan	nan	nan	nan	884.9729462
0.010095893	nan	nan	0.015563121	0.004479062	0.007402213	0.002392020	nan	nan	nan	nan	791.5705044
0.002551846	0.002908756	0.001073874	0.032742699	0.009423903	0.000420956	0.000154891	nan	nan	nan	nan	220.9932964
0.045705831	nan	nan	0.098783829	0.028431017	0.018751193	0.005966773	nan	nan	nan	nan	862.4918992
0.211173034	nan	nan	0.147792094	0.042611551	0.001539104	0.000916916	nan	nan	nan	nan	9748.650632
0.388261985	nan	nan	0.208153546	0.059770732	0.000774483	0.000250277	nan	nan	nan	nan	7648.168936
0.528685838	nan	nan	0.307346500	0.088055575	0.001549413	0.000658961	nan	nan	nan	nan	13865.80158
0.163339638	nan	nan	0.072028504	0.020631216	0.000498253	0.000160963	nan	nan	nan	nan	13316.58021
0.567215273	0.015476614	0.005517293	0.385626547	0.110698733	0.002544582	0.000841789	nan	nan	nan	nan	11203.25985

ERBC_uc	EROC	EROC_uc	EREC	EREC_uc	Isofrac	Isofrac_uc
g/hr	g/hr	g/hr	g/hr	g/hr	-	-
0.188063852	nan	nan	nan	nan	0.957984624	0.08632373827892192
0.290157834	nan	nan	nan	nan	0.906243783	0.08359381253236452
47.09506091	nan	nan	nan	nan	1.031972047	0.1563827926525886
31.23621671	nan	nan	nan	nan	0.721144228	0.1137915909414813
5.766424523	nan	nan	nan	nan	0.893719480	0.10405727911118384
0.354600805	nan	nan	nan	nan	0.841904334	0.08923559293397308
14.48033216	nan	nan	nan	nan	1.175512918	0.14062526778005552
0.364596648	nan	nan	nan	nan	75.90808282	13.84121994866152
0.121406213	nan	nan	nan	nan	154.8348397	52.37170162296332
0.286537365	nan	nan	nan	nan	113.0348837	29.10200805973683
0.078092259	nan	nan	nan	nan	-183.0700806	51.62443861626463
0.403971469	nan	nan	nan	nan	126.9037717	36.53822705028159



## ii Promedios, resultados de otros parámetros y especies contaminantes

ERCO_uc	ERCO2	ERCO2_uc	ERSO2	ERSO2_uc	ERPmScat	ERPmScat_uc	ERPmAbs	ERPmAbs_uc	ERPm	ERPm_uc	ERBC
g/hr	g/hr	g/hr	g/hr	g/hr	m^2/hr	m^2/hr	m^2/hr	m^2/hr	g/hr	g/hr	g/hr
49.94045127	183434.0695	74398.05652	0.0	16.59002945	3.345475869	1.581546892	55.88106860	25.17750625	3.979901615	1.612836034	0.409090220
62.14367848	183393.0955	74393.40968	150.3966184	66.47696499	4.889439630	2.286532122	nan	nan	9.515999742	3.850174979	0.667672392
1120.652662	637735.9658	258764.3597	19.73390670	450.0699645	290.8927214	132.2789146	nan	nan	153.8079041	62.03106865	108.8808273
390.3028293	638028.6827	256985.0735	114.0045316	76.22468618	239.0772773	107.0401053	345.5866457	154.6222132	134.0939993	53.87527968	72.62926728
331.8399188	638175.4389	256925.8276	185.7926794	83.06188948	52.42404442	23.53472958	nan	nan	28.34711488	11.38570149	13.48260400
103.7101486	639071.9439	257256.9745	311.1482030	129.2106218	13.04719566	5.913235261	5.298092839	2.455454515	59.63848776	23.95470812	0.766742179
368.3825392	638064.0055	256932.0084	494.6040989	207.8795212	238.6644868	106.7790202	nan	nan	179.9276898	72.26986320	34.15396028
4083.413316	43827.98900	18403.35425	235.7426216	111.1565105	214.5797230	98.95521155	nan	nan	52.44617987	21.86658507	0.546173589
3188.715972	47128.31744	19651.79459	102.7267555	43.95087276	396.9070523	182.4079298	nan	nan	73.86632147	30.73748209	0.274836771
5778.672688	37359.02030	15590.67774	120.3731766	53.75464924	538.9293049	247.5884687	nan	nan	109.0663878	45.33654945	0.549832031
5547.021503	38221.97041	15933.91374	63.29287685	28.89096796	167.0742288	76.75727039	nan	nan	25.56036537	10.62363686	0.176812351
4668.868508	41542.47127	17323.50837	61.57432847	28.43121500	580.2355586	266.5584262	5.492102327	2.563062247	136.8452039	56.93639455	0.902982296

Eventname	start_time	start_time_uc	length	length_uc	CO	CO_uc	CO2	CO2_uc	SO2	SO2_uc	PMscat
units	units	units	hr	hr	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	Mm^-1
Event01	20170718 09:0		6.300277777	0	9.336316740	5.466815837	15505.28397	800.2641988	0	0.963259997	517.6640021
Event02	20170718 18:0		14.56694444	0	11.01550313	5.550775156	13340.89442	692.0447210	7.515133197	1.375756659	651.1055465
Event03	20170724 19:0		13.43083333	0	5.457347314	5.272867365	2067.686387	128.3843193	0.043949452	1.002197472	1726.501475
Event04	20170725 10:0		5.183611111	0	36.52381437	6.826190718	16758.99902	862.9499511	2.056963721	1.102848186	11495.72892
Event05	20170725 17:0		16.00027777	0	64.57968090	8.228984045	33136.61315	1681.830657	6.626638426	1.331331921	4982.977146
Event06	20170726 11:0		4.580833333	0	25.45036686	6.272518343	46841.03029	2367.051514	15.66536898	1.783268449	1750.589031
Event07	20170726 16:0		17.11694444	0	49.36326901	7.468163450	23242.07369	1187.103684	12.37556352	1.618778176	15914.34502
Event08	20170425 13:0		4.033611111	0	542.1844225	32.10922112	1551.371516	102.5685758	5.731905516	1.286595275	13904.11305
Event09	20170425 19:0		14.75027777	0	2882.439332	149.1219666	11304.37037	590.2185189	16.92562286	1.846281143	174278.4141
Event10	20170426 12:0		3.966944444	0	2219.433933	115.9716966	3805.874468	215.2937234	8.423359708	1.421167985	100503.4848
Event11	20170426 17:0		16.05027777	0	3350.385697	172.5192848	6120.359165	331.0179582	6.961700212	1.348085010	48973.78189
Event12	20170427 11:0		3.233611111	0	2676.922429	138.8461214	6317.502840	340.8751420	6.432050511	1.321602525	161527.9934

PMscat\_uc PMscatforSS/PMscatforSS/ IsoFlow IsoFlow\_uc F1Flow F1Flow\_uc F2Flow F2Flow\_uc GasFlow GasFlow\_uc DilFlow  
Mm^-1 Mm^-1 Mm^-1 sccm sccm sccm sccm sccm sccm sccm sccm sccm sccm  
128.5328004; 516.5099653; 128.3019930; 1203.313522; 46.09940566; 100.6024646; 13.01807393; 816.2052819; 34.48615845; 254.1603103; 17.62480931; 1134.193487;  
155.2211093; nan nan 1096.886539; 42.90659617; 92.93165652; 12.78794969; 785.5269541; 33.56580862; 396.0177151; 21.88053145; 1227.418413;  
370.3002950; nan nan 359.0960683; 20.77288205; 86.37637277; 12.59129118; 798.7842030; 33.96352609; 437.3776757; 23.12133027; 1256.671651;  
2324.145785; 12074.19927; 2439.839854; 507.4109104; 25.22232731; 88.65419859; 12.65962595; 777.9588982; 33.33876694; 390.3421038; 21.71026311; 1234.067949;  
1021.595429; nan nan 813.2097012; 34.39629103; 94.56990330; 12.83709709; 792.5294178; 33.77588253; 432.3421641; 22.97026492; 1244.828388;  
375.1178062; 1748.155841; 374.6311682; 825.5126735; 34.76538020; 85.39700442; 12.56191013; 775.3623491; 33.26087047; 366.1625735; 20.98487720; 1206.654478;  
3207.869005; nan nan 874.1765307; 36.22529592; 107.0361402; 13.21108420; 809.9554372; 34.29866311; 408.7205822; 22.26161746; 1235.466577;  
2805.822610; nan nan 916.7781144; 37.50334343; 93.68879553; 12.81066386; 778.2088010; 33.34626403; 1047.6326014; 41.42897803; 766.1057778;  
34880.68283; nan nan 961.7924332; 38.85377299; 97.66946008; 12.93008380; 675.1639517; 30.25491855; 195.2515960; 15.85754788; 11.04325718;  
20125.69696; nan nan 932.1614732; 37.96484419; 65.76003081; 11.97280092; 780.8625446; 33.42587633; 132.7032420; 13.98109726; 42.99201736;  
9819.756378; nan nan 896.7505235; 36.90251570; 112.5364739; 13.37609421; 745.6495387; 32.36948616; 154.0067150; 14.62020145; 12.46006472;  
32330.59869; 160006.9720; 32026.39441; 927.3028949; 37.81908684; 98.7222747; 12.96166824; 621.0662314; 28.63198694; 115.7358474; 13.47207542; 0

DilFlow\_uc RH RH\_uc Tsamp Tsamp\_uc Tbgk Tbgk\_uc TCnoz TCnoz\_uc StakVel StakVel\_uc NozVel  
degC % degC degC degC degC degC degC m/s m/s m/s  
44.02580463; 38.59569683; 5.0 32.15125655; 2.464537696; 32.39077421; 2.471723226; 119.4718949; 5.084156849; 7.450350477; 0.472517523; 7.137321202;  
46.82255239; 32.93916973; 5.0 27.59109284; 2.327732785; 28.13906676; 2.344172002; 114.7352491; 4.942057474; 6.909850316; 0.445492515; 6.262008892;  
47.70014953; 36.57543794; 5.0 28.69109222; 2.360732766; 28.95138880; 2.368541664; 42.66760149; 2.780028044; 1.722686525; 0.186134326; 1.777764340;  
47.02203847; 40.47864530; 5.0 33.09045067; 2.492713520; 33.29238518; 2.498771555; 61.03013772; 3.330904131; 1.951945852; 0.197597292; 1.407634485;  
47.34485165; 40.51447023; 5.0 32.02928421; 2.460878526; 32.43152549; 2.472945764; 169.7012899; 6.591038697; 3.279078798; 0.263953939; 2.930576599;  
46.19963434; 45.19501546; 5.0 34.30336547; 2.529100964; 34.44937238; 2.533481171; 281.8887764; 9.956663293; 4.390048078; 0.319502403; 3.696000504;  
47.06399733; 43.30879083; 5.0 33.95164473; 2.518549341; 34.41455997; 2.532436799; 164.7996867; 6.443990603; 2.678711371; 0.233935568; 3.148859822;  
32.98317333; 52.62364850; 5.0 30.23234625; 2.406970387; 30.69106122; 2.420731836; 27.47706479; 2.324311943; 0.800799545; 0.140039977; 60.78715825;  
10.33129771; 67.69759514; 5.0 22.88323572; 2.186497071; 23.31074556; 2.199322366; 17.62675448; 0.208802634; 0.351806913; 0.117590345; 54.47196713;  
11.28976052; 58.26965898; 5.0 27.09327778; 2.312798333; 27.53610391; 2.326083117; 32.02939570; 2.460881871; 0.494564960; 0.124728248; 55.90309285;  
10.37380194; 62.37661168; 5.0 20.28666689; 2.108600006; 20.63246395; 2.118973918; 29.03369100; 2.371010730; -0.305626573; 0.084718671; 55.95108153;  
9.894127652; 73.01786788; 5.0 27.31179451; 2.319353835; 27.84879305; 2.335463791; 34.61524783; 2.538457434; 0.428787387; 0.121439369; 54.41473679;

NozVel\_uc DilRat DilRat\_uc PMabs PMabs\_uc PMconc PMconc\_uc OCfrontconc OCfrontconc\_ECfrontconc ECfrontconc\_OCbackconc  
m/s - - Mm^-1 Mm^-1 mgm^-3 mgm^-3 mgm^-3 mgm^-3 mgm^-3 mgm^-3 mgm^-3 mgm^-3  
0.456866060; 13.37407372; 1.337407372; 8646.787108; 1754.357421; 0.615832210; 0.030097380; nan nan nan nan nan  
0.413100444; 27.27989309; 2.727989309; nan nan 1.267204563; 0.054360961; nan nan nan nan nan  
0.188882171; 21.16814949; 2.116814949; nan nan 0.912878026; 0.039487403; nan nan nan nan nan  
0.170381724; 0 -2950728380; 16617.09738; 3348.419477; 6.447740596; 0.276648872; nan nan nan nan nan  
0.246528829; 16.76272274; 1.676272274; nan nan 2.694432053; 0.114912728; nan nan nan nan nan  
0.284800025; 17.74628750; 1.774628750; 710.8641161; 167.1728232; 8.001909776; 0.343610761; nan nan nan nan nan  
0.257442991; 13.76629978; 1.376629978; nan nan 11.99772691; 0.508075530; nan nan nan nan nan  
3.139357912; 1.212684263; 0.121268426; nan nan 3.398352852; 0.147713001; nan nan nan nan nan  
2.823598356; 0.002424274; 0.000242427; nan nan 32.43405550; 1.453430495; nan nan nan nan nan  
2.895154642; 0 -5992996646; nan nan 20.33949899; 0.870659737; nan nan nan nan nan  
2.897554076; 0.012598845; 0.001259884; nan nan 7.492404826; 0.325318660; nan nan nan nan nan  
2.820736839; 0 -0.000544518; 1528.910553; 330.7821106; 38.09544395; 1.756464656; nan nan nan nan nan

OCbackconc\_ECbackconc ECbackconc\_OCconc OCconc\_uc ECconc ECconc\_uc BCconc BCconc\_uc  
mgm^-3 mgm^-3 mgm^-3 mgm^-3 mgm^-3 mgm^-3 mgm^-3 mgm^-3  
nan nan nan nan nan nan 0.063300794; 0.01408359020967131  
nan nan nan nan nan nan 0.088911047; 0.014609509562419375  
nan nan nan nan nan nan 0.646227612; 0.10481494622064855  
nan nan nan nan nan nan 3.492286587; 0.5564311057210485  
nan nan nan nan nan nan 1.281539956; 0.19610361162661602  
nan nan nan nan nan nan 0.102876547; 0.02399344013311775  
nan nan nan nan nan nan 2.277414270; 0.32379815166822234  
nan nan nan nan nan nan 0.035390386; 0.01851410328060488  
nan nan nan nan nan nan 0.120678421; 0.01868892215722339  
nan nan nan nan nan nan 0.102536705; 0.03252640004862431  
nan nan nan nan nan nan 0.051828277; 0.008063869536687559  
nan nan nan nan nan nan 0.251375353; 0.042926022350788476

