



Montevideo – Uruguay  
Hotel Escuela Kolping  
27 y 28 Octubre de 2011



## MODELACIÓN Y SEGUIMIENTO DE LA CALIDAD DE AIRE EN UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ACIDO SULFÚRICO

### Carlos De María \*

Carlos De María, gerencia parte del equipo técnico de la empresa Estudio Ingeniería Ambiental y es Director técnico de la empresa Data Monitoreo. Ha desarrollado su actividad en el área de la Hidráulica, Gestión Ambiental y Evaluación de Impacto Ambiental, con un desarrollo específico en Modelación y Monitoreo de emisiones y calidad de aire a partir del año 2002.

FOTOGRAFIA  
del  
AUTR  
PRINCIPAL  
del  
TRABAJO

### Alejandra de Vera

De formación Ingeniera Civil especializada en el área Hidráulica y Ambiental, se desempeña en Estudio Ingeniería Ambiental y en el Instituto IMFIA de la Facultad de Ingeniería de la UDELAR.

Avda del Libertador 1532/801 – Montevideo - Uruguay

Tel/Fax: 2 903 1191 Fax:

E-mail: [carlos.demaria@eiacom.uy](mailto:carlos.demaria@eiacom.uy)

### RESUMEN

El presente trabajo aborda el desarrollo de estudios técnicos durante 4 años de trabajo en torno a un emprendimiento industrial de producción e ácido sulfúrico. El proceso de elaboración de ácido sulfúrico presenta como uno de sus aspectos ambientales significativos la emisión de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).

El trabajo inicial comenzó en la etapa de Evaluación de Impacto Ambiental, estudio en el cual se requirió que se desarrollara la evaluación de las emisiones a la atmósfera. Desarrollada la modelación de dispersión atmosférica, finalizó la primera parte del estudio técnico ajustándose la altura de disposición de los efluentes gaseosos (altura de chimenea), elaborando un mapa de concentraciones en torno al proyecto industrial, verificando a través del mismo el cumplimiento de los criterios de calidad de aire que fueron propuestos.

Realizada la construcción del proyecto industrial, fue desarrollada una nueva evaluación de calidad de aire con datos meteorológicos levantados específicamente en la zona de proyecto, para lo cual fue instalada una estación meteorológica. Con datos meteorológicos reales se realizó una nueva modelación, teniendo una nueva instancia de verificación que las condiciones esperadas para operación del proyecto, con resultados bastante aproximados a los ya previstos en el EslA.

Finalmente, se trabajó en la evaluación real de la operación del proyecto, aplicando metodologías de medición de emisiones gaseosas, medición de calidad de aire y una nueva modelación con datos reales, con una nueva metodología de evaluación que involucra la aplicación de un modelo de la EPA con datos meteorológicos generados mediante un modelo atmosférico (MM5), realizando la verificación de los resultados modelados mediante las mediciones de calidad de aire realizadas.

**Palabras Clave (en negritas):** Modelación, dióxido de azufre, calidad de aire, emisiones.

### INTRODUCCION

Una industria nacional que opera en el rubro de producción de ácido sulfúrico comenzó el desarrollo de un proyecto industrial para la elaboración de fertilizantes, incluyendo la producción de ácido sulfúrico, en una zona rural. En el transcurso de 4 años de trabajo fue desarrollado un proceso de estudio que comprendió las siguientes etapas:

- Etapa 1: Predicción de calidad de aire y comparación con valores guías de referencia, en el marco de la elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental.
- Etapa 2: Adquisición de datos meteorológicos y remodelación con datos reales levantados In Situ, previo a la entrada en operación de la planta industrial

- Etapa 3: Seguimiento operativo con desarrollo de monitoreo de emisiones, y monitoreo de la calidad de aire. Elaboración de una nueva modelación con base a un modelo EPA, verificando su comportamiento con base a los datos de monitoreo recabados.

El presente trabajo presenta un breve síntesis comparativo de los diferentes resultados obtenidos en la predicción de la calidad del aire en las etapas 1 y 2, desarrollando con mayor detalle el trabajo de modelación de la Etapa 3 con la verificación de los resultados obtenidos mediante mediciones específicas tanto de emisiones como de calidad de aire

## DESARROLLO

En el desarrollo del trabajo se presentarán las diferentes etapas citadas anteriormente, con las hipótesis básicas adoptadas para cada una de ellas y sus resultados.

### - Etapa Inicial: Modelo simplificado de dispersión de contaminantes

Fue definido como objetivo de calidad de aire cumplir con un estándar de tipo secundario para el  $\text{SO}_2$ , correspondiendo a una media anual de  $9,26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , además de los criterios de calidad definidos por Gesta aire para este parámetro ( $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como percentil 95, máximo  $365 \mu\text{g}/\text{m}^3$  que no debe superarse más de una vez al año)

Se partió de datos teóricos de emisión de dióxido de azufre, acorde al tipo de proceso involucrado (producción de ácido sulfúrico con simple absorción), definiendo las condiciones de descarga (flujo de masa de dióxido de azufre, caudal de aire, velocidad de salida, altura de dispersión, temperatura de gases, etc).

Luego se formuló un modelo de predicción de calidad de aire simplificado, que fuera posible desarrollarse con la información meteorológica disponible en nuestro país, abordando:

- a) La dispersión de los contaminantes en condiciones de estabilidad atmosférica específicas
- b) La distribución de los contaminantes acorde a la variabilidad del tiempo en que sopla el viento en una dirección determinada.

Entre el conjunto de datos que se requiere para realizar el análisis de la incidencia de una emisión atmosférica en el entorno se encuentran los datos meteorológicos. Los mismos son necesarios para definir las condiciones atmosféricas que inciden en la dispersión de los contaminantes y la incidencia según la dirección en que sopla el viento.

Los datos meteorológicos adquiridos en la Dirección Nacional de Meteorología (DNM) fueron nubosidad baja, velocidad del viento, temperatura, y % por rumbo en la dirección del viento (rosa de los vientos). Los primeros 3 datos solicitados son utilizados para evaluar las condiciones climáticas que definen la clase de estabilidad para el estudio de la dispersión atmosférica, y los datos de la rosa de los vientos, son utilizados para realizar el análisis de la distribución de los contaminantes por el efecto de los cambios en la dirección del viento.

#### *Análisis de las condiciones de estabilidad.*

Este criterio de análisis fue simplificado al estudio por fajas horarias, de datos promedio de 5 años considerados en intervalos 3 horas cada uno (0-3, 3-6, 6-9, 9-12, 12-15, 15-18, 18-21, 21-0), analizando cada mes del año por separado. Por razones de calidad de los datos en estaciones de la zona se trabajó con la estación de Colonia.

Cada una de las posibles situaciones meteorológicas que determinan las distintas condiciones de dispersión atmosférica fueron evaluadas y determinadas de la siguiente manera:

- Utilizando el Método de Turner, se determinó el índice relativo de radiación neta, a partir de la altura solar de cada hora de cada día de cada mes promediado en los 5 años de estudio y de la nubosidad (dato adquirido a DNM).
- Conociendo el índice relativo de radiación neta y la velocidad de viento a 10 m (dato adquirido a DNM) se extrae de tabla la categoría de estabilidad atmosférica de Pasquill, para cada hora de cada día de cada mes promediado en los 5 años de estudio.

- La simulación de la dispersión en cada escenario se realizó mediante el uso del modelo SCREEN 3 desarrollado por la Environmental Protection Agency (EPA) de los EE.UU.

El modelo SCREEN utiliza las ecuaciones de dispersión de pluma gaussiana de la contaminación gaseosa de una fuente continua, para distintas situaciones meteorológicas y de estabilidad atmosférica, simulados a nivel de tierra y en el eje de la dirección del viento, para estimar la concentración del contaminante en el aire, a la altura del receptor. Las hipótesis de trabajo fueron:

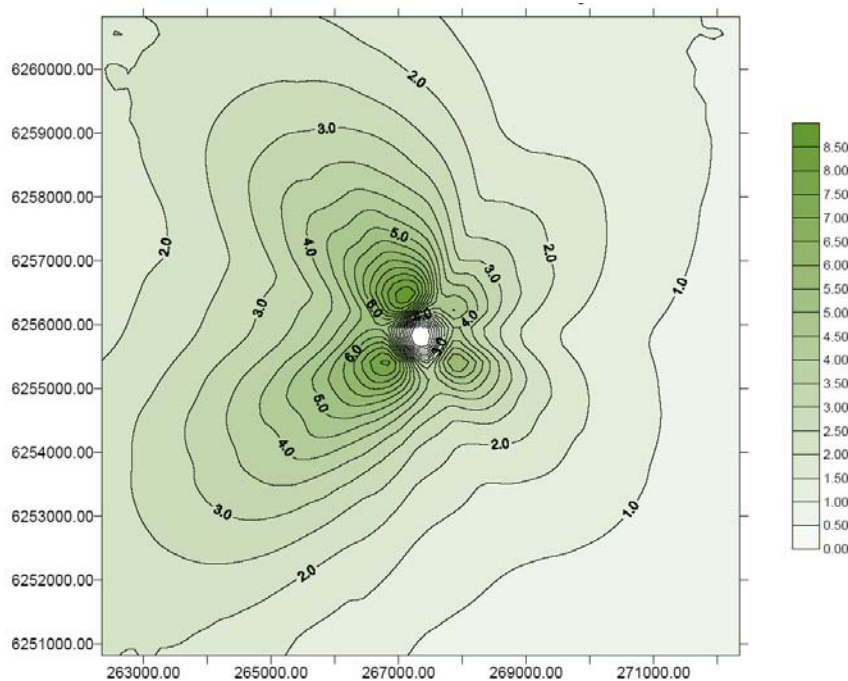
- Terreno plano y simple en torno a la planta para los planos de modelación seleccionados.
- Zona rural.
- No existe "downwash".
- Los contaminantes a evaluar no actúan en reacciones químicas luego de ser expulsados por la chimenea.
- Los contaminantes a evaluar no actúan en ningún proceso de remoción luego de ser expulsados por la chimenea, como ser deposición húmeda o seca.

#### *Distribución de contaminantes.*

La base para la distribución de los valores modelados fue la rosa de los vientos, la cual fue formada para cada faja horaria de cada mes del año con datos promedios mensuales adquiridos en la DNM.

#### *Resultados de la modelación*

Los resultados de la evaluación realizada, considerando un **flujo másico de SO<sub>2</sub> de 20 g/s**, permitieron elaborar un mapa de iso-concentraciones en torno a la planta industrial, que se detalla en la Figura 1.



**Figura 1 - curvas de iso-concentración en torno a zona industrial**

Como resultado fue encontrado como punto crítico el ubicado a 700 m de la fuente en dirección NNW, con una concentración esperada de 9,26 µg/m<sup>3</sup>.

## - Segunda Etapa: Modelación con datos meteorológicos reales

Se trabajó en un ajuste de la predicción de concentraciones con base a datos de meteorología real de la zona. El levantamiento de datos meteorológicos fue realizado mediante una estación marca Davis modelo Vantage Pro2 (ver Figura 2), que fuera instalada en un predio de la empresa ubicado frente al predio en el cual operaría la planta industrial. Los sensores de la estación fueron instalados a 10 m de altura en tanto que la consola y la batería de alimentación fueron instaladas en una caseta construida especialmente para su protección.



**Figura 2 – Estación meteorológica**

La estación meteorológica relevó un conjunto importante de datos pero los que serán utilizados para el modelado son los siguientes:

- Velocidad del Viento.
- Temperatura.
- Radiación solar.

El procesamiento de los datos meteorológicos fue similar a los desarrollados para el modelo de Etapa 1, considerando promedios de 8 fajas horarias de 3 horas cada una (0-3, 3-6, 6-9, 9-12, 12-15, 15-18, 18-21, 21-0), considerando cada mes del año por separado.

Esto permitió realizar los siguientes ajustes:

- Estudio de la estabilidad atmosférica diurna real.
- Estudio mensual de la rosa de los vientos de la zona.

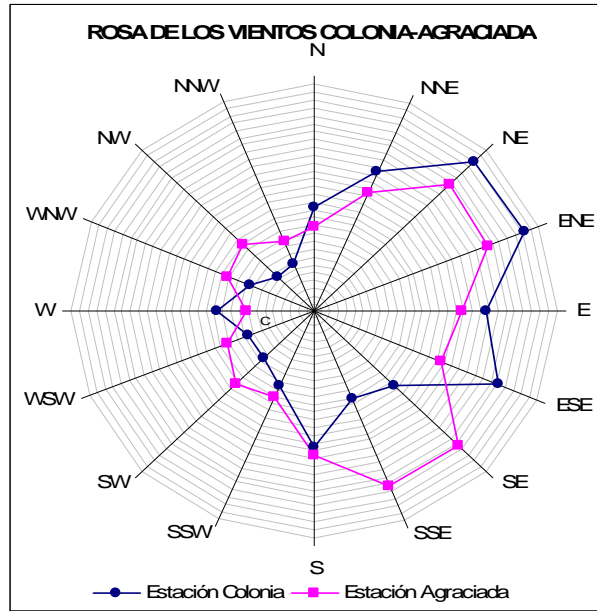
### *Análisis de las condiciones de estabilidad.*

Para el estudio de la estabilidad atmosférica fue necesario aplicar una metodología que utilizara como dato de base la radiación solar. A tales efectos se utilizó el procedimiento indicado en el "INSTRUCTIVO PARA LA APLICACIÓN DE MODELOS DE DIFUSIÓN ATMOSFÉRICA A EFLUENTES GASEOSOS", aprobado según el artículo 5º del Anexo I de la resolución 242/1997, Secretaría de Política Ambiental, Provincia de Buenos Aires, el cual se refiere a metodologías de cálculo sugeridos por EPA.

### *Distribución de los vientos.*

Como resultado del análisis se obtuvo la diferencia de la rosa de los vientos de la estación Colonia (utilizada en la modelación teórica del EslA) y la de la zona de estudio en la localidad de Agraciada.

Según se desprende de la Figura 3, se nota en la localidad de Agraciada, sitio de implantación del proyecto, de un incremento de la incidencia de los vientos del cuadrante SSE-SE, bajando la incidencia de los vientos del cuadrante ESE a NE.



**Figura 3 – Rosa de los vientos.**

Estación Agraciada: período de observación abril 2007 – febrero 2008-03-08

Estación Colonia: período de observación 2000 - 2005

Realizada la nueva modelación, fue encontrado como punto crítico el ubicado a 700 m de la fuente en dirección WNW, con una concentración esperada de  $8,86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . El resultado de la comparación entre ambas metodologías de modelación se puede apreciar en la Tabla 1.

**Tabla 1: Concentración promedio anual – máximo esperado en 24 hs**

Dirección de máxima incidencia anual	Promedio anual – máximo	
	DISTANCIA (m)	CONCENTRACION ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Modelación inicial Etapa 1 Dirección NNW	700	9,26
Modelo Etapa 2 Dirección WNW	700	8,86
<b>VARIACIÓN</b>		<b>-4,5 %</b>

Se observa que se genera una variación en la media anual máxima esperada, del 4,5% con respecto al valor de la primera modelación realizada con datos meteorológicos de la estación Colonia, generándose una variación en la dirección en el cual se proyecta dicho evento pasando de la dirección NNW a WNW generado por la mayor incidencia de vientos provenientes del cuadrante SE - SSE

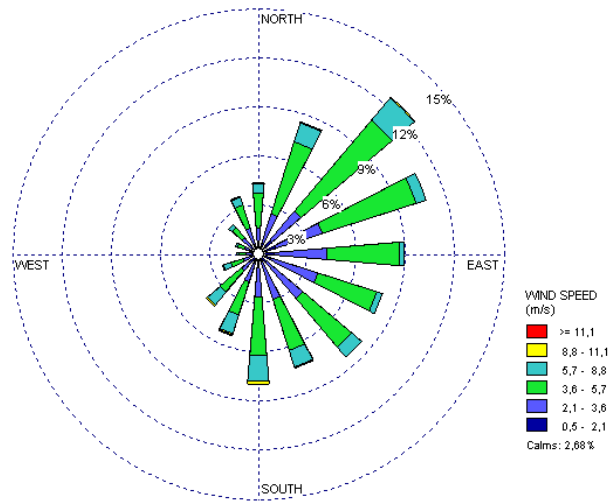
**- Tercera Etapa: Modelación con AERMODE de EPA y verificación con datos reales.**

Como estudio de cierre en el marco de un proceso de ampliación industrial, se realizó un trabajo de modelación por medio de un modelo complejo de la EPA denominado Aermod, a través del cual fue posible integrar una topografía de detalle de la zona y utilizar los datos de emisión real que fueron medidos en la operación del proceso. El modelo utilizado permite la determinar entre otros, los siguientes parámetros:

- Concentraciones promedio anuales.
- Concentraciones máximas diarias.
- Percentiles (Percentil 95 específicamente para el parámetro SO2)

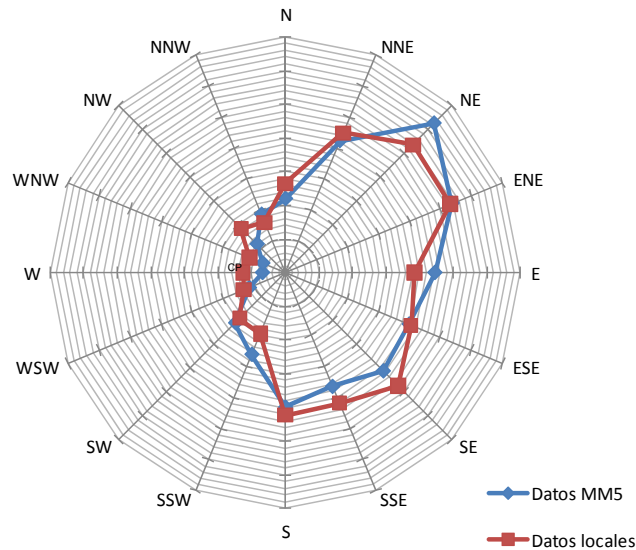
**Datos meteorológicos.**

Fueron adquiridos datos meteorológicos generados mediante un modelo numérico de predicción atmosférica de mesoescala denominado modelo MM5, solicitando datos en el período 2005 a 2010. Con los datos meteorológicos adquiridos se analizó la distribución de los vientos que se encuentra ilustrada en la Figura 4.



**Figura 4 – Rosa de los vientos Agraciada - Modelo MM5.**

Para evaluar la calidad de los datos meteorológicos que fueron generados con el modelo MM5, se comparó la rosa de los vientos generada con el modelo con la elaborada con base a los datos levantados con la estación meteorológica. Dicha comparación se puede apreciar en la Figura 5. De la comparación realizada se puede apreciar un buen ajuste de los datos suministrados por el Modelo,



**Figura 5 – Comparación Rosa de los vientos relevada - Modelo MM5.**

### Modelo de terreno

Se trabajó sobre la base de las curvas de nivel cada 2 m del Google Earth, previamente validadas, luego de generadas, con las curvas cada 10 m del Servicio Geográfico Militar. Fue considerado dentro del modelo la conformación de la platea donde está montada la planta industrial, y se ingresaron las construcciones existentes, plantas, depósitos, etc. con sus respectivas alturas como obstáculos al flujo. En la Figura 6 se presenta la vista en 3D y planta del modelo del terreno generado por el módulo AERMAP a partir de las curvas de nivel incorporadas.

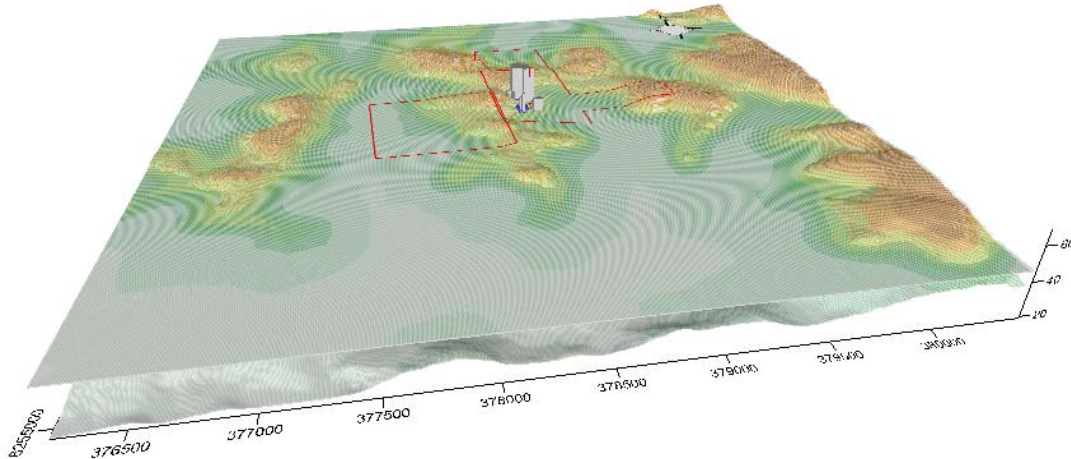


Figura 6 – Grafico 3D del modelo del terreno.

### Condiciones de operación

Las condiciones en que ha operado el proceso industrial representan un dato básico para la predicción del modelo y la verificación de su comportamiento. Para ello fueron utilizadas dos fuentes de información de datos de concentración de  $\text{SO}_2$  por la chimenea, para el ajuste del flujo másico de  $\text{SO}_2$  emitido por la chimenea:

- Datos de medición continua con un analizador de gases marca siemens.
- Muestras discretos mensuales realizados acorde a Método 8 de la EPA

Con los datos de la concentración de emisión y el caudal de aire del proceso se procedió al cálculo de la emisión másica del contaminante, que se detalla en la Tabla 2.

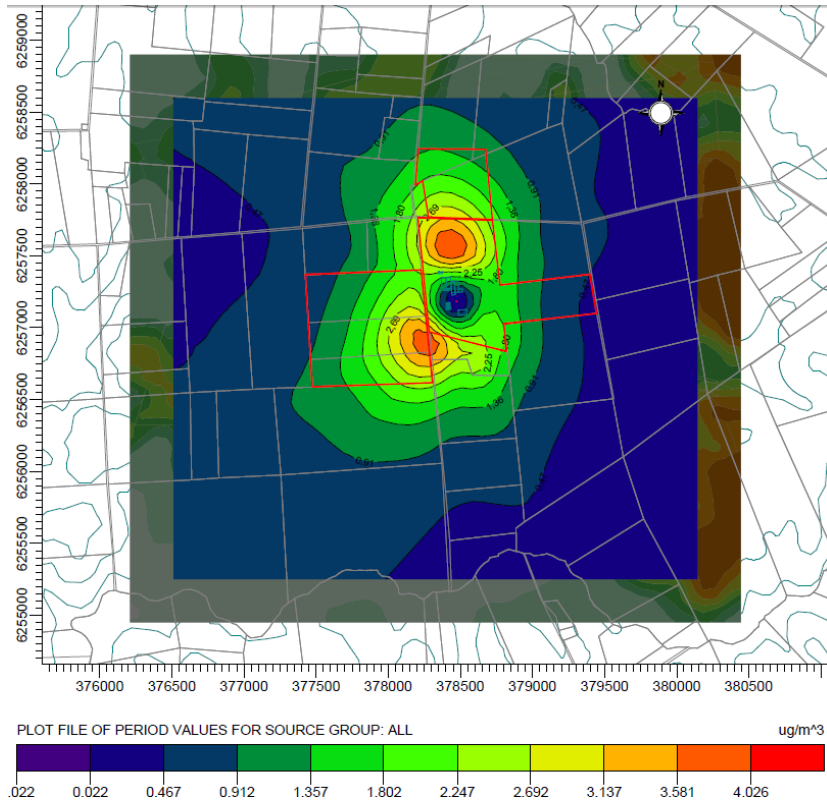
Tabla 2: Condición de descarga real de  $\text{SO}_2$

Característica	Valor	Unidades
Caudal másico	10,8	g/s

### Resultados de la modelación en la condición operativa actual

En la Figura 7 se presentan las curvas de concentración de  $\text{SO}_2$  (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) obtenidas en la corrida del modelo de dispersión para el flujo de masa presentado anteriormente, con las condiciones de descarga de gases que fuera consideradas (altura de chimenea, diámetro seleccionado y temperatura de gases).

El gráfico presenta los valores máximos correspondientes a medias diarias y a medias en todo el período modelado (mayo de 2009 a marzo de 2010).



**Figura 7 – Concentración de SO<sub>2</sub> – Promedio anual**

**Medición de calidad de aire**

Para el estudio de la calidad del aire en la zona fue instalada una estación de medición en el límite Norte del predio de la empresa, coincidente con la zona donde se esperan mayores concentraciones, según se puede apreciar en la Figura 8.



**Figura 8: Ubicación de la estación de muestreo**



El monitoreo de calidad de aire fue desarrollado a partir del mes de mayo del año 2009, con un período de muestreo de casi un mes consecutivo. Posteriormente el muestreo fue realizado entre setiembre del 2009 hasta marzo del año 2010, mes en el cual se finalizó el trabajo de medición, tomándose un total de 53 muestras.

Fue desarrollada una técnica de medición mediante el montaje de un tren de muestreo siguiendo la norma ISO 4221-1980 "Air quality – Determination of mass concentration of sulphur dioxide in ambient air", modificando la misma en la parte analítica incorporando el análisis de muestra a través de análisis de sulfato por cromatografía iónica.

Con los datos de mediciones de calidad de aire fue posible determinar valores promedios con tendencia anual, y valores máximos en el período de observación, cuyo resultado se presenta en la Tabla 3.

**Tabla 0: Comparación modelación – mediciones en el parámetro SO<sub>2</sub>**

	SO <sub>2</sub> (µg /m <sup>3</sup> )	Calidad medida SO <sub>2</sub> (µg /m <sup>3</sup> )
<b>Máximo Diario en el período</b>	17,41	19,8
<b>Promedio en todo el período</b>	2,98	2,7
<b>Percentil 95 – Medias diarias</b>	12,51	-

Como se observa en la Tabla 3, se obtuvo una muy buena aproximación entre los valores modelados y los medidos, con un apartamiento máximo del 12% en los valores máximos proyectados.

## CONCLUSIONES

Fue realizada una modelación para la dispersión de contaminantes en la atmósfera, con base a un modelo EPA y el apoyo de datos climatológicos elaborados con base a un modelo de predicción atmosférica de meso escala (modelo MM5).

Fue comparada la rosa de los vientos obtenida con el modelo MM5 con la rosa de los vientos local levantada con una estación meteorológica encontrando una buena aproximación.

Fueron levantados datos de calidad de aire mediante la puesta a punto de una técnica de medición basada en la norma ISO 4221. Las muestras de calidad de aire tomadas se encontraron en un rango de valores desde un mínimo no detectable (indicadas como ND) a un máximo de 19,8 µg/m<sup>3</sup>, con una concentración promedio 2,7 µg/m<sup>3</sup>. Los valores obtenidos con la modelación son muy similares a los datos medidos:

- El valor promedio obtenido en el período modelado (2,98 µg/m<sup>3</sup>) es levemente superior, del orden del 10%, al valor promedio obtenido con un total de 53 muestras (2,7 µg/m<sup>3</sup>).
- Con respecto al valor máximo diario, los resultados de la modelación difieren en menos del 12% de los obtenidos en el muestreo de calidad de aire (17,41 µg/m<sup>3</sup> y 19,8 µg/m<sup>3</sup> respectivamente).

En función de los datos obtenidos se puede concluir que, la metodología de modelación aplicada basada en el modelo EPA Aermod, con datos meteorológicos generados con un modelo numérico de predicción atmosférica (tipo MM5), ha permitido realizar una predicción con un rango de error en torno al 10%, según la verificación de su resultado contra un período importante de mediciones de calidad de aire.

La metodología de modelación presentada en las dos primeras etapas del trabajo, formulada con base a un modelo simplificado que utilizó valores de meteorología promediados mensualmente y en fajas tri horarias, resulto ser conservadora ya que en las condiciones reales de operación dicho modelo proyectaría un valor de concentración promedio anual de 4,78 µg/m<sup>3</sup>, calor 77% por encima de los valores promedios anuales medidos en la estación de muestreo.