202-05

MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL ESTUDIO DE RIESGOS PARA LA SALUD HUMANA

COMPLEJO METALÚRGICO LA OROYA

6 de setiembre de 2005

Preparado para

Integral Consulting, Inc.
Mercer Island, Washington 98040

Preparado por:

McVehil-Monnett Associates, Inc.
44 Inverness Drive E. Bldg. C
Englewood, CO 80112

MMA Project Número 1875-0

CONTENIDO

Sección Pág.

RESUMEN EJECUTIVO
1.0 INTRODUCCIÓN 1
2.0 EL MODELO DE CALIDAD DEL AIRE 2
3.0 INFORMACIÓN DISPONIBLE Y LIMITACIONES DE LA INFORMACIÓN 4
3.1 FUENTES DE EMISIONES 4
3.2 INFORMACIÓN METEOROLÓGICA 5
3.3 INFORMACIÓN SOBRE CALIDAD DEL AIRE 6
4.0 EXPECTATIVAS DEL MODELO 8
5.0 METODOLOGÍA DE APLICACIÓN DEL MODELO 9
5.1 MODELO METEOROLÓGICO CALMET 9
5.2 MODELO DE DISPERSIÓN CALPUFF 10
5.3 INFORMACIÓN SOBRE EMISIONES 10
5.4 PRUEBAS INICIALES 11
6.0 DESEMPEÑO DEL MODELO 14
6.1 OBSERVACIONES GENERALES 14
6.2 VARIACIONES CON LA UBICACIÓN Y EL TIEMPO PROMEDIO 14
6.3 CONCLUSIONES SOBRE EL DESEMPEÑO DEL MODELO 18
7.0 MODELAMIENTO PARA EL ESTUDIO DE RIESGO 22
7.1 CULPABILIDAD DE LA FUENTE 22
7.2 RESULTADOS DEL MODELO PARA ÁREAS DE ESTUDIO DE RIESGO 25
7.3 IMPLICANCIAS 31
7.4 EFECTO DE LA REDUCCIÓN DE EMISIONES 32
7.5 RESULTADOS PARA ARSÉNICO Y CADMIO 33
8.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 36

REFERENCIAS 39

APÉNDICE A. RESULTADOS DEL MODELO – MAPAS DE ISOPLETAS
APÉNDICE B. ACCIONES DE MITIGACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN EN EL COMPLEJO METALÚRGICO
APÉNDICE C. ARCHIVOS DE MODELAMIENTO E INFORMACIÓN DE MONITOREO EN LA OROYA

Tablas

5-1 NIVELES DE EMISIÓN MODELADOS PARA EL COMPLEJO LA OROYA 13
6-1 CONCENTRACIONES ANUALES PROMEDIO PRONOSTICADAS Y MEDIDAS PARA EL 2002.....14
6-2 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO EN EL 2002 CON LOS DATOS DE MONITOREO 16
7-1 NIVELES DE EMISIÓN DE LA OROYA (g/s).....24
7-2 PREDICCIONES DEL MODELO PARA EL ÁREA DE CHUCCHIS 27
7-3 PREDICCIONES DEL MODELO PARA EL ÁREA DE MARCAVALLE 28
7-4 PREDICCIONES DEL MODELO PARA EL ÁREA DE LA OROYA NUEVA.....29
7-5 PREDICCIONES DEL MODELO PARA EL ÁREA DE LA OROYA ANTIGUA 30
7-6 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO EN EL 2002 CON LOS DATOS DE MONITOREO 34
7-7 PREDICCIONES DEL MODELO PARA ARSÉNICO Y CADMIO 35

Figuras

6-1 HOTEL INCA – CONCENTRACIONES MEDIAS MENSUALES DE SO_2 EN MARZO DE 2002.....17
6-2 SINDICATO – CONCENTRACIONES MEDIAS DIARIAS DE SO_2 EN DICIEMBRE DE 2002 19
7-1 REJILLAS RECEPTORAS PARA MODELAMIENTO PARA ESTUDIOS DE RIESGO 23

RESUMEN EJECUTIVO

Se realizó el Modelamiento computarizado de los impactos en la contaminación del aire causados por el Complejo Metalúrgico de La Oroya con el fin de suministrar estimados de la calidad futura del aire que puedan usarse en el estudio de riesgos para la salud humana. Se generaron predicciones del modelo para las áreas pobladas que forman parte del estudio. El área que se incluyó en el modelo estaba limitada a distancias de 10 km del Complejo

Para el modelamiento, se utilizó el modelo CALPUFF, un modelo de simulación de la calidad del aire recomendado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos para su aplicación en áreas de gran complejidad en cuanto a vientos, terrenos y meteorología. El modelo considera los efectos de los vientos, la dispersión atmosférica, las transformaciones químicas y la deposición superficial de contaminantes con sus variaciones a lo largo del tiempo y del espacio.

Los datos de entrada para la aplicación CALPUFF incluyeron emisiones contaminantes medidas, provenientes de la chimenea principal de la Función y emisiones estimadas de fuentes fugitivas, todo en una base promedio anual para el año 2002. Otros datos de entrada fueron las condiciones meteorológicas horarias medidas en las seis estaciones de monitoreo a nivel del suelo que opera Doe Run Perú. No se contó con ninguna observación específica del lugar por encima del suelo; por lo tanto, los vientos y las temperaturas del aire se estimaron a partir de los análisis climáticos globales de seis horas preparados por el Servicio Nacional de Meteorología de los Estados Unidos.

El modelamiento de las condiciones climáticas y las emisiones en el 2002 suministró impactos pronosticados por modelo, los cuales se compararon con las concentraciones medidas en las estaciones de monitoreo de Doe Run. Asimismo, permitió también contar con un "caso base" contra el cual comparar las predicciones para años posteriores. Las actividades de modelamiento posteriores, para la proyección de tendencias futuras, usaron la misma información meteorológica del 2002 con estimados de emisiones en años posteriores. Doe Run Perú suministró estimados de emisiones contaminantes para 2005, 2007 y 2001 en base a la implementación de proyectos programados tal como se describe en el PAMA.

Se probó el desempeño del modelo en cuanto a la simulación de la calidad del aire en La Oroya mediante la comparación de las concentraciones de dióxido de azufre (SO_2), plomo (Pb), arsénico (As) y cadmio (Cd) pronosticadas para el 2002 con las mediciones obtenidas durante el mismo período en las estaciones de monitoreo de Doe Run Perú. La evaluación enfatizó las áreas pobladas consideradas dentro del estudio de riesgos. Estas áreas tienen su mejor representación en las estaciones de monitoreo en Sindicato, Hotel Inca y Cushurupampa.

La evaluación del desempeño del modelo produjo las siguientes conclusiones:

- Las predicciones del modelo reflejan la magnitud general de las concentraciones observadas

- Las predicciones de concentración de SO_2, en lo que se refiere a los valores promedio anuales y los valores máximos a corto plazo, muestran una concordancia adecuada con las observaciones de los monitores en Sindicato y Hotel Inca.

- Las predicciones sobre SO_2 tienden a ser mayores que las mediciones en Cushurupampa y menores que las mediciones en Huanchán.

- Las predicciones de concentraciones horarias de SO_2 reproducen con adecuada precisión la hora y la magnitud de los picos de contaminación observados durante la mañana.

- Las predicciones del modelo con frecuencia reproducen los cambios cotidianos observados en la calidad del aire, causados por condiciones climáticas cambiantes.

- Las predicciones de la concentración de Pb son, en promedio, 35% mayores que las concentraciones a largo plazo medidas

- Las predicciones sobre las concentraciones de As y Cd son, en promedio, cercanas a las concentraciones observadas, pero tienden a ser altas en Cushurupampa y bajas en Sindicato

- El desempeño del modelo es mejor durante las horas del día que durante la noche y parece ser mejor en el área inmediata de La Oroya que en el valle del río Yauli que está más alejado del Complejo Metalúrgico

Se concluye que el modelo simula adecuadamente los procesos de dispersión básicos en la región del Complejo y brinda estimados realistas de los impactos máximos a corto plazo y los impactos promedio a largo plazo en dicha área. Los resultados del modelo también implican que la caracterización de las fuentes de emisión y las tasas de emisión promedio que se usaron reflejan la realidad con precisión razonable. Sobre la base de estas conclusiones, se espera que las proyecciones de los impactos futuros en la calidad del aire sean realistas y apropiadas para el estudio de riesgos.

La proyección de las concentraciones en el aire ambiental y las tasas de deposición futuras indica que los proyectos de mejora programados en la Fundición darán como resultado una marcada reducción en los impactos de todos los contaminantes considerados. Se pronostica que el descenso en las concentraciones a corto y largo plazo y en las tasas de deposición entre el 2002 y el 2011 debe estar en el rango de 60 a 85%. El mayor descenso en los impactos de los metales ocurrirá en el 2007, dándose además, entre el 2007 y el 2011, un descenso adicional en el caso de los metales y un importante descenso en el caso del SO_2. Las proyecciones de los niveles de calidad del aire para años futuros se han

utilizado en el estudio de riesgos para cuantificar los cambios en la exposición de la población.

Los resultados del modelo confirman y amplían conclusiones anteriores sobre el impacto relativo de la chimenea principal y las fuentes fugitivas en el caso de impactos a nivel del suelo. Las fuentes fugitivas, a pesar de tener emisiones más pequeñas que la chimenea principal, son responsables de la mayor parte de impactos locales, especialmente en La Oroya Antigua y La Oroya Nueva. La importancia relativa de las emisiones de la chimenea principal se incrementa al incrementarse la distancia respecto al Complejo. El análisis de tendencias futuras demuestra que la mayor mejora en la calidad del aire ambiental se producirá a medida que se implementen proyectos para reducir o eliminar las emisiones fugitivas. Este resultado se cumple para todas las áreas de estudio, pero especialmente para aquellas que están cerca del Complejo Metalúrgico.

Los resultados del modelo (así como los registros de monitoreo) indican que la estrategia de control complementario de Doe Run Perú (reducción de las emisiones en momentos en los que se anticipa una calidad de aire deficiente) es efectiva para mitigar los niveles de contaminación altos a corto plazo durante los episodios matutinos de contaminación del aire. De mantenerse, esta estrategia contribuirá a una mejora adicional en la calidad del aire por encima de la proyectada por el análisis de modelamiento de la dispersión.

Recomendaciones para una Mejor Simulación con Modelos

El análisis de los resultados del modelo en el 2002 sobre una base de hora por hora, día por día y lugar por lugar sugiere que la falta de información meteorológica específica del lugar en el caso de altitudes por encima del nivel del suelo tiene un efecto negativo sobre el desempeño del modelo. Parece que el modelo, tal como se aplica actualmente, puede no considerar plenamente la frecuencia y la magnitud de las inversiones a baja altitud que atrapan a los contaminantes en los valles. La consecuencia de no representar con precisión las fuertes inversiones térmicas a bajo nivel es una subestimación de las concentraciones nocturnas, una sobresestimación de los impactos a lo largo del Río Yauli, en el área comprendida dentro de los 10 km que consideró el modelo, y una subestimación de los impactos a lo largo del río Mantaro, en el área comprendida entre La Oroya y Huanchán. Existe también la posibilidad de que la información de monitoreo proveniente de Cushurupampa no sea representativa de las condiciones generales a lo largo del río Yauli. Se espera que el futuro modelamiento de dispersión, utilizando datos del radar acústico para vientos y temperaturas por encima del suelo (actualmente en progreso en la Fundición), y posiblemente información de monitoreo adicional, pueda permitir una mejor capacidad de modelamiento.

Se recomienda que Doe Run Perú priorice la adquisición de información de monitoreo de alta calidad que pueda utilizarse para una mejor aplicación del modelo de calidad del aire en el futuro. En particular, se recomienda lo siguiente:

- Continuar y mejorar el monitoreo con un radar acústico tipo Doppler de manera que se pueda registrar información de alta calidad de manera consistente durante períodos de tiempo prolongados.

- Realizar calibraciones regulares y mejorar los procedimientos de aseguramiento/control de la calidad para garantizar que la información del monitoreo meteorológico y de calidad del aire sea precisa.

- Considerar la posibilidad de monitoreo adicional o la reubicación de algunos monitores existentes con el fin de brindar información representativa para el modelamiento.

Cuando se cuente con información adecuada de un radar acústico, se recomienda realizar un modelamiento adicional para suministrar un complemento oportuno al presente informe. El nuevo modelamiento superaría algunas de las limitaciones señaladas y ampliaría la simulación del modelo para incluir fuentes de la Fundición, áreas geográficas y procesos físicos que no se tocan en el presente estudio.

1.0 INTRODUCCIÓN

Integral Consulting, Inc. está realizando un estudio de riesgos para la salud humana con el fin de evaluar los impactos sobre la salud humana por parte de las emisiones actuales y futuras de contaminantes del aire provenientes del Complejo Metalúrgico de Doe Run Perú en La Oroya, Perú. Como parte del estudio de riesgos, McVehil-Monnett Associates, Inc. está aplicando un modelo de dispersión de la calidad del aire para simular el transporte y la dispersión de contaminantes emitidos por las operaciones en el Complejo. El presente informe describe el modelo, su aplicación en La Oroya y los resultados de la aplicación del modelo a escenarios pasados, presentes y futuros de emisiones al aire.

Un modelo de calidad del aire es una representación matemática de los procesos de transporte, dispersión y deposición que actúan sobre los contaminantes del aire liberados a la atmósfera. Dadas las condiciones meteorológicas locales y la cantidad de contaminantes liberados en diferentes puntos, el modelo, mediante cálculos complejos, brinda una simulación de la distribución, a través del tiempo y del espacio, de la concentración de contaminantes en el aire (y la deposición en la superficie del suelo) a lo largo del dominio del modelo.

Se puede usar un modelo válido de calidad del aire para:

- evaluar las contribuciones relativas de diferentes fuentes respecto a los impactos contaminantes totales en las ubicaciones receptoras de interés;

- definir el cambio en el impacto que se puede esperar considerando los controles de contaminación propuestos y/o los cambios en la operación de la fuente que se producirán en el futuro; y

- estimar los impactos máximos que se pueden producir en períodos y/o ubicaciones en los que no se cuente con un monitoreo de la información o dicho monitoreo sea inadecuado.

Por lo tanto, un modelo de calidad del aire puede suministrar información sobre impactos en la contaminación que complemente la información obtenida mediante monitoreo y se puede usar par evaluar la efectividad y adecuación relativa de las acciones propuestas para mitigar la contaminación.

En el caso del estudio de riesgos para la salud humana, se usará información histórica de monitoreo del aire, resultados de muestreos recientes y otra información ambiental para cuantificar las exposiciones actuales de la población a los contaminantes. La información del modelo se usará para estimar los probables cambios en la mencionada exposición ante los futuros cambios en las operaciones de la fundición. Así, la principal aplicación de los resultados del modelo será la predicción de las futuras tendencias en la

contaminación del aire a medida que se reduzcan o eliminen las emisiones de diferentes fuentes de la fundición.

Los contaminantes que se incluirán en el estudio de riesgos son dióxido de azufre (SO_2), material particulado (MP) y metales, especialmente plomo (Pb), arsénico (As) y cadmio (Cd). La aplicación de modelamiento de dispersión que se discute aquí se centra en SO_2 y plomo, pues se cuenta con información de monitoreo de estos contaminantes y sus emisiones provenientes del Complejo Metalúrgico están mejor cuantificadas que las de los otros contaminantes. También se incluyen el arsénico y el cadmio, aunque en menor detalle.

2.0 EL MODELO DE CALIDAD DEL AIRE

Se seleccionó el sistema CALPUFF de modelos de calidad del aire (Earth Tech, 2000) para su aplicación en La Oroya. CALPUFF es un modelo "guía" de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, 2003) recomendado para aplicaciones reguladoras y de otro tipo en las que debe considerarse un transporte de contaminantes de largo alcance y/o campos de vientos complejos con variaciones a lo largo del tiempo y del espacio. El sistema CALPUFF consta de varios módulos de cálculo separados: CALMET para analizar y definir variables meteorológicas, CALPUFF para simular la dispersión de los contaminantes y CALPOST para facilitar el procesamiento de los impactos pronosticados por el modelo. El modelo es capaz de analizar el transporte, la dispersión y la deposición de contaminantes gaseosos y particulados. Considera también la transformación química y física de los contaminantes en la atmósfera, los efectos de terrenos complejos, la sedimentación gravitacional de las partículas y las características de la fuente contaminante (altura, temperatura y velocidad de los gases, generación de efectos de estela, etc.).

El modelo CALPUFF es un modelo que simula las emisiones de contaminantes del aire desde una fuente dada como una serie de "soplos" (puff en inglés, de allí su nombre). Cada soplo se mueve y dispersa tal como lo dicta el viento local y otras condiciones meteorológicas en sucesivos lapsos de tiempo. Por lo tanto, cada soplo discreto de contaminante proveniente de una fuente puede cambiar de dirección al ser influenciado por vientos cambiantes en el tiempo y el espacio.

Por el contrario, los modelos más comúnmente usados asumen condiciones de estado estable; es decir, se asume que la velocidad del viento, la dirección del viento y otras condiciones climatológicas son las mismas en todas partes y constantes a lo largo de un período de tiempo determinado. Dichos modelos no pueden simular con precisión el transporte de contaminantes en áreas donde el viento es diferente en diversas ubicaciones o donde el viento cambia con el tiempo durante el transporte del penacho. El modelo CALPUFF fue desarrollado específicamente para considerar un transporte de largo alcance, donde debe esperarse que las condiciones cambien a lo largo de la ruta y el tiempo de viaje del contaminante, así como para condiciones de menor alcance en las que se sabe que los vientos se ven afectados por características locales del terreno y por rápidos cambios temporales en la meteorología. El área de La Oroya claramente representa este último caso.

Estudios anteriores de contaminación del aire en La Oroya (McVehil-Monnett Associates, 2004) analizaron las condiciones climáticas y los niveles de contaminación del aire en las estaciones de monitoreo del aire de Doe Run Perú en el área de La Oroya. Estos análisis concluyeron que los impactos en la contaminación del aire dependían en gran medida del flujo de aire local que generalmente desciende por los valles de los ríos Mantaro y Yauli en la noche y se invierte para fluir ascendentemente por los valles durante el día. Los mayores impactos en la contaminación del aire normalmente ocurren durante las horas de la mañana, cuando el flujo de aire invierte su dirección en combinación con una fuerte mezcla vertical (causada por el calentamiento solar), lo que hace que contaminantes acumulados en capas superiores del aire desciendan al nivel del suelo. Estas condiciones

rápidamente cambiantes, con vientos que siguen a los valles de ríos serpenteantes, no pueden ser modeladas de manera efectiva con un modelo de estado estable. El modelo CALPUFF representa el modelo más refinado y fácilmente accesible con capacidad de tratar las condiciones en La Oroya.

Existe una serie de requerimientos de información para una aplicación exitosa del CALPUFF. Éstos incluyen información sobre la ubicación y las características de todas las fuentes de contaminación, incluyendo el ritmo al cual emiten contaminantes cada una de ellas, las elevaciones del terreo y las características generales de uso de la tierra en el área que se va a modelar, así como las condiciones meteorológicas. Si bien las fuentes y los parámetros geográficos son relativamente constantes en el tiempo, la meteorología cambia constantemente por lo que es necesario contar con información adecuada para permitir que el modelo represente el campo de vientos cambiante a lo largo del tiempo y los correspondientes parámetros de dispersión atmosférica.

Se usa el procesador meteorológico CALMET para definir una distribución detallada de vientos y temperaturas a lo largo del dominio de modelamiento en intervalos horarios. Las ecuaciones matemáticas en el procesador CALMET se basan en las leyes de la física y definen distribuciones de flujo de aire que son consistentes con los efectos del terreno, las gradientes de la temperatura y los otros procesos físicos que determinan el movimiento y la mezcla del aire. Sin embargo, es necesario conocer las condiciones climáticas a mayor escala y el movimiento general del aire en la región. Por lo tanto, el procesador CALMET requiere información sobre las condiciones meteorológicas reales con sus variaciones en el tiempo en un número suficiente de puntos en el suelo y por encima del suelo para generar campos de vientos que verdaderamente representen la realidad. Cuanto mayor sea la cantidad de mediciones meteorológicas precisas que se pueda suministrar, más precisos serán los campos meteorológicos tridimensionales generados por el procesador CALMET y posteriormente usados en el modelo CALPUFF para estimar las concentraciones de contaminantes. La disponibilidad y el uso de datos de entrada para el procesador CALMET y el modelo CALPUFF se describen en la siguiente sección.

3.0 INFORMACIÓN DISPONIBLE Y LIMITACIONES DE LA INFORMACIÓN

Se requiere varios tipos de información para la aplicación del modelo CALPUFF o de cualquier otro modelo de dispersión atmosférica. En esta sección se discute la información disponible en La Oroya y sus limitaciones.

3.1 Fuentes de Emisiones

El modelo de dispersión descrito en este informe considera emisiones de dióxido de azufre (SO_2), plomo (Pb) y otros metales provenientes del Complejo Metalúrgico. Doe Run Perú ha suministrado toda la información disponible sobre las fuentes y magnitudes de las emisiones de SO_2 y otras emisiones. Las fuentes son de dos tipos: fuentes puntuales (chimeneas) que liberan contaminantes en una corriente gaseosa confinada, y fuentes fugitivas como los tubos de ventilación de los edificios, construcciones abiertas y tráfico vehicular, que emiten contaminantes de una manera menos definida y más irregular. La fuente puntual más importante es la chimenea principal de la fundición, que tiene 167 metros de altura. El flujo de aire y las emisiones de contaminantes provenientes de la chimenea principal son medidos regularmente por Doe Run Perú. Esta información incluye emisiones de SO_2 y MP, así como emisiones de Pb, As y Cd. Así, estas emisiones, si bien son algo variables en el tiempo, generalmente están bien definidas. Por otro lado, las emisiones fugitivas son difíciles de medir y no están bien cuantificadas. Doe Run ha suministrado estimados de las emisiones fugitivas en base a los balances de materiales y la experiencia en otras fundiciones donde se han cuantificado las emisiones. Para el modelamiento, fue necesario usar estas tasas de emisión estimadas y hacer supuestos sobre las ubicaciones y las características de las emisiones en base a la experiencia de ingeniería, el criterio del personal de Doe Run y las aplicaciones de modelamiento en otras instalaciones industriales.

Una complejidad en la caracterización de las emisiones de contaminantes involucra su variación en el tiempo. La tasa real de las emisiones de SO_2 y metales desde una fuente dada, así como las ubicaciones específicas y las características de las emisiones, dependen de las operaciones en curso en la fundición en cualquier momento dado. Para el modelamiento fue necesario caracterizar cada fuente mediante un conjunto constante de parámetros de emisión anualizados, lo que obviamente representa sólo una aproximación general. En el modelo, es posible variar los parámetros de las emisiones a lo largo del tiempo; sin embargo, no se cuenta con información detallada sobre la variación de las emisiones a lo largo del tiempo, por lo que cualquier intento de caracterizar con precisión emisiones pasadas en una base horaria o diaria sería una tarea formidable. La proyección de dichas variaciones en el mundo futuro implica una considerable especulación e incertidumbre. Por lo tanto, no se ha hecho ningún intento por evaluar el impacto de cambios normales en las emisiones en el corto plazo.

Doe Run Perú ha instituido en los últimos años un procedimiento para reducir operaciones específicas en momentos proyectados de altos impactos en la contaminación del aire. El procedimiento involucra la reducción o paralización de operaciones generadoras de contaminación, generalmente en las primeras horas de la mañana, cuando la

dirección del viento y otras condiciones meteorológicas pronostican un potencial de altas concentraciones de contaminantes en La Oroya en las horas siguientes. El efecto que tiene este procedimiento en la reducción de los impactos ha sido confirmado en simulaciones iniciales con modelos. Igualmente puede verse una reducción en los impactos del SO_2 en el invierno durante los últimos años de acuerdo con la información de monitoreo en las estaciones Sindicato y Hotel Inca. La mayoría de los resultados del modelo presentados en este informe no consideran en ninguna medida la reducción de las operaciones durante condiciones meteorológicas específicas. Pero los efectos de las reducciones deliberadas en las operaciones con el fin de reducir los impactos en el ambiente se discutirán más adelante (ver Sección 7.4).

3.2 Información Meteorológica

Idealmente, la información meteorológica para su uso en CALMET/CALPUFF consiste en mediciones horarias de vientos y temperaturas a nivel del suelo en una serie de ubicaciones dentro del dominio del modelo; observaciones meteorológicas generales, como cubierta nubosa y precipitación; e información de sondeo de altura que suministre perfiles verticales de viento y temperatura desde el suelo hasta altitudes por encima del terreno circundante. En La Oroya, se recopila información sobre viento y temperatura superficiales mediante seis estaciones de monitoreo operadas por Doe Run Perú. Ellas suministran información a nivel del suelo en sus ubicaciones entre los ríos Mantaro y Yauli en el área de La Oroya; no se cuenta con información adicional de ubicaciones en terrenos más altos.

Actualmente, las mediciones disponibles de las condiciones meteorológicas por encima del suelo son limitadas. Dicha información es crítica para una definición precisa del flujo general del aire en el extremo superior de la chimenea y en el terreno circundante, así como para la especificación de las inversiones de temperatura por encima del suelo. Durante los últimos meses, Doe Run Perú ha estado obteniendo mediciones de sondeo vertical en La Oroya mediante un sistema de Radar Acústico tipo Doppler. Estas mediciones constituirán un importante recurso de información para futuras aplicaciones de modelos. Desafortunadamente, el sistema todavía no está completamente operativo y no se cuenta con un período extenso de información válida. Por lo tanto, esta información no se podrá utilizar para el actual proceso de modelamiento.

Ante la ausencia de información de altura específica para el lugar, el modelamiento se ha basado en la información de vientos y temperaturas a gran altitud para el Perú que es generada por los modelos de pronóstico climático global del Servicio Nacional de Meteorología de los Estados Unidos. Esta información se basa en sondeos de altura realizados en ubicaciones distribuidas por América del Sur y modelos de pronóstico computarizado. Sin embargo, la resolución espacial de la información pronosticada es baja en sus dimensiones tanto horizontal como vertical, por lo que la información puede suministrar sólo una aproximación suavizada de la estructura real de vientos y temperaturas sobre La Oroya en un momento dado.

La representatividad y la precisión de la información de monitoreo climático superficial en La Oroya no pudo ser verificada para el actual análisis de modelamiento. Las

estadísticas a largo plazo de las estaciones meteorológicas no indican errores obvios. Sin embargo, las calibraciones de los sistemas de monitoreo meteorológico conducidas por Doe Run Perú en abril de 2005 revelaron errores significativos en algunas mediciones de los vientos. No se puede descartar la posible existencia de dichos errores en información proveniente de períodos de monitoreo anteriores.

Las pruebas iniciales con el programa CALMET se centraron en examinar los patrones de vientos superficiales generados por el modelo. Las direcciones de vientos y sus cambios a lo largo del día que se obtuvieron mediante el programa CALMET fueron en general razonables, de acuerdo con la experiencia meteorológica, y coherentes con las mediciones de vientos superficiales. Sin embargo, dado que no se cuenta con información meteorológica en ubicaciones encima de los valles fluviales, no se pudo evaluar la representatividad de las simulaciones de flujos de aire y temperatura por encima del nivel del suelo y en terrenos altos.

3.3 Información sobre Calidad del Aire

Si bien no se requiere información real sobre la calidad del aire para el modelamiento, ésta es esencial para la evaluación del desempeño del modelo. Doe Run Perú ha suministrado información meteorológica así como información del monitoreo de SO_2, material particulado y metales de las estaciones Sindicato, Hotel Inca, Cushurupampa, Huanchán y Casaracra, así como información meteorológica de la estación Fundición para el período 2001 a 2004. La información sobre calidad del aire se ha usado tanto en el análisis del modelamiento como en estudios de riesgos para caracterizar los impactos y tendencias actuales de la contaminación del aire. Esta información es un recurso valioso para las actuales evaluaciones y para los futuros análisis. La información meteorológica y sobre calidad del aire obtenida de los monitores de Doe Run Perú se incluye en un disco compacto (CD) en el apéndice C del presente informe.

Las mediciones de la concentración horaria de SO_2 y las mediciones cada tres días de la concentración de 24 horas de metales en las estaciones de monitoreo de Doe Run Perú se usaron para su comparación con las predicciones del modelo. La información meteorológica y de emisiones del año 2002 se usó para modelar las condiciones del "caso base" y la información de monitoreo del mismo año se usó para la evaluación del modelo. Se seleccionó el año 2002 para representar las condiciones de emisión y calidad del aire durante el pasado reciente y antes de la mayoría de los proyectos programados para el control de la contaminación. Análisis anteriores de la base de datos de monitoreo de la calidad del aire en el 2002 encontraron que en términos generales la información estaba completa y parecía ser de alta calidad.

Los monitores de SO_2 operados por Doe Run Perú registran concentraciones de SO_2 en partes por millón (ppm) en volumen. La fracción volumétrica del contaminante gaseoso es una medición absoluta que no depende de las condiciones de temperatura ni presión durante la medición. Para adecuarse a la práctica estándar, las fracciones volumétricas medidas han sido convertidas a unidades de masa por unidad de volumen (microgramos por metro cúbico o $\mu g/m^3$) para su reporte a partir del 2003. La conversión depende de la

temperatura y la presión asumidas para la presentación de la información sobre concentración. La conversión realizada por Doe Run Perú es a acondiciones normales de cero grados centígrados y una presión de una atmósfera.

El material particulado, el plomo y otros metales se miden en La Oroya directamente como masa por unidad de volumen. Los instrumentos están calibrados en términos de volumen a la temperatura y presión de referencia señaladas líneas arriba.

Por lo tanto, las concentraciones de contaminantes reportadas de La Oroya se expresan en µg/m3 a condiciones normales. Por el contrario, los modelos de calidad del aire calculan las concentraciones en µg/m3 a las condiciones de presión y temperatura del lugar. En consecuencia, todos los resultados presentados en este informe están expresados en unidades de µg/m3 en las condiciones del lugar. Con el fin de comparar los resultados del modelo con la información de monitoreo, los datos de monitoreo se convirtieron a las condiciones del lugar, asumiendo una temperatura promedio en el lugar de 10 grados centígrados y una presión de 635 mb (475 mm de mercurio). El factor de conversión es:

Concentración ($\mu g/m^3$ en las condiciones del lugar) = Concentración reportada ($\mu g/m^3$ en las condiciones de referencia) x 0.605

Para los datos de concentración de SO_2 antes del 2003, el factor de conversión es:

Concentración ($\mu g/m^3$ en las condiciones del lugar) = Concentración reportada (ppb) x 1.730

Existe una seria limitación en la información disponible sobre monitoreo de SO_2. Todos los monitores regulares de SO_2 en el sistema tienen un límite máximo de concentración de SO_2 de aproximadamente 2100 partes por mil millones (ppmm) o 6000 microgramos por metro cúbico ($\mu g/m^3$) a condiciones normales. Al revisar los resultados del monitoreo queda claro que frecuentemente ocurren en algunas estaciones concentraciones significativamente mayores a 6000 $\mu g/m^3$; esto se nota por la gran cantidad de horas con concentraciones de 6000 $\mu g/m^3$ registradas. Un monitor complementario instalado en la estación Sindicato en el 2004 no tiene el límite de 6000 $\mu g/m^3$ y ha registrado concentraciones horarias pico en el rango de 20,000 $\mu g/m^3$. Por lo tanto, debe asumirse que la información histórica sobre concentración promedio y concentración máxima está sesgada debido a la incapacidad para registrar las concentraciones más altas. Se desconoce los posibles efectos de la saturación del monitor en mediciones posteriores. Esta limitación en el registro de datos de SO_2 existentes debe reconocerse al interpretar los resultados del modelo y al evaluar los impactos del SO_2 en el ambiente en La Oroya.

4.0 EXPECTATIVAS DEL MODELO

El modelamiento de la calidad del aire no es una ciencia exacta y los resultados de este modelamiento no pueden aceptarse como un sustituto de la información de monitoreo a largo plazo. Sin embargo, los modelos han demostrado ser muy útiles para estimar la magnitud y variabilidad de los impactos en la contaminación del aire y para predecir los cambios en los impactos como resultado de cambios en las emisiones.

Los modelos por lo general no son confiables para pronosticar la concentración en un receptor específico durante una hora específica. Ello se debe a que pequeños errores en la especificación de la dirección del viento u otras variables pueden generar grandes errores en la concentración pronosticada. Los modelos son más útiles para pronosticar la concentración máxima que se producirá durante un período de tiempo y las concentraciones promedio durante períodos que van desde 24 horas hasta un año. Por lo tanto, las medidas usadas generalmente para el desempeño de un modelo definen el sesgo y error promedio al pronosticar estas cantidades. Una guía general es que los modelos que pronostican concentraciones máximas a corto plazo dentro de un factor de dos son considerados aceptables para su uso en aspectos de regulación.

Dadas las limitaciones en cuanto a la información meteorológica, de emisiones y de monitoreo que se han descrito en la sección anterior, no se puede esperar un alto nivel de precisión de la aplicación inicial del modelo en La Oroya. La complejidad del terreno de La Oroya y la complejidad resultante en las condiciones meteorológicas también hacen que la aplicación exitosa de un modelo sea difícil. Debido a estos factores, se consideró que los objetivos del presente modelamiento deben ser:

- representar la magnitud general de las concentraciones promedio de SO_2 y metales sin un sesgo significativo;
- suministrar estimados de los impactos máximos que sean consistentes con la información de monitoreo disponible;
- representar las variaciones diurnas, geográficas y estacionales de los impactos de una manera consistente con las observaciones.

Se cree que un modelo que satisfaga estos objetivos podría ser considerado como un modelo que tome en cuenta, en términos generales, las principales variables que determinan los impactos en la calidad del aire en el área de La Oroya y que suministre una simulación realista del transporte atmosférico y de la dispersión. Por lo tanto, podría esperarse que brinde una indicación válida del cambio en los impactos como resultado de los futuros controles de la contaminación. Dado que en el futuro existirá información adicional, además de mayor experiencia en la aplicación del modelo, es razonable esperar que en los años futuros se obtengan resultados más refinados del modelo.

5.0 METODOLOGÍA DE APLICACIÓN DEL MODELO

5.1 Modelo Meteorológico CALMET

El paso inicial del proceso de modelamiento fue el desarrollo de campos meteorológicos detallados en tres dimensiones. Se usó el programa CALMET, versión 5.53a, nivel 040716, para producir el campo de vientos de La Oroya en el 2002. Los datos de entrada para el programa CALMET varían de un caso a otro de acuerdo con la disponibilidad de información, pero generalmente incluyen datos de prognosis, superficie, altura y precipitación. Éstos se yuxtaponen sobre un dominio de modelamiento definido y el resultado es un archivo meteorológico tridimensional que se usa dentro del modelo CALPUFF. Debido a la ubicación de La Oroya y la falta de algunos datos que generalmente están disponibles en América del Norte, ha sido necesario estimar algunas variables. A continuación se presenta una lista de las fuentes de información utilizadas en el modelo CALMET en La Oroya.

Dominio de Modelamiento: Se creó una cuadrícula de 180 x 180 celdas centrada sobre el Complejo de La Oroya. Cada celda de la cuadrícula tiene una dimensión horizontal de 100 metros; por lo tanto, el área total del modelo es un cuadrado de 18 km x 18 km con centro en La Oroya. Fue necesario un espaciamiento ajustado debido a las grandes variaciones en el terreno dentro del área de modelamiento. Las características del dominio se definen dentro de un archivo de entrada e incluyen (por celda de la cuadrícula) una categoría de uso de la tierra (con parámetros asociados como aspereza de la superficie, albedo, ratio Bowen, etc.) y altitud. No se pudo ubicar categorías adecuadas de uso de la tierra en el Perú, por lo que éstas tuvieron que ser estimadas. A las celdas de la cuadrícula ubicadas dentro de la cercanía general y al oeste de la fundición y que estaban a por debajo de 3875 m (en el valle) se les asignó una categoría urbana de uso de la tierra. A todas las otras celdas de la cuadrícula se les asignó parámetros de uso de la tierra correspondientes a “tierras eriazas”.

Las altitudes de las celdas se asignaron usando datos SRTM –datos del terreno recopilados durante una misión de un transbordador espacial hace unos cuantos años. El espaciamiento horizontal de los datos SRTM es aproximadamente 90 metros y por lo tanto cada celda de la cuadrícula contenía por lo menos un punto de información.

Datos de Pronóstico: Generalmente, se utilizan datos de pronóstico meteorológico computarizado para brindar la mejor información meteorológica estimada en intervalos horarios entre las horas de observación estándar mediante sondaje de altura. No se pudo obtener ningún dato de pronóstico horaria (MM5/ETA/RUC) para el área, por lo que no se usó ninguna información de pronóstico.

Datos de Superficie: Los datos meteorológicos de las estaciones de monitoreo Fundición, Casaracra, Cushurupampa, Huanchán, Hotel Inca y Sindicato se usaron para correr el programa CALMET. Se utilizó dirección del viento, velocidad del viento, temperatura y humedad relativa de todas las estaciones superficiales. La estación Fundición tenía

parámetros adicionales, por lo que a su lista de variables se añadió la presión barométrica y la presencia/ausencia de precipitación.

Dos parámetros necesarios no estaban disponibles en ninguna de las seis estaciones: cubierta nubosa y altura del techo. Éstos se estimaron después de revisar resúmenes meteorológicos para el área general. En verano (dic-abr) la cubierta nubosa se estimó en 2/10s y el techo se consideró ilimitado. En invierno (may-nov) se asumió una cubierta nubosa de 9/10s y una altura de techo de 3000 pies.

No se incluyó datos sobre precipitación. En base a anteriores experiencias con modelos en otros lugares, no se espera que la precipitación tenga un efecto significativo en las concentraciones de contaminación del aire ambiental ni en la deposición total de metales en La Oroya.

Datos de Altura: Se contó con información irregular de radiosonda para Lima, pero la información tenía muchos datos faltantes para horas/días/semanas y por consiguiente fue considerada inadecuada. En su lugar se generó un sondeo de altura a través de análisis de seis horas de Global Final (FNL), preparados a partir observaciones de altura a nivel mundial por el Centro de Predicción Numérica de los Estados Unidos. Los análisis FNL cubren el globo con nodos espaciados 1.0 x 1.0 grados y son accesibles por Internet. Se eligió el punto con información que estaba más cerca del área de La Oroya. Los análisis de 6 horas incluyen niveles de superficie, 700 mb, 500 mb y 400 mb, con valores de velocidad del viento, dirección del viento, temperatura y altura sobre el nivel del mar para cada celda y nivel de presión. Los valores puntuales se ingresaron en el programa CALMET, el cual genera perfiles verticales de viento y temperatura para cada celda de la cuadrícula CALMET mediante interpolación espacial y temporal.

5.2 Modelo de Dispersión CALPUFF

Se utilizó el modelo CALPUFF, versión 5.711A, para todos los cálculos de concentración y deposición. Muchas de las variables de entrada en CALPUFF dependen del dominio de cálculo, período de tiempo y contaminante que se está modelando. Las entradas generalmente se seleccionaron en concordancia con las recomendaciones de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos para el modelamiento con fines reglamentarios. Cuando no se contaba con valores específicos para el lugar se usaron las selecciones “predeterminadas” dentro del modelo. Entre las opciones de entrada significativas, se especificaron las siguientes:

- Distribución vertical de contaminantes – Gaussiana
- Ajuste del terreno – ruta de penacho parcial
- Elevación del penacho transicional
- Stack-tip downwash (modificación de la altura del penacho por efecto de la chimenea)
- Tasas de transformación Mesopuff II
- Deposición seca
- No deposición húmeda (lavado por precipitación)

- Coeficientes de dispersión rural PG
  Coeficientes de dispersión urbana MP
- Penetración parcial del penacho por inversiones
- Parámetros químicos predeterminados para deposición de SO2
- Parámetros de tamaño específicos del lugar para la deposición de plomo (estimados a partir de datos sobre tamaños genéricos de partículas de fundición en la literatura)

5.3 Datos de Emisiones

De los registros de Doe Run Perú se obtuvieron mediciones diarias de las emisiones y los parámetros del flujo de gas de la chimenea principal. En base a estos datos, se definieron los parámetros anuales promedio del 2002 para el modelamiento. Los parámetros del modelo fueron:

Tasa de Emisión de SO_2	=	907.2 TM/día
Tasa de Emisión de Plomo	=	1.8 TM/día
Altura de la Chimenea	=	167.75 m
Diámetro de la Chimenea	=	12.0 m
Temperatura del Gas de la Chimenea	=	77º C
Velocidad de Salida del Gas de la Chimenea	=	7.5 m/s

Se realizaron amplias discusiones con el personal de ingeniería de Doe Run en La Oroya y en Estados Unidos con el fin de identificar y caracterizar las fuentes de emisiones fugitivas y sus tasas de emisión estimadas. Personal de MMA visitó el Complejo con el fin de obtener información sobre los tipos, dimensiones y otras características de los puntos de emisiones fugitivas. Sobre la base de toda la información disponible, la experiencia de Doe Run y el criterio profesional, se especificaron las tasas de emisión promedio del 2002 para las principales fuentes de SO_2 y Pb en el Complejo. Éstas se muestran en la Tabla 5-1.

Además de la chimenea principal, se definieron parámetros de emisión de SO_2 para los tubos de ventilación del techo en el tostador de cobre, el pasillo de convertidores de cobre y el horno reverbero, así como para las aberturas de baja altura en las mismas instalaciones. En el caso del plomo, las principales fuentes incluyeron la chimenea principal, los lavadores de gas en la planta de aglomeración, los tubos de ventilación del techo en el tostador de cobre, el pasillo de convertidores, el alto horno y la planta de dross, así como fuentes fugitivas de la planta de aglomeración. Todas esas fuentes fueron representadas en el modelo con dimensiones y alturas por encima del suelo apropiadas según se determinó a partir de la visita al lugar y de los planos de los edificios (JUSA Juan De Dios S.A., 2005).

5.4 Pruebas Iniciales

Las pruebas iniciales del modelo se realizaron corriendo el modelo con ubicaciones receptoras en los lugares con monitores, de manera individual, en meses determinados durante el año 2002. Los resultados del modelo se compararon con los valores registrados

para las concentraciones horarias, diarias y mensuales de SO_2 y las concentraciones mensuales promedio de plomo.

Las pruebas iniciales indicaron resultados del modelo con una magnitud generalmente razonable y variaciones horarias que claramente reflejaban los episodios de concentración alta observados en las horas de la mañana de 9 a.m. al mediodía. Las concentraciones máximas pronosticadas excedían con frecuencia las mediciones durante estas horas de la mañana, tal como era de esperarse debido al límite de 6000 $\mu g/m^3$ de los monitores. También fue evidente una alentadora correspondencia entre las concentraciones pronosticadas y observadas en horas y monitores específicos en muchos días. Sin embargo, existieron obvias discrepancias en otras horas/días y mejores resultados en algunas ubicaciones con monitores que en otras.

Pruebas posteriores se centraron en definir las contribuciones de fuentes individuales y probar la sensibilidad de los resultados ante variaciones en los parámetros que no están bien definidos, es decir las tasas de emisión y las dimensiones de las fuentes fugitivas, la flotabilidad de los gases emitidos desde los tubos de ventilación de los techos y el método usado por el programa CALMET para estimar los vientos por encima del nivel del suelo. Se encontró que los resultados eran bastante sensibles a algunas de estas variables, pero las mejoras en el desempeño del modelo en un mes o en un monitor frecuentemente eran contrarrestadas por resultados más deficientes en otro período o en otra ubicación.

Se estableció un grupo final de parámetros en base a los resultados de las pruebas de sensibilidad. Es importante enfatizar que los parámetros finales siempre se seleccionaron dándole el peso principal a los valores que se consideraban más realistas en base a la información disponible y a los estimados de Doe Run Perú. Los estimados iniciales se modificaron sólo cuando dicha modificación era consistente con la información disponible y claramente ofrecía resultados del modelo más realistas. En ningún caso se cambió arbitrariamente un dato de entrada para "afinar" el modelo y mejorar las predicciones si no existía suficiente base científica para dicha modificación. Los cambios principales realizados a los parámetros iniciales del modelo fueron:

- incrementar la influencia de los vientos de altura respecto a los vientos a nivel del suelo en el caso de alturas por encima del piso;
- incrementar las dimensiones iniciales de fuentes fugitivas de edificios para considerar la dispersión dentro del complejo de la planta;
- incrementar la proporción de las emisiones de los tubos de ventilación en los techos respecto a las fuentes fugitivas a nivel del suelo;
- incrementar la flotabilidad (temperatura) de los gases emitidos por los tubos de ventilación en los techos.

Todos estos cambios se consideraron razonables en base a nuestro entendimiento de las operaciones del Complejo. Es probable que en el futuro se puedan realizar mejoras adicionales en el modelo de contarse con mejor información meteorológica y de emisiones. Pero se concluyó que no era posible lograr una mejora significativa en el desempeño del

modelo actual dentro de las limitaciones de información, cronograma y presupuesto vigentes.

Tabla 5-1. Tasas de Emisión Modeladas para el Complejo La Oroya

Fuente	Emisiones de SO_2		Emisiones de Plomo	
	TM/día	g/s	TM/día	g/s
Chimenea Principal	907.2	10,500	1.80	20.80
Lavadores de Gases - Planta de Aglomeración	0	0	0.32	3.68
Planta de Tostación de Cobre				
Tubos de Ventilación en los Techos	34.56	400	0.16	1.90
Fuentes Fugitivas de Edificios	3.11	36	0	0
Corredor de Convertidores de Cobre				
Tubos de Ventilación en los Techos	43.20	500	0.11	1.27
Fuentes Fugitivas de Edificios	4.67	54	0	0
Planta de Reverbero				
Tubos de Ventilación en los Techos	8.64	100	0	0
Fuentes Fugitivas de Edificios	0.86	10	0	0
Planta de Aglomeración de Plomo				
Fuentes Fugitivas de Edificios	0	0	0.08	0.95
Alto Horno				
Tubos de Ventilación en los Techos	0	0	0.16	1.90
Planta de Dross				
Tubos de Ventilación en los Techos	0	0	0.11	1.27

6.0 DESEMPEÑO DEL MODELO

El modelo CALPUFF se aplicó usando información meteorológica y de emisiones del Complejo para el 2002 tal como se presentó en la Sección 5.0. En esta sección, las predicciones del modelo sobre concentraciones de SO_2 y plomo se comparan con las concentraciones medidas en las estaciones de monitoreo de Doe Run Perú. Se evalúa el desempeño general del modelo y se resumen las conclusiones sobre la precisión del modelo.

6.1 Observaciones Generales

El primer objetivo del modelamiento, tal como se estableció en la Sección 4.0 era que los resultados del modelo fueran de la magnitud general de las concentraciones observadas. La siguiente tabla muestra las concentraciones promedio pronosticadas para las cuatro estaciones de monitoreo Sindicato, Hotel Inca, Cushurupampa, y Huanchán, en comparación con las concentraciones medidas. No se incluyó la estación de monitoreo Casaracra pues está lejos de La Oroya y las concentraciones medidas son mucho menores que las de los otros cuatro monitores.

Tabla 6-1. Concentraciones Anuales Pronosticadas y Medidas en el 2002
(Promediadas de Cuatro Ubicaciones de Monitoreo)

	Pronosticadas	Observadas
Concentración Promedio de SO_2 ($\mu g/m^3$)	393	371
Concentración Promedio de Plomo ($\mu g/m^3$)	2.51	1.55

La Tabla 6-1 indica que en general las concentraciones medias de SO_2 están muy cerca de las concentraciones promedio indicadas por la información de monitoreo del área de La Oroya. Como se verá, la buena concordancia es en cierta medida fortuita, resultante de una sobreestimación en algunos casos y de una subestimación en otros. Las concentraciones de plomo parecen estar sobreestimadas. Sin embargo, la magnitud de los impactos promedio pronosticados en el área sugiere que las tasas de emisión y las configuraciones de fuentes del modelo son razonables y que el modelo es capaz de pronosticar concentraciones a largo plazo que generalmente son representativas de los valores observados.

6.2 Variaciones en la Ubicación y Tiempo Promedio

Los otros objetivos de la aplicación del modelo eran simular la variación temporal y espacial observada en los impactos y estimar las concentraciones máximas esperadas. Aquí se resume el desempeño del modelo en cuanto al cumplimiento de estos objetivos.

Las ejecuciones del modelo CALMET y CALPUFF son extremadamente intensivas en cuanto al uso de computadoras, requiriendo desde algunas horas hasta 20 horas de tiempo de ejecución en los equipos PC más rápidos de la actualidad para procesar un solo mes de cálculos meteorológicos o de dispersión. Además, cualquier dato faltante o entrada anormal puede dar como resultado la terminación de la simulación del modelo antes de que esté completa. Como resultado de estas limitaciones, además del número de diferentes escenarios de emisión y áreas receptoras que se debían modelar, resultó imposible modelar un año completo de datos meteorológicos para todas las pruebas del modelo y las predicciones finales del modelo. Todos los resultados presentados en este informe se derivaron del modelamiento de cuatro meses de condiciones meteorológicas del 2002, uno en cada estación del año: marzo, junio, setiembre y diciembre.

La revisión de los datos de monitoreo y los resultados del modelo indica que pueden existir variaciones significativas en el impacto entre un mes y otro y entre un año y otro en el mismo mes. Estas variaciones probablemente se deban a diferencias reales en las condiciones meteorológicas generales y, en el caso de información proveniente del monitoreo, a variaciones en las operaciones del Complejo Metalúrgico. En base a la información disponible sobre monitoreo entre el 2000 y el 2004, los cuatro meses modelados en el 2002 no fueron atípicos respecto a los mismos meses en otros años ni respecto a otros meses en el mismo año. Sin embargo, debe reconocerse que las estadísticas "anuales" presentadas en este informe son promedios de los cuatro meses modelados, tanto en el caso del modelo como en el caso del monitoreo. Es claro que sería aconsejable modelar un año completo de condiciones meteorológicas o incluso múltiples años cuando se cuente con información adecuada y tiempo.

La Tabla 6-2 muestra una comparación entre las estadísticas de concentración del modelo para el 2002 y la información de monitoreo proveniente de las cuatro estaciones de monitoreo en La Oroya. La Tabla 6-2 indica que:

- Los resultados para las estaciones Sindicato y Hotel Inca muestran en general una buena concordancia con los resultados del monitoreo en el caso del SO_2 y una ligera sobreestimación en el caso del plomo.

- Los resultados del modelo sobreestiman los impactos en Cushurupampa en un factor de tres o más en el caso del promedio y en menor medida en el caso del valor máximo a corto plazo.

- Los resultados de Huanchán parecen ser significativamente subestimados en el caso del SO_2, pero realistas en el caso del plomo.

- Se indica que las mayores concentraciones de una hora de SO_2 están en el rango de 12,000 a 18,000 $\mu g/m^3$. Esto no se puede ser confirmado por la información de monitoreo disponible, pero parece consistente con la limitada información disponible del monitor de la estación Sindicato que no tiene un límite superior.

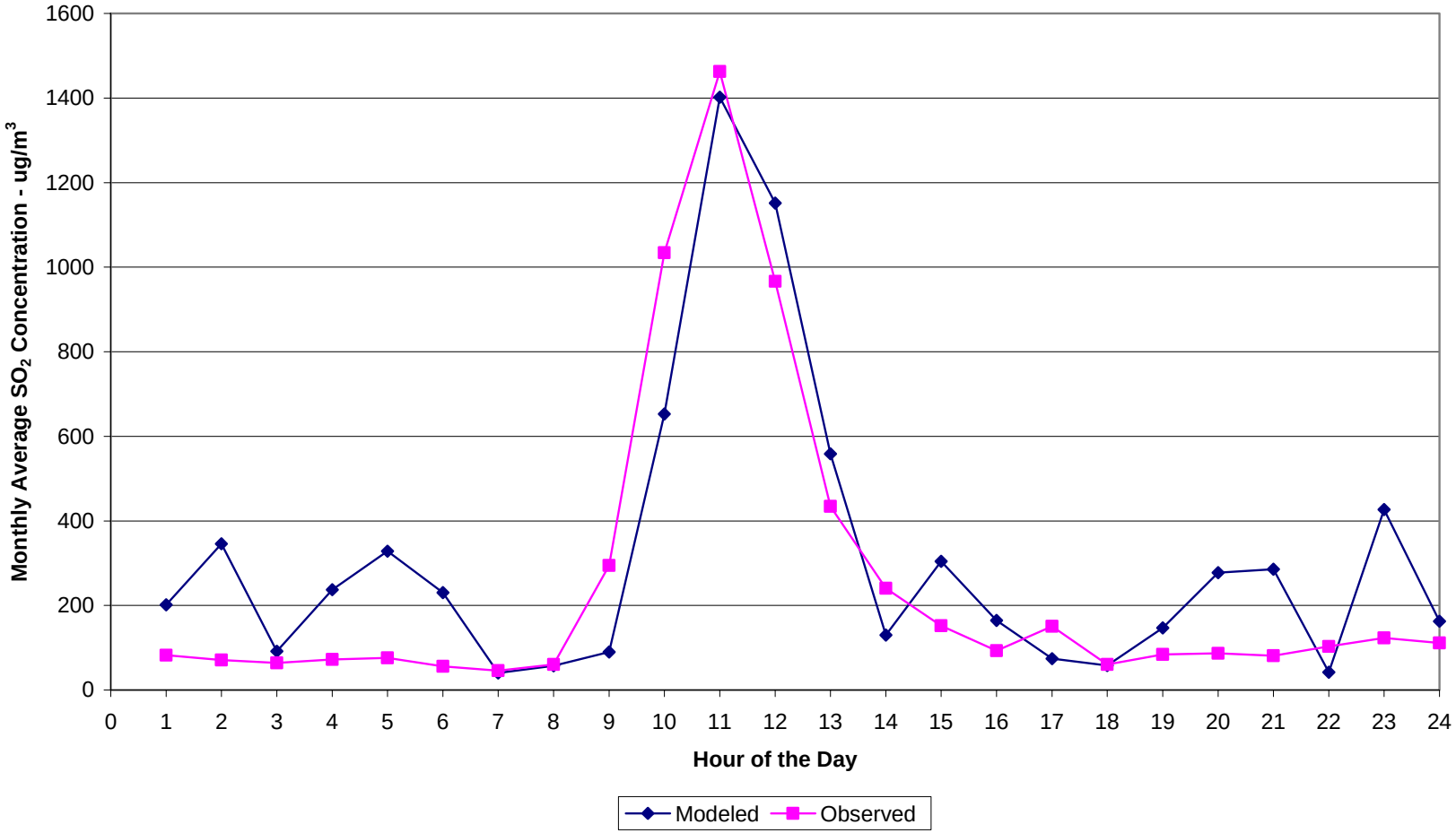
La representación de las variaciones horarias en el impacto del SO_2 pronosticado por el modelo reproduce bastante bien los cambios observados. La Figura 6-1 muestra las concentraciones horarias promedio para el mes de marzo en la estación Sindicato. Si bien las predicciones del modelo son mayores que los valores observados en la noche, el momento y la magnitud de las concentraciones pico durante la mañana están representados con precisión. La Figura 6-1 es típica de los resultados de otras estaciones y en otros meses. En Cushurupampa y Huanchán, las concentraciones pico son sobreestimadas y subestimadas, respectivamente, pero el momento y la ocurrencia de los episodios matutinos se representan adecuadamente.

Tabla 6-2. Comparación de los Resultados del Modelo para el 2002 con la Información de Monitoreo (todas las unidades son microgramos/m^3 a las Condiciones del Lugar)

	Sindicato		Hotel Inca		Cushurupampa		Huanchán	
	Modelo	Medición	Modelo	Medición	Modelo	Medición	Modelo	Medición
Dióxido de Azufre								
Promedio Anual	357	275	247	249	622	211	347	749
Segundo Mayor Valor Promedio de 24 horas	1482	1564	1402	1462	1556	1349	1337	2713
Segundo Mayor Valor Promedio de 1 hora	17,700	12,689*	12,082	>3,600	18,874	>3,600	15,395	>3,600
Plomo								
Promedio Anual	2.25	1.67	1.24	0.82	3.24	0.61	3.33	3.09
Promedio Mensual Valor Máximo	3.81	2.78	1.56	1.34	4.39	1.03	4.33	4.23

* Máxima concentración de una hora a principios del 2005 en el monitor de la estación Sindicato sin límite superior en la medición.

Figure 6-1
Hotel Inca - March 2002
Monthly Mean SO_2 Concentrations



La Figura 6-2 es un ejemplo de concentraciones diarias de 24 horas pronosticadas por el modelo para el mes de diciembre en la estación Sindicato. Obviamente existen algunos días con error significativo del modelo. Pero los cálculos del modelo indican correctamente mayores concentraciones el 5, 6 y del 15 al 21 de diciembre y períodos de bajo concentración del 7 al 13 y del 22 al 24 y a fines de mes.

En general, el modelo demuestra capacidad para identificar los días con elevados impactos en la calidad del aire. Sin embargo, existen algunos días, particularmente en Cushurupampa y también durante las horas de la noche en otros lugares, en los que se pronostican elevados impactos de SO_2 pero las observaciones indican bajas concentraciones. Por el contrario, el modelo no indica ningún impacto en numerosas horas durante las cuales los monitores registraron un nivel de referencia general de 20 a 100 $\mu g/m^3$. Por lo tanto, el modelo tiene un mejor desempeño en la reproducción de impactos promedio y el ciclo diurno normal de las concentraciones que en la reproducción de las concentraciones observadas en horas o días específicos.

No queda claro si el modelo reproduce adecuadamente las diferencias estacionales en el impacto en la calidad del aire. Dado que se modeló sólo un mes de cada estación, no se puede asumir que dichos meses específicos del 2002 fueran representativos de sus respectivas estaciones. De igual manera, dado que Doe Run Perú implementa su programa de "control complementario" (reducciones en las primeras horas de la mañana) durante los meses de invierno, la información del monitoreo no refleja emisiones iguales para todas las estaciones.

El registro de monitoreo efectivo para el período 2000 a 2004 es ambiguo con respecto a variaciones estacionales. En la mayoría de estaciones de monitoreo, tanto las concentraciones de SO_2 como las de Pb han sido más altas en verano que en invierno durante dicho período. Sólo en Huanchán existe un máximo obvio en invierno en cuanto a impactos medidos. Dado que la larga experiencia de Doe Run Perú indica que el invierno es la época con menor dispersión, las recientes tendencias de monitoreo indican que el programa de control complementario ha sido eficaz en mitigar los impactos durante el invierno.

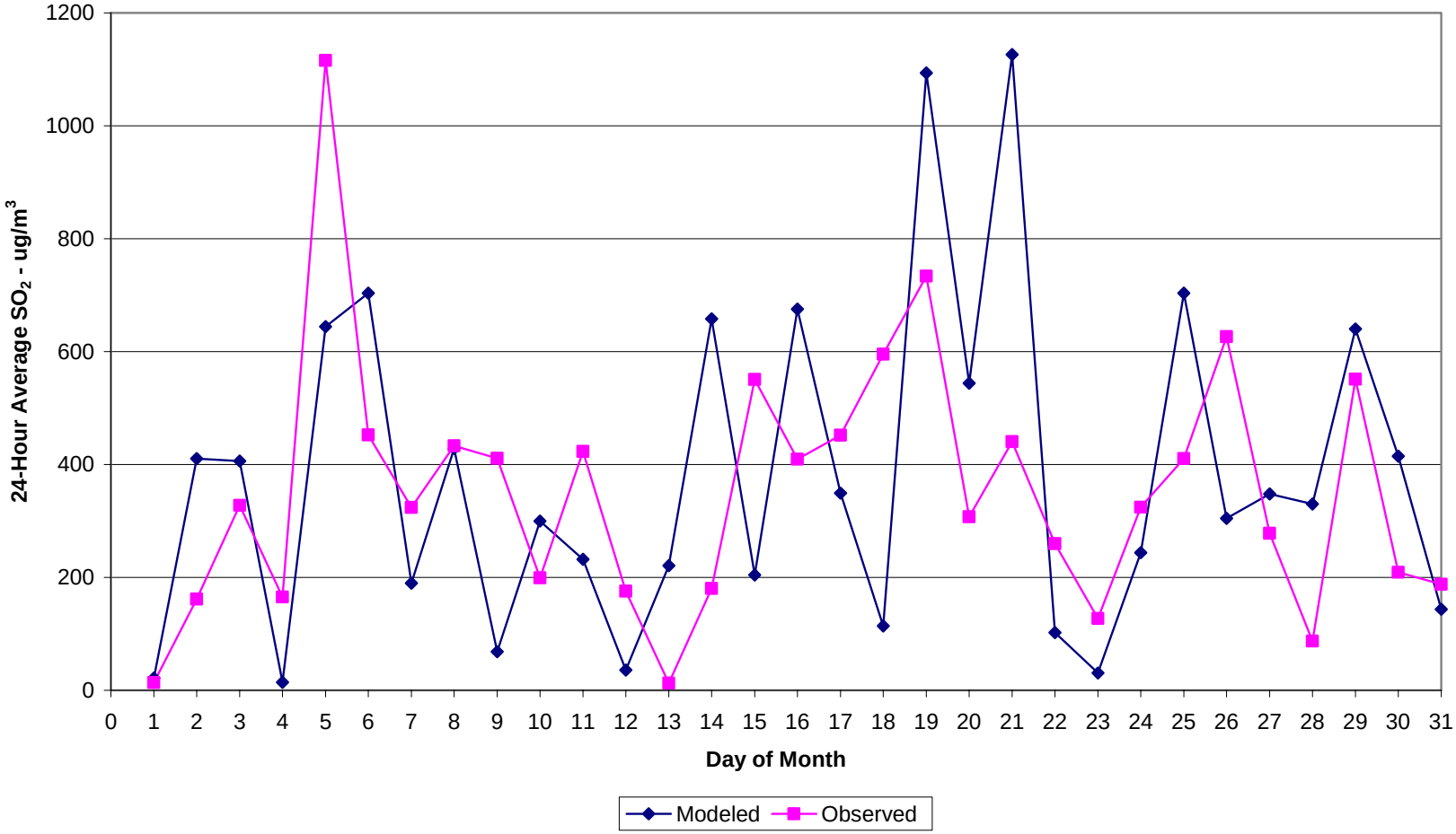
Los resultados del modelo para los cuatro meses no sugieren ninguna tendencia estacional clara o general. Debido a los factores mencionados, no se puede sacar ninguna conclusión sobre la capacidad del modelo para reflejar tendencias estacionales del impacto en la calidad del aire.

6.3 Conclusiones sobre el Desempeño del Modelo

El modelo CALMET/CALPUFF aplicado al Complejo Metalúrgico parece representar razonablemente la magnitud general de los impactos en la calidad del aire observados y reproducir con precisión el típico valor máximo de las concentraciones de SO_2 en las mañanas. El modelo brinda estimados de concentraciones mensuales de plomo que son algo mayores que las concentraciones medidas; los estimados de impactos

máximos de 1 hora y de 24 horas en el caso del SO_2 concuerdan adecuadamente con la información proveniente de la observación. Los resultados del modelo son particularmente representativos en las estaciones de monitoreo Sindicato y

Figure 6-2
Sindicato - December 2002
Daily Mean SO_2 Concentrations



Hotel Inca. Sin embargo, existen algunos errores sistemáticos en las predicciones del modelo. Las principales diferencias entre los impactos pronosticados y los observados son:

- Las concentraciones son significativamente sobreestimadas en Cushurupampa;

- Las concentraciones de SO_2 son frecuentemente subestimadas en Huanchán;

- Las predicciones nocturnas de SO_2 con frecuencia indican una concentración relativamente alta y durante el resto del tiempo muestran una concentración cercana a cero. Por el contrario, la mayoría de monitores registran una nivel de referencia de SO_2 bastante uniforme y persistente en la noche, con pocas concentraciones elevadas (excepto en Huanchán);

- Si bien el modelo pronostica en muchos días los períodos matutinos de máximo impacto de SO_2, la frecuencia de ocurrencia de estos valores máximos pronosticados está por debajo de la frecuencia observada.

- Las concentraciones de plomo se sobreestiman en todos los lugares pero de manera más significativa en Cushurupampa y de manera menos significativa en Huanchán.

La razón de estos errores no puede determinarse definitivamente en este momento. Pero en base a la experiencia meteorológica y de modelamiento, así como en base a las características aparentes de dispersión en La Oroya, es posible sugerir algunas hipótesis razonables.

Parece que la información meteorológica del modelo no captura la intensidad real y la persistencia de las fuertes inversiones de temperatura a bajo nivel que existen en los valles del Mantaro y del Yauli. Esta falla sería resultado natural de la ausencia de información específica para los lugares sobre temperaturas por encima del suelo. El uso de la única información disponible (estimados generales de temperatura en el área para alturas de 1000 metros o más por encima de valle) tenderá a suavizar los gradientes bruscos de temperatura, haciendo imposible identificar inversiones a baja altitud. El resultado de no describir adecuadamente las fuertes inversiones nocturnas sería un incremento en la mezcla de contaminantes elevados a nivel del suelo en la noche, con la consiguiente sobrestimación de los impactos de SO_2 y plomo y menos episodios matutinos de alta concentración debido a la ruptura de la inversión.

De ser correcta, esta hipótesis podría explicar las sobreestimaciones en Cushurupampa durante las horas del final de la tarde y la noche, cuando se esperaría el flujo de drenaje valle abajo, pero el modelo indica un transporte relativamente frecuente de emisiones del Complejo valle arriba del Yauli hacia el monitor. De manera similar, la subestimación de SO_2 en Huanchán parece reflejar un insuficiente atrapamiento de emisiones de la fundición en el valle del Mantaro. Finalmente, los niveles de referencia de SO_2 observados en los monitores sugieren una deficiente ventilación con recirculación

de contaminantes arriba y abajo de los valles, mientras que los resultados del modelo son más indicativos de episodios de contaminación esporádicos con una ventilación relativamente buena en otros momentos.

Con respecto a los resultados de la concentración de plomo, se dan las mismas tendencias entre los lugares con monitor que se dan en el caso del SO_2, pero el plomo es sobreestimado en comparación con el SO_2 en todos los lugares. Este resultado sugiere que las emisiones de plomo estimadas de fuentes fugitivas del Complejo pueden ser demasiado altas.

Existen otras dos fuentes potenciales de diferencias entre las concentraciones pronosticadas y observadas que se deben tener en cuenta. Las variaciones en las operaciones en la Fundición y la estrategia de control complementario de Doe Run Perú aparentemente dan como resultado diferencias en las concentraciones monitoreadas respecto a lo que podría ocurrir con las emisiones uniformes durante las 24 horas del día. Estas prácticas operativas tienen a reducir los impactos en La Oroya y río arriba en comparación con los impactos en Huanchán.

Finalmente, es posible que la información meteorológica de Cushurupampa y otros lugares no sea plenamente representativa de las condiciones en los valles del Mantaro y del Yauli. La estación de monitoreo de Cushurupampa está a una elevación aproximadamente 75 m mayor que el piso del valle. La distribución de vientos medida en el 2002 no indica el flujo de aire hacia arriba y abajo del valle sino que incluye muchas horas, incluso de noche, con flujo desde el noreste (la dirección del Complejo Metalúrgico). Esta distribución inesperada en el monitor de Cushurupampa es, por lo menos, parcialmente responsable de las altas concentraciones pronosticadas por el modelo allí y no parece consistente con las mediciones de calidad del aire. Si errores de medición o alguna condición local excepcional causaran que la distribución de vientos de Cushurupampa difiera de los vientos predominantes en el valle del Yauli, se esperaría que los resultados del modelo fueran deficientes en dicha área. La calibración del sistema de monitoreo en el 2005 reveló un error en la información sobre dirección del viento en Cushurupampa y es posible que la información del 2002 también haya sido errónea.

En resumen, los resultados del modelo satisfacen la mayoría, pero no la totalidad, de los objetivos señalados en la Sección 4.0. Debido a que las predicciones del modelo generalmente son representativas de los impactos promedio y máximo observados, se espera que el modelo pronostique de una manera realista los cambios en los impactos debido a cambios en las emisiones. Por lo tanto, los resultados son apropiados para efectos de un estudio de riesgos. Los resultados del modelo deben ser considerados conservadores, en la medida que suministran estimados razonables pero altos de los impactos máximos (excepto en el caso del SO_2 en Huanchán). Los impactos a largo plazo (anuales) por lo general son sobreestimados. Los resultados del modelo en el caso de Cushurupampa son los más conservadores, pues ellos muestran la mayor sobreestimación. Los resultados del modelo para el área de La Oroya Antigua muestran mucha mejor correspondencia con los resultados del monitor cercano y parecen brindar estimados razonables de los impactos reales en la calidad del aire.

Como se señaló anteriormente, Doe Run Perú está realizando actualmente mediciones de viento y temperatura encima del nivel del suelo mediante equipos de radar acústico en el Complejo. Esta información tiene el potencial de mejorar la aplicación del modelo. Cuando se logren mediciones consistentemente precisas, se realizará un nuevo modelamiento y se presentarán los resultados reajustados del modelo, según sea apropiado, cuando dichos resultados estén disponibles.

7.0 MODELAMIENTO PARA ESTUDIO DE RIESGOS

Para el estudio de riesgos para la salud humana, se usó el modelo de calidad del aire con el fin de predecir las concentraciones futuras de SO_2 y plomo, así como la deposición anual de plomo en una cuadrícula de puntos receptores que cubría las áreas incluidas en el estudio de riesgos. En la Figura 7-1 se muestra la cuadrícula de celdas receptoras.

El modelamiento se realizó usando emisiones promedio del Complejo estimadas para el 2002 (Tabla 5-1) con el fin de suministrar datos representativos de la exposición de la población durante dicho período de tiempo reciente. Un modelamiento similar se realizó posteriormente para los años 2005, 2007 y 2011, con emisiones estimadas por Doe Run Perú para dichos años. Los estimados de emisiones futuras, mostrados en la Tabla 7-1, se basan en los controles de emisiones, cambios en los procesos, y modificaciones en el Complejo que ha programado Doe Run Perú para cada año (Apéndice B). Los estimados de emisiones fueron suministrados por Doe Run (Vornberg, 2005 – Apéndice B).

Todo el modelamiento para SO_2 y plomo utilizó datos meteorológicos del 2002 con las fuentes de emisión y parámetros descritos en secciones previas de este informe. Sólo se cambiaron las tasas de emisión para escenarios futuros con el fin de representar las reducciones en las emisiones que deben producirse como resultado de la implementación de los proyectos del Complejo.

Además de las concentraciones a corto y largo plazo de SO_2 y plomo, el modelo también calculó las tasas mensuales de deposición de plomo. Para el modelamiento de la deposición, debe ingresarse al modelo información sobre los tamaños de las partículas. Las distribuciones de tamaños de partículas que se requerían se obtuvieron de la publicación AP-42 de la EPA, la cual suministra información sobre tamaños de partículas medidos en procesos no controlados dentro de fundiciones de plomo y cobre.

Los siguientes resultados específicos del modelo se obtuvieron de cada punto receptor.

- Segunda mayor concentración de una hora de SO_2
- Segunda mayor concentración de 24 horas de SO_2
- Concentración promedio anual de SO_2
- Concentración promedio anual de plomo
- Tasa de deposición promedio anual de plomo

En el caso de las concentraciones a corto plazo de SO_2, se tomó la segunda mayor concentración del año de datos para evitar la influencia de posibles puntos fuera de rango que podrían calcularse para situaciones excepcionales o irreales. Muchas normas de calidad del aire permiten que el valor a corto plazo sea excedido una o más veces cada año. También debe recordarse que todas las estadísticas “anuales” son en realidad

promedios de cuatro meses de resultados del modelo, tal como se explicó en la Sección 6.0.

7.1 Contribución de cada fuente en el impacto total

El modelo CALPUFF calcula el impacto total de todas las fuentes modeladas pero no distribuye el total en impactos por cada fuente. Por lo tanto, debe determinarse la contribución de cada fuente específica volviendo a correr el modelo de manera que se incluya sólo una fuente específica o un subgrupo de fuentes a la vez. Debido a esta limitación, sólo se han procesado unas cuantas corridas del modelo (meses individuales de los datos del 2002) para cuantificar los impactos relativos de diferentes fuentes en la Fundición.

Figure 7-1

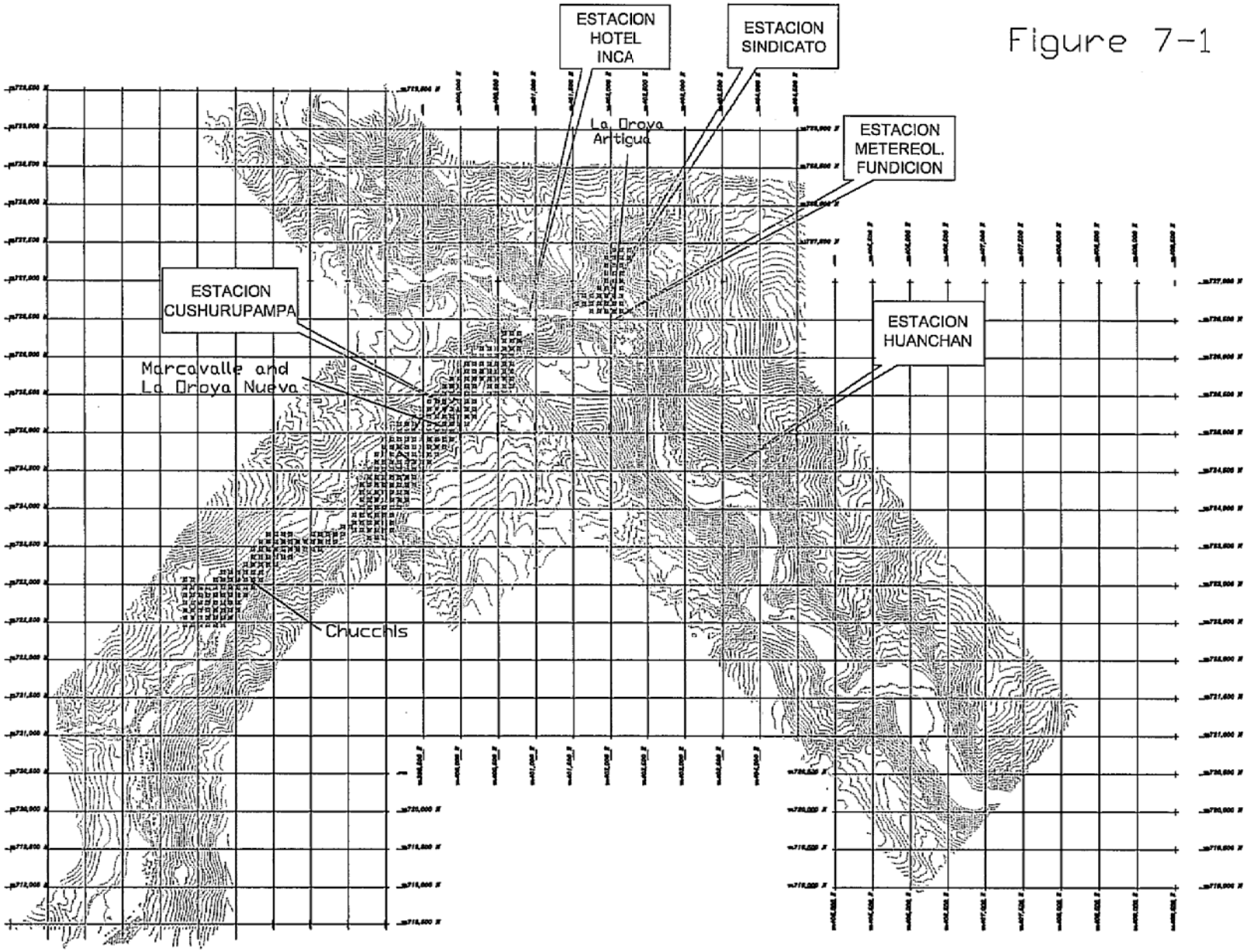

ESTACION HOTEL INCA
ESTACION SINDICATO
ESTACION METEREOL. FUNDICION
ESTACION CUSHURUPAMPA
ESTACION HUANCHAN
La Oroya Antigua
Marcavalle and La Oroya Nueva
Chucchis

Tabla 7-1. Tasas de Emisión en La Oroya (g/s)

Fuente	Escenarios del Modelo (Emisión)							
	2002		2005		2007		2011	
	SO_2	Plomo	SO_2	Plomo	SO_2	Plomo	SO_2	Plomo
Chimenea Principal	10,500	20.80	9,300	14.27	7,870	12.53	1,736	11.89
Lavadores de Gases Planta de Aglomeración	0	3.68	0	3.68	0	0.13	0	0.13
Tubos de Ventilación en el Techo de Edificios								
Tostador de Cobre	400	1.90	400	1.90	400	1.90	100	0.48
Pasillo de Convertidores de Cobre	500	1.27	500	1.27	500	1.27	125	0.32
Horno Reverbero	100	0	100	0	100	0	100	0
Alto Horno	0	1.90	0	1.27	0	0.32	0	0.32
Planta de Dross	0	1.27	0	1.27	0	0.32	0	0.32
Fugitivas de Edificios								
Tostador de Cobre	36	0	36	0	36	0	9	0
Pasillo de Convertidores de Cobre	54	0	54	0	54	0	13.5	0
Horno Reverbero	10	0	10	0	10	0	10	0
Planta de Aglomeración	0	0.95	0	0.95	0	0.16	0	0.16

En el caso del SO_2, se realizó el modelamiento para determinar los impactos relativos de la Chimenea Principal y de las fuentes fugitivas. Se modelaron cuatro meses para la estación de monitoreo Sindicato, considerando sólo la Chimenea Principal y considerando la Chimenea Principal más todas las fuentes fugitivas. Los resultados indican que las emisiones de la Chimenea Principal son responsables de sólo 5% a 27% del total de los impactos pronosticados. La contribución de la Chimenea Principal (con una tasa de emisión de 907 TM/día) respecto a las fuentes fugitivas (emisión total de 95 TM/día) alcanzó un promedio de 16% para los tiempos promedio a corto y largo plazo.

En el caso del plomo, el modelamiento se realizó para un mes de información con el fin de definir las contribuciones individuales de la Chimenea Principal, los Lavadores de Gases de la Planta de Aglomeración y las emisiones fugitivas al total pronosticado para las concentraciones medias mensuales de plomo en los cuatro lugares con estaciones de monitoreo. Las contribuciones al impacto total, promediadas de los cuatro lugares receptores, fueron: 13% de la Chimenea Principal, 27% de los Lavadores de Gases de la Planta de Aglomeración y 60% de emisiones fugitivas. La contribución de la Chimenea Principal y de los Lavadores de Gases de la Planta de Aglomeración tuvo su máximo valor en Huanchán y Cushurupampa (55%) y su mínimo valor en Hotel Inca y Sindicato (25%). Incluso en los monitores más distantes (Huanchán y Cushurupampa), las emisiones fugitivas de plomo son responsables de casi 50% del total pronosticado para las concentraciones de plomo.

Estos resultados son, en líneas generales, consistentes con las conclusiones alcanzadas en un análisis preliminar previo (McVehil-Monnett Associates, 2004), aunque los nuevos resultados indican una importancia aun mayor de las fuentes fugitivas de baja altitud. El estudio previo sugería que la Chimenea Principal era responsable como máximo de dos tercios de las concentraciones promedio de SO_2 a largo plazo; los actuales resultados del modelo CALPUFF indican que contribuye menos de 25% a dichos impactos.

La importancia relativa de las diferentes fuentes respecto a los impactos totales a nivel del suelo también puede inferirse de los resultados para escenarios futuros que se presentan más adelante en esta sección. Se muestra que la reducción en las emisiones de la Chimenea Principal dará como resultado sólo un modesto descenso en la concentración pronosticada. La mayor mitigación de los impactos se dará mediante la eliminación o reducción de las emisiones fugitivas.

7.2 Resultados del Modelo para las Áreas del Estudio de Riesgos

Los resultados del modelo consisten en mapas de isopletas y tablas de concentración/deposición por receptor en cada una de las áreas comprendidas en el estudio de riesgos: Chucchis, Marcavalle, La Oroya Nuevo, y La Oroya Antigua. En el Apéndice A se incluyen todos los mapas de isopletas y un cuadro de los resultados para el plomo por receptor.

Los mapas de isopletas probablemente sean más significativos para los parámetros promedio a largo plazo (anuales). El mapa, que muestra concentraciones máximas de SO_2 en 1 hora y en 24 horas, describe patrones que pueden ser muy influenciados por impactos que se producen una sola vez en un receptor específico y por lo tanto no son totalmente representativos de los impactos típicos en la región. Por lo tanto, es aconsejable darle mayor consideración a la gama de concentraciones descritas y menos énfasis a las aparentes variaciones a pequeña escala.

En general, los resultados indican que el mayor impacto se da en La Oroya Nueva y el menor en La Oroya Antigua. Esto contradice lo que podría esperarse debido a la distancia respecto al Complejo Metalúrgico. Debe recordarse que la evaluación del desempeño del modelo indicaba una significativa sobreestimación en el valle del Yauli y este sesgo probablemente contribuya a los mayores impactos calculados allí. Los resultados para Chucchis y Marcavalle/La Oroya Nueva se consideran conservadores (mayores de los que realmente ocurren), mientras que se espera que la información para La Oroya Antigua sea, en términos generales, realista respecto a los impactos verdaderos.

Más adelante se discuten las áreas receptoras de manera individual. Los resultados se resumen en las Tablas 7-2 a 7-5. El mayor valor de las proyecciones del modelo está en la delineación de tendencias generales a través de las áreas y especialmente en las tendencias futuras pronosticadas a medida que se reduzcan las emisiones. Probablemente estas tendencias sean más significativas que la magnitud absoluta de las concentraciones pronosticadas por el modelo.

Chucchis

Los resultados del modelo para el área de Chucchis indican que los impactos van reduciéndose al subir el valle y alejarse del Complejo. También indican que las concentraciones mayores se dan el extremo occidental del valle, probablemente como resultado de un terreno más empinado que tiende a concentrar los contaminantes trasportados contra la pared del valle. Se pronostica que los impactos menores en el caso del SO_2 se darán en la parte meridional-central del área. La concentración y la deposición de plomo disminuyen uniformemente de norte a sur a través del área.

Se indican decrecimientos modestos en el impacto del SO_2 (5 a 20%) del 2002 al 2007, mostrándose incrementos importantes el 2001 (82% respecto al 2002). En el caso del plomo, se pronostica una reducción más uniforme de los impactos: de 25% en el 2005 a 50% en el 2007 y 60% en el 2011.

Marcavalle

Se indica que los impactos de SO_2 alcanzan su nivel más alto en la parte oriental-central del área, con menores concentraciones en el norte y el sur. Los patrones sugieren que las más altas concentraciones se dan en las pendientes empinadas en partes estrechas

del valle, con menores concentraciones en las secciones más anchas del valle, donde los contaminantes tienen más oportunidad de esparcirse lateralmente.

Las proyecciones de tendencias futuras para Marcavalle indican reducciones modestas en los impactos de SO_2 y plomo en el 2005, un importante descenso en los impactos del plomo en el 2007 y reducciones de 80% para el SO_2 y 66% para el plomo en el 2011.

Tabla 7-2. Predicciones del Modelo para el Área de Chucchis

Cantidad Pronosticada	Valor Promedio en el Área y Reducción Respecto a 2002						
	2002	2005	Cambio	2007	Cambio	2011	Cambio
Máxima 1 hora SO_2 ($\mu g/m^3$)	14,750	14,000	-5%	12,000	-19%	2,800	-81%
Máxima 24 horas SO_2 ($\mu g/m^3$)	1,750	1,600	-9%	1,375	-21%	310	-82%
Promedio Anual SO_2 ($\mu g/m^3$)	435	380	-13%	340	-22%	80	-82%
Concentración Anual de Plomo ($\mu g/m^3$)	1.33	1.03	-23%	0.67	-50%	0.53	-60%
Deposición Anual de Plomo (g/m^2 año)	.0088	.0066	-25%	.0044	-50%	.0038	-57%

Tabla 7-3. Predicciones del Modelo para el Área de Marcavalle

Cantidad Pronosticada	Valor Promedio en el Área y Reducción Respecto a 2002						
	2002	2005	Cambio	2007	Cambio	2011	Cambio
Máxima 1 hora SO_2 ($\mu g/m^3$)	20,500	18,750	-9%	16,250	-21%	4,000	-81%
Máxima 24 horas SO_2 ($\mu g/m^3$)	2,400	2,150	-10%	1,875	-22%	490	-80%
Promedio Anual SO_2 ($\mu g/m^3$)	630	570	-10%	505	-20%	125	-80%
Concentración Anual de Plomo ($\mu g/m^3$)	2.35	2.00	-15%	1.10	-53%	0.79	-66%
Deposición Anual de Plomo (g/m^2 año)	.0252	.0189	-25%	.0107	-58%	.0085	-66%

Tabla 7-4. Predicciones del Modelo para el Área de La Oroya Nueva

Cantidad Pronosticada	Valor Promedio en el Área y Reducción Respecto a 2002						
	2002	2005	Cambio	2007	Cambio	2011	Cambio
Máxima 1 hora SO_2 ($\mu g/m^3$)	19,500	17,500	-10%	15,500	-21%	4,475	-77%
Máxima 24 horas SO_2 ($\mu g/m^3$)	2,000	1,950	-3%	1,900	-5%	538	-73%
Promedio Anual SO_2 ($\mu g/m^3$)	648	615	-5%	565	-13%	154	-76%
Concentración Anual de Plomo ($\mu g/m^3$)	3.90	3.53	-9%	1.58	-59%	0.83	-79%
Deposición Anual de Plomo (g/m^2 año)	.0678	.0631	-7%	.0268	-60%	.0132	-81%

Tabla 7-5. Predicciones del Modelo para el Área de La Oroya Antigua

Cantidad Pronosticada	Valor Promedio en el Área y Reducción Respecto a 2002						
	2002	2005	Cambio	2007	Cambio	2011	Cambio
Máxima 1 hora SO_2 ($\mu g/m^3$)	11,750	10,750	-9%	10,500	-11%	3,700	-69%
Máxima 24 horas SO_2 ($\mu g/m^3$)	1000	950	-5%	925	-7.5%	330	-67%
Promedio Anual SO_2 ($\mu g/m^3$)	215	210	-2%	200	-7%	65	-70%
Concentración Anual de Plomo ($\mu g/m^3$)	2.05	1.80	-12%	0.43	-80%	0.30	-85%
Deposición Anual de Plomo (g/m^2 año)	.0181	.0173	-4%	.0051	-72%	.0032	-83%

La Oroya Nueva

Las concentraciones más altas pronosticadas por el modelo ocurren en las partes nororientales de La Oroya Nueva, que están más cerca del Complejo Metalúrgico y de las paredes escarpadas del valle. Las concentraciones más bajas se dan en las partes meridionales del área, la parte occidental del valle y las secciones más septentrionales, cerca de la estación de monitoreo Hotel Inca.

Los cambios pronosticados en los impactos sobre La Oroya Nueva son similares a los de las otras áreas. Se proyecta que las concentraciones de SO_2 descenderán entre 5 y 21% en el 2007 y entre 73 y 75% en el 2011. Se estima que las concentraciones de plomo se reducirán 60% en el 2007 y 80% en el 2011.

La Oroya Antigua

Todos los valores de concentración y deposición se reducen con la distancia al norte del río Mantaro y del Complejo. En el corto plazo, los máximos valores de SO_2 generalmente se encuentran a unos 200 metros al norte del río. Los máximos valores anuales de concentración y deposición de plomo siempre se presentan en el punto que está directamente cruzando el río frente al Complejo.

Los escenarios futuros indican pequeñas mejoras en los impactos hasta el 2005, para luego obtener un descenso de 70 a 80% en los impactos del plomo en el 2007 y una reducción de 70% en las concentraciones de SO_2 en el 2011.

7.3 Implicancias

Es útil relacionar la reducción pronosticada por el modelo en los impactos en la calidad del aire con las mejoras operativas y de control programadas por Doe Run Perú. Los resultados del modelo confirman algunas de las conclusiones señaladas líneas arriba respecto a la culpabilidad de diferentes fuentes y brindan algunos criterios adicionales.

En Chucchis, se pronostica una mejora modesta en los impactos del SO_2 para el período 2005-2007. Durante este período, las emisiones de SO_2 de la Chimenea Principal se reducirán en 25% y se estima que la reducción en el SO_2 ambiental en Chucchis alcanzará un promedio de 21%. Por lo tanto, las emisiones de la Chimenea Principal sí contribuyen aparentemente de manera significativa en ubicaciones en el orden de 7 km arriba del valle del Yauli. Con las posteriores reducciones en las fuentes fugitivas, junto con una importante reducción en las emisiones de la Chimenea Principal en el 2011, se estima que los impactos en el SO_2 ambiental se reducirán en más de 80% respecto a su nivel en el 2002.

De manera similar, se indica una reducción de 31% en las emisiones de plomo de la Chimenea principal entre el 2002 y el 2005, lo que dará como resultado una reducción total de 23 a 25% en las concentraciones de plomo en el 2011.

En La Oroya Antigua pueden verse tendencias algo diferentes. La reducción en las emisiones de SO_2 de la Chimenea Principal entre el 2002 y el 2007 produce sólo pequeñas reducciones en la concentración ambiental, en el orden de 7 a 11%. Pero las posteriores reducciones en las emisiones fugitivas de SO_2 reducen el impacto ambiental en 68% respecto a los niveles del 2002.

En el caso del plomo en La Oroya Antigua, la reducción de las emisiones de plomo de la Chimenea Principal entre el 2002 y el 2005 tiene poco efecto en los niveles de plomo en el ambiente. Sin embargo, se estima que la posterior mitigación de las emisiones de plomo tanto fugitivas como provenientes de los Lavadores de Gas de la Planta de Aglomeración reducirán los impactos de plomo en el ambiente en más de 80% hacia el 2011.

Por lo tanto, los resultados del modelo indican que las emisiones de la Chimenea Principal tienen un impacto significativo en lugares ubicados cinco a diez kilómetros de la Fundición, como Chucchis y Marcavalle. Cuando se considera que las emisiones de SO_2 de la Chimenea Principal en el 2002 fueron diez veces mayores que las emisiones fugitivas, el impacto relativo (impacto por unidad de emisión) sigue siendo mayor para las fuentes fugitivas.

En puntos más cercanos, como La Oroya Antigua, las emisiones fugitivas parecen causar un porcentaje abrumador de los impactos al nivel del suelo; su mitigación programada para el período 2007-2001 será efectiva para eliminar las altas concentraciones pronosticadas y observadas en el período 2002-2004.

7.4 Efecto de las Reducciones en la Emisiones

Como se describió anteriormente, durante los últimos años, Doe Run Perú ha instituido un procedimiento para reducir operaciones específicas del Complejo durante las primeras horas de la mañana cuando las condiciones climáticas sugieren una alta probabilidad de dispersión deficiente y elevados impactos en la contaminación del aire de La Oroya durante las horas siguientes. Esta estrategia, conocida como estrategia de control complementario o intermitente, reduce algunas operaciones que generan altos niveles de emisiones durante períodos de una o más horas antes del amanecer.

Las simulaciones del modelo descritas en este informe para el año 2002 y otros años no incluyó ninguna reducción en las tasas de emisión durante horas específicas del día. Para obtener una medición cuantitativa de la efectividad de la estrategia de control complementario, se realizó una simulación aparte del modelo para los impactos de SO_2 durante el 2002. Los datos de entrada del modelo asumieron tasas de emisión normales (promedio) durante todas las horas excepto durante el período de 5 a.m. a 8 a.m. Durante dicho período de tres horas, las emisiones se fijaron en cero para suministrar un ejemplo idealizado de la máxima reducción en los impactos lograda mediante recortes en las emisiones a corto plazo.

Los resultados del modelo para el escenario de control complementario indicaron una reducción (respecto a la operación normal de 24 horas al día) de 25 a 50% en las concentraciones máximas a corto plazo de SO_2 en las mañanas y aproximadamente 25% en las concentraciones promedio de 24 horas. Por lo tanto, los resultados del modelo confirman que un procedimiento de reducción de las emisiones en las horas previas al amanecer tiene un efecto significativo en la reducción de las concentraciones máximas de contaminantes durante el día siguiente.

Dada la efectividad mostrada por la estrategia de control complementario para mitigar la severidad de los episodios de alta contaminación, sería aconsejable que Doe Run Perú la continúe usando y considere posibles maneras de mejorar su aplicación. También debe tomarse en cuenta que las futuras reducciones en los impactos proyectadas en este informe no consideran la estrategia de control complementario. Su uso continuo dará como resultado una mitigación de impactos adicional a la indicada por el modelo.

7.4 Resultados para el Arsénico y el Cadmio

Doe Run suministró estimados de las emisiones actuales y futuras de arsénico (As) y cadmio (Cd) que se podrían usar modelar tendencias en la concentración y deposición de estos metales. Los estimados de emisiones se incluyen en el Apéndice B.

Se realizó un modelamiento de la concentración y deposición de As y Cd para los años 2002 y 2011 usando las mismas fuentes y metodología que para las simulaciones con SO_2 y plomo. La comparación entre las predicciones para el 2002 y las concentraciones medidas se muestra en la Tabla 7-6.

Las predicciones del modelo son, en general, algo bajas para Sindicato, guardan una razonable concordancia en Hotel Inca, y son altas en Cushurupampa. En general, considerando todos los lugares juntos, las concentraciones están bastante cerca a las concentraciones monitoreadas en el 2002. Debe recordarse que las concentraciones pronosticadas para el plomo fueron generalmente altas en todos lo lugares con monitores (Tabla 6-2). El hecho que los resultados de As y Cd no reflejen una sobreestimación similar en todos los lugares apoya la conclusión de que las emisiones de plomo pueden haber sido sobreestimadas o que su distribución entre las fuentes puede no ser precisa.

En el Apéndice A se incluyen planos topográficos que muestran la concentración y deposición de As y Cd pronosticadas en las áreas del estudio de riesgos para el 2002 y el 2011. La Tabla 7-7 resume las predicciones para cada área y la reducción pronosticada en los impactos entre el 2002 y el 2011. En concordancia general con la información sobre SO_2 y plomo, se proyectan reducciones de 70 a 85%. Se estima que los impactos de arsénico deben decrecer en 70 a 75% y los impactos de cadmio deben reducirse en 75 a 85%.

Tabla 7-6. Comparación entre los Resultados del Modelo y los Datos de Monitoreo para el 2002 (todas las unidades son microgramos/m^3 en Condiciones del Lugar)

	Sindicato		Hotel Inca		Cushurupampa	
	Modelo	Medición	Modelo	Medición	Modelo	Medición
Arsénico						
Promedio Anual	.65	2.02	.53	.99	1.42	.66
Promedio Mensual Máximo	1.03	2.71	.71	1.08	1.89	.80
Cadmio						
Promedio Anual	.07	.22	.05	.05	.12	.04
Promedio Mensual Máximo	.12	.40	.06	.08	.16	.08

Tabla 7-7. Predicciones del Modelo para Arsénico y Cadmio

	Área de Chucchis	Área de Marcavalle	Área de La Oroya Nueva	Área de La Oroya Antigua
Promedio Anual como Concentración ($\mu g/m^3$)				
2002	0.86	1.30	1.53	0.40
2011	0.26	0.38	0.40	0.11
Cambio porcentual	-69%	-71%	-74%	-74%
Promedio Anual como Deposición (g/m^2 - año)				
2002	.0060	.0139	.0260	.0046
2011	.0019	.0041	.0068	.0012
Cambio porcentual	-69%	-70%	-74%	-75%
Promedio Anual de Concentración de Cd ($\mu g/m^3$)				
2002	0.069	0.102	0.138	0.058
2011	0.017	0.025	0.027	0.009
Cambio porcentual	-75%	-75%	-81%	-84%
Promedio Anual de Deposición de Cd (g/m^2 - año)				
2002	.0005	.0012	.0022	.0006
2011	.0001	.0003	.0004	.0001
Cambio porcentual	-74%	-76%	-81%	-85%

8.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha aplicado el modelo de dispersión de calidad del aire CALPUFF para obtener estimados de los impactos en la contaminación del aire en áreas pobladas en un radio de 10 kilómetros del Complejo Metalúrgico La Oroya de Doe Run Perú. Las pruebas de desempeño del modelo, mediante la comparación con datos registrados sobre concentraciones de SO_2 y metales en estaciones de monitoreo, indican que el modelo predice concentraciones a corto y largo plazo que son semejantes a los resultados del monitoreo. Las predicciones del modelo reproducen la variación diaria observada en las concentraciones y, en muchos casos, reproducen los cambios cotidianos que ocurren. Sin embargo, los resultados del modelo no reflejan los impactos relativos en los diferentes monitores, tal como lo indican las mediciones, y muestran algunos sesgos sistemáticos en los impactos diurnos en comparación con los nocturnos.

Se concluye que el modelo tiene capacidad para reproducir los complejos procesos meteorológicos y de dispersión en La Oroya pero que es necesario realizar mejoras si se quiere que el modelo tenga un uso óptimo en la predicción futura de impactos dentro del área modelada y a distancias mayores. Se considera que la principal limitación en el desempeño actual del modelo es la falta de datos de entrada representativos en cuanto a temperatura y flujo del aire por encima del suelo.

Los resultados del modelo presentados en este informe buscan brindar insumos generales para el estudio de riesgos para la salud humana de Doe Run Perú. En el caso de las áreas modeladas, se cree que los resultados son conservadores pues muestran impactos iguales o mayores que los que probablemente ocurran. Los resultados del modelo son más confiables en La Oroya Antigua y menos precisos en áreas ubicadas a mayor distancia del Complejo.

Las conclusiones más útiles del modelo son las proyecciones de los impactos futuros en la calidad del aire que se esperan después del establecimiento de controles de la contaminación y reducciones en las emisiones de la Fundición. Debe reconocerse que los impactos son, en general, proporcionales a las emisiones de cualquier fuente dada. Por lo tanto, si el modelo brinda una simulación realista, en términos generales, del comportamiento atmosférico y el impacto de fuentes individuales, puede esperarse que describa con cierta confiabilidad los impactos relativos de los cambios en los escenarios de emisiones. Se cree que la aplicación actual del modelo CALPUFF brinda de hecho una simulación realista en términos generales y por lo tanto puede esperarse que brinde proyecciones significativas de los cambios relativos en los impactos futuros. Se cree que las tendencias temporales indicadas son confiables, aun cuando la magnitud absoluta de los valores de concentración/deposición pueda estar sesgada en algunos lugares.

Las limitaciones específicas del proceso modelamiento deben tenerse presentes al interpretar y usar los resultados del modelo.

- Debido a la ausencia de información meteorológica sobre condiciones de altura, el modelo no reproduce la distribución temporal y espacial de los impactos con la precisión necesaria para la definición detallada de los impactos regionales.

- Los resultados del modelo parecen ser en general de buena calidad para áreas cercanas a la Fundición (estaciones de monitoreo Sindicato y Hotel Inca) pero sobreestiman los impactos a lo largo del río Yauli dentro de los 10 km que considera el modelo y los subestiman aguas abajo de la Fundición a lo largo del río Mantaro dentro de los 10 km que considera el modelo.

- Sólo se consideraron las principales fuentes del Complejo; las emisiones de otras fuentes podrían ser significativas en algunas situaciones. En particular, no se consideró ninguna simulación de las emisiones de plomo provenientes del tráfico vehicular y de la erosión de las superficies expuestas por parte del viento. Estas fuentes pueden ser significativas para la concentración y deposición del plomo en áreas receptoras cercanas al Complejo.

- Para las simulaciones se usó una cantidad limitada de datos meteorológicos de cuatro meses del 2002. Es posible que estos meses no sean representativos de todas las estaciones ni de todos los años.

- La estrategia de control complementario de Doe Run Perú (paralización durante horas de dispersión deficiente) no fue considerada en el modelamiento de escenarios futuros. Los datos de monitoreo y modelamiento indican que la estrategia es efectiva en reducir las concentraciones pico y promedio en áreas pobladas y debe continuarse.

- Los efectos de la precipitación en la concentración y deposición ambiental de contaminantes no se incluyeron en el modelo. Estos efectos podrían ser importantes durante la estación lluviosa y deben ser incluidos en futuros modelos usando la información sobre precipitación registrada en la estación de monitoreo Fundición.

- El área que se incluyó en el modelo estaba limitada a distancias de 10 km del Complejo. Debido al área limitada, el modelo no consideró que ningún contaminante fuera llevado más allá de la cuadrícula del modelo por los vientos predominantes. Dichos contaminantes en realidad podrían ser devueltos al área del modelo al invertirse la dirección del viento.

- La distribución de tamaños de partículas asumida para el modelamiento del plomo puede no representar con precisión las partículas emitidas por diferentes fuentes en el Complejo.

Se recomienda que Doe Run Perú otorgue alta prioridad a la obtención de información de monitoreo de alta calidad que pueda ser utilizada para mejorar la aplicación del modelo de calidad del aire. En particular se recomienda lo siguiente:

- Continuar y mejorar el monitoreo con el Radar Acústico tipo Doppler de manera que se registre información de alta calidad de manera consistente durante períodos prolongados.

- Realizar calibraciones regulares y mejorar los procedimientos de control/aseguramiento de la calidad para garantizar que la información meteorológica y de calidad del aire sea precisa.

- Considerar la posibilidad de un monitoreo adicional o la reubicación de algunos de los monitores existentes con el fin de brindar información representativa para el modelamiento.

Cuando se cuente con información adecuada del Radar Acústico, se recomienda implementar un modelamiento adicional para brindar un complemento oportuno del presente informe. El nuevo proceso de modelamiento evaluaría dos de las limitaciones señaladas anteriormente: información meteorológica inadecuada por encima del suelo y la estrategia de reducción de operaciones para la mitigación de impactos.

A más largo plazo, cuando se cuente con un año de información meteorológica confiable del Radar Acústico y se disponga de estaciones superficiales, se recomienda realizar un estudio de modelamiento más amplio para enfrentar mejor los problemas señalados líneas arriba y para ampliar el tratamiento del modelo a fin de incluir:

- Modelamiento de un año completo de condiciones climáticas;

- Datos sobre precipitación e información más detalladas sobre tamaños de partículas;

- Ampliación del área del modelo para evaluar los impactos a una mayor distancia de La Oroya;

- Polvo arrastrado por el viento, polvo de las pistas por tráfico vehicular y emisiones de plomo de los vehículos.

La combinación de deficiencias en la información y restricciones de tiempo impidieron considerar estos elementos en el presente estudio. Su inclusión en futuras aplicaciones del modelo suministrará información relevante sobre la importancia de otros factores en los impactos en la calidad del aire y contribuirá a mejoras esenciales en la capacidad de predicción del modelo.

Referencias

Earth Tech, Inc., 2000: A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model, Version 5. January, 2000, Concord, MA, U.S.A.

JUSA Juan De Dios S.A., 2005: Seccionamiento Para Las Alturas de Edificios y Plantas – Estimacion de Areas – Fuga de Gas Dentro de Fundicion v Refineria. Lima, Peru, February 2005.

McVehil-Monnett Associates, Inc., 2004: Air Pollution Impacts of La Oroya Smelter. July 2004, Englewood, CO, U.S.A.

U.S. Environmental Protection Agency, 2003: Revision to the Guideline on Air Quality Models, 40 CFR Part 51, Appendix W. Federal Register, Vol. 68, No. 72, April 15, 2003.

Vornberg, 2005: Fugitive and Stack Lead Dust Reduction Projects Estimates. Memo to G. McVehil from D. Vornberg, June 12, 2005.

APÉNDICE A

RESULTADOS DEL MODELO – MAPAS DE ISOPLETAS

APÉNDICE B

ACCIONES DE MITIGACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN EN EL COMPLEJO Y ESTIMADOS DE EMISIONES

APÉNDICE C

ARCHIVOS DE MODELAMIENTO
Y
DATOS DE MONITOREO DE LA OROYA