

4

INFORME DE CALIDAD DEL AIRE DE LA CIUDAD DE SAN JOSÉ:

Año 2007

MSc. Jorge Herrera M
Lic. Susana Rodríguez R



UNA UNIVERSIDAD
NACIONAL
COSTA RICA
ANIVERSARIO



PRESENTACION

El Cantón Central de San José se encuentra inmerso en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica (GAM), la cual con tan solo un 4% del territorio (2084 km²) alberga el 75% de la flota vehicular, 70% de la industria nacional y el 60% de la población del país, según datos del último censo de población realizado (INEC, 2000). Esta concentración importante de actividades comerciales e industriales en un área geográfica tan pequeña, caracterizada por un patrón de crecimiento urbano histórico, de forma radial, el cual genera nuevas áreas en adición a las que ya gravitan sobre las infraestructuras urbanas existentes, hace cada día más deficiente la operación de la ciudad, causando un deterioro considerable en la calidad del aire que se respira.

La dinámica de la contaminación atmosférica en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica es un problema generalizado en las ciudades latinoamericanas. El actual crecimiento demográfico, las concentraciones industriales, el incremento de los parques vehiculares, el elevado consumo de combustibles y los patrones inadecuados de movilidad urbana han traído consigo que la evolución de este problema se incremente.

Por otra parte, tanto los habitantes del Cantón Central de San José como los ciudadanos que visitan diariamente el municipio, en muchos casos por razones laborales, exigen el abatimiento de la contaminación atmosférica en esta región del país. Esta exigencia es un apremio cotidianamente reiterado en público y en privado por todos los sectores sociales, que se ve continuamente reforzado por la difusión de nueva información relativa a los efectos, que sobre la salud de la población, generan los niveles alcanzados por algunos contaminantes. Por ello, la respuesta tanto del gobierno central como del gobierno local no puede esperar y debe responder a las más altas expectativas sociales.

En este contexto, y para que los procesos vitales que mantienen el funcionamiento y generan el crecimiento en el cantón no sigan deteriorando la calidad del aire, es necesario iniciar de inmediato un gran número de acciones eficaces y complementarias, que incluyan a todos los sectores de la sociedad, y que produzcan beneficios claros y permanentes a la población; tales acciones deben tener como sustento el desarrollo de un sistema confiable de información acerca del estado de la calidad del aire, que sirva de herramienta fundamental para orientar la toma de decisiones en esta materia.

La contaminación del aire, a diferencia de otros problemas ambientales como la contaminación del suelo por sustancias tóxicas, puede en muchos casos percibirse con facilidad, especialmente en los grandes conglomerados urbanos. Sin embargo, más allá de ver el aire sucio, es necesario evaluar de manera cuantitativa su calidad, a través de la medición de los niveles en los que se presentan, tanto espacial como temporalmente, los contaminantes que tienen efectos sobre la salud. Al comparar estas mediciones con las normas nacionales e internacionales se puede determinar si la calidad del aire es satisfactoria o no, y en este último caso establecer programas de control acordes con la severidad del problema.

El análisis de tendencias de la calidad del aire a lo largo de los años permite inferir si existe un problema de deterioro creciente o una mejoría paulatina para cada uno de los contaminantes estudiados. Estas tendencias constituyen sin duda el mejor indicador disponible para evaluar si una ciudad se aproxima o se aleja de lo que puede considerarse como *sustentable* en materia de calidad del aire.

Desde el año 2003, el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional y la Municipalidad de San José unieron esfuerzos para consolidar una red de monitoreo de contaminantes criterio de la calidad del aire, que pudiera generar información confiable para la toma de decisiones. Este esfuerzo adicional se vio fortalecido a partir del año 2005 con la firma del Convenio de Cooperación entre la Universidad Nacional y la Municipalidad de San José para crear el Programa Agenda Verde San José y la incorporación del Ministerio de Salud, en donde se estableció que la contaminación atmosférica sería uno de los temas relevantes de la agenda de trabajo, de este vínculo de cooperación para mejorar la gestión ambiental en el Cantón Central de San José.

El presente informe contiene, a diferencia de los anteriores, información sobre indicadores de presión, estado y respuesta con el fin de determinar el comportamiento de todas aquellas fuentes que están contribuyendo al desarrollo del problema y la acción interventora realizada por las autoridades tanto locales como centrales en el planteamiento de medidas correctivas.

MSc. Jorge Herrera Murillo

Licda. Susana Rodríguez Román

I. Situación Actual y Tendencias de la Calidad del Aire (2004-2006)

Con el fin de evaluar el estado que guarda la calidad del aire es necesario llevar a cabo la medición de las concentraciones de los contaminantes y compararlas con las normas para protección de la salud. En este capítulo se describen dichas normas y los efectos que ocasionan los contaminantes, además de mostrarse las tendencias de los últimos años de los niveles de contaminación de la Ciudad de San José.

1.1. Normas de Calidad del Aire:

En nuestro país se miden y se norman los siguientes contaminantes atmosféricos: bióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), bióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃), partículas suspendidas totales (PST), partículas menores a 10 micrómetros de diámetro (PM10) y plomo (Pb). Para cada uno de estos contaminantes se cuenta con un estándar o norma de calidad del aire. Las normas de calidad del aire fijan valores máximos permisibles de concentración de contaminantes, con el propósito de proteger la salud de la población en general y de los grupos de mayor susceptibilidad en particular, para lo cual se incluye un margen adecuado de seguridad.

En los países desarrollados las normas de calidad del aire se revisan periódicamente y los límites que se establecen para cada contaminante se basan en los análisis exhaustivos de la información existente sobre estudios epidemiológicos, toxicológicos y de exposición, tanto en animales como en seres humanos. A partir de dichos análisis se trata de determinar la relación dosis-respuesta, lo cual incluye la identificación del nivel más bajo de contaminación que es capaz de causar un impacto en la salud de algún grupo de la población. Por ejemplo, cuál es la concentración más baja de ozono que es capaz de producir una disminución (por pequeña que esta sea) en la capacidad respiratoria de individuos susceptibles como los asmáticos. Una vez identificado este límite, se incluye un margen de seguridad para proporcionar mayor certeza de que la inmensa mayoría de la población, si no es que toda, estará protegida si no se rebasa el límite de contaminación así establecido.

En nuestro país, no existen los recursos ni la infraestructura para realizar estudios epidemiológicos, toxicológicos y de exposición, ni en animales ni en seres humanos, por lo que las normas se establecieron fundamentalmente tomando en cuenta los criterios y estándares adoptados en otros países del mundo. Las normas vigentes de calidad del aire fueron dictadas por el Ministerio de Salud en el decreto 30221-SALUD publicado en el Diario Oficial la Gaceta el 21 de marzo de 2002, sin que hasta la fecha se haya realizado una revisión rigurosa de los estándares que esta contempla.

Si bien adoptar en Costa Rica estándares que se han desarrollado con base en el estudio de poblaciones muy diferentes a la nuestra tiene algunos inconvenientes (como el supuesto implícito de que factores como los nutricionales, de susceptibilidad y otros son similares), permite establecer límites de contaminación razonables que sirven como guía para la evaluación objetiva de la calidad del aire en nuestras ciudades y para el desarrollo de programas de control.

Los niveles o concentraciones de los contaminantes en el aire se expresan en unidades como: partes por millón (ppm), partes por billón (ppb), o microgramos por metro cúbico (mg/m^3).

Tabla I. Valores normados para contaminantes del Aire en Costa Rica

Contaminante	Valores límite	
	Exposición Aguda	Exposición Crónica
Dióxido de Nitrógeno (NO₂)	400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Promedio aritmético en una hora)	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Promedio aritmético anual)
Dióxido de Azufre (SO₂)	365 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Promedio aritmético en 24 horas)	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Promedio aritmético anual)
Monóxido de Carbono (CO)	40 mg/m^3 (Promedio aritmético en una hora)	10 mg/m^3 (Promedio aritmético en 8 horas)
Ozono (O₃)	160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Promedio aritmético en una hora)	
Partículas PM10	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 horas)	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Promedio Anual)

Valores publicados en el *Diario Oficial La Gaceta del 21 de marzo de 2002*

Algunas de las tendencias más recientes a nivel internacional apuntan hacia el establecimiento de estándares para la medición de partículas menores a 2.5 micrómetros de diámetro (PM_{2.5}), como lo hizo la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos en 1997 (adoptando como estándares 65 µg/m³ para el promedio de 24 horas y 15 µg/m³ para el promedio anual). Sin embargo, actualmente en Costa Rica se están realizando por parte de la Universidad Nacional, las primeras mediciones de PM 2.5 en la Ciudad de San José, por lo que se espera tener pronto información suficiente para poder generar un parámetro de referencia en esta materia.

Otro contaminante que requiere de una atención especial, desde el punto de vista normativo, es el monóxido de carbono. En 1992, luego de revisar la información científica disponible, la EPA ratificó como norma de calidad del aire para este contaminante un valor de 9 ppm para un promedio móvil de 8 horas. En un individuo promedio este nivel de exposición se traduce en niveles de carboxihemoglobina (COHb) cercanos al 2%. Estudios de laboratorio han demostrado efectos deletéreos (reducción del tiempo en el que se presenta ataque de angina) en sujetos enfermos de la arteria coronaria a niveles de COHb de 2% y 2.9%. Estos hallazgos sugieren que nuestro país debiera revisar los valores normados actualmente para este contaminante.

1.2. Efectos sobre la salud causados por los contaminantes:

Ozono

Resultados de numerosos estudios indican que la exposición a ozono puede ocasionar inflamación pulmonar, depresión del sistema inmunológico frente a infecciones pulmonares, cambios agudos en la función, estructura y metabolismo pulmonar, y efectos sistémicos en órganos blancos distantes al pulmón, como por ejemplo el hígado (EPA, 1993). Las investigaciones toxicológicas con animales son sumamente útiles pues permiten conocer el espectro completo de los efectos y condiciones de exposición que no pueden investigarse en seres humanos.

La mayoría de los expertos acepta una extrapolación cualitativa entre animales y humanos, o sea que los efectos que causa el ozono en animales pueden presentarse en humanos bajo ciertas condiciones de exposición (dependiendo de la concentración, duración y actividad física realizada). Sin embargo, hay mucho menos consenso con relación a las extrapolaciones cuantitativas (e.j., los niveles de exposición en los que los efectos observados en animales también aparecen en humanos).

Los estudios de exposición en seres humanos se realizan utilizando concentraciones fijas de ozono bajo condiciones cuidadosamente controladas. El propósito fundamental de este tipo de estudios es obtener datos sobre la respuesta a cierto nivel de exposición. Los efectos pulmonares observados en seres humanos saludables expuestos a concentraciones urbanas típicas de ozono consisten en un decremento de la capacidad inspiratoria, una broncoconstrucción moderada y síntomas subjetivos de tos y dolor al inspirar prolongadamente. La reducción de la capacidad inspiratoria da como resultado una reducción en la capacidad vital forzada (CVF) y en la capacidad pulmonar total (CPT), y en combinación con la broncoconstrucción contribuye a una reducción en el volumen expiratorio forzado en un segundo (VEF1).

En los últimos ocho años se ha publicado un considerable número de artículos informando sobre los efectos en la salud causados por ozono y otros oxidantes fotoquímicos a niveles muy cercanos a la norma actual de calidad del aire. Algunos de los estudios recientes en los que se expone a individuos por períodos de 1 a 2 horas indican que pueden presentarse decrementos en la función pulmonar de niños y adultos jóvenes cuando se exponen a concentraciones de 0.12 a 0.16 ppm, mientras llevan a cabo diferentes niveles de ejercicio.

Otros estudios sobre exposición prolongada (de hasta 7 horas) a concentraciones bajas de ozono en el intervalo de 0.08 a 0.12 ppm, indican que existe un decremento progresivo de la función pulmonar (Folinsbee et al, 1988), así como un incremento en los síntomas respiratorios en situaciones de ejercicio moderado.

Monóxido de carbono

Debido al fuerte gradiente espacial que presenta este contaminante, las concentraciones encontradas en microambientes como en las banquetas de calles con intenso tránsito vehicular y en el interior de vehículos privados y públicos (Fernández et al, 1994) son mucho mayores que las concentraciones medidas simultáneamente en las estaciones fijas de análisis continuo. Esto significa que, a pesar de que no se exceda la norma a nivel de la estación, puede haber un número considerable de personas que se vean expuestas a niveles peligrosos de este contaminante, tal como se comprobó en dos estudios extensos realizados por la USEPA en las ciudades de Denver y Washington, D.C. (USEPA, 1992).

Es importante mencionar que luego de revisar la información científica disponible, la USEPA ratificó en 1992, como norma de calidad del aire para monóxido de carbono, un

valor de 9 ppm para un promedio móvil de 8 horas. En un individuo promedio este nivel de exposición se traduce en niveles de carboxihemoglobina (COHb) cercanos al 2%. Estudios de laboratorio han demostrado efectos deletéreos (reducción del tiempo en el que se presenta ataque de angina) en sujetos enfermos de la arteria coronaria a niveles de COHb de 2% y 2.9%. Estos hallazgos sugieren que convendría revisar el estándar adoptado en Costa Rica.



Importancia ambiental de las Partículas Suspendidas (PM10)

Las partículas pueden tener un origen natural o bien formarse por reacciones fotoquímicas en la atmósfera. Estas últimas pueden estar constituidas por sulfatos y nitratos (y sus ácidos correspondientes), o por carbón orgánico. Por ejemplo, estudios realizados en los alrededores de la Catedral Metropolitana de San José, mostraron que muestras de aerosoles de diámetro menor a 10 micras, tenían un contenido de 22% de sulfatos, 7% de nitratos y 9% de cloruro (Herrera; Rodríguez, 2006). También existen partículas y aerosoles en estado líquido, que contienen compuestos orgánicos.

El origen de los aerosoles y partículas puede deberse a la emisión de polvos, gases y vapores provenientes de vehículos automotores y fábricas; asimismo, se pueden formar en la atmósfera a partir de gases y vapores producidos por alguno de los siguientes procesos: reacciones químicas entre contaminantes gaseosos; reacciones químicas entre contaminantes gaseosos en la superficie de partículas ya existentes; aglomeración de aerosoles; o reacciones fotoquímicas en las que intervienen compuestos orgánicos.

La exposición a las partículas suspendidas puede causar reducción en las funciones pulmonares, lo cual contribuye a aumentar la frecuencia de las enfermedades respiratorias. En concentraciones muy elevadas, ciertas partículas (como el asbesto) puede provocar cáncer de pulmón y muerte prematura.

En específico, las partículas pueden tener cualquiera de los siguientes efectos:

- Consecuencias tóxicas debido a sus inherentes características físicas, químicas o ambas.
- Interferir con uno o más mecanismos del aparato respiratorio.
- Actuar como vehículo de una sustancia tóxica absorbida o adherida a su superficie.

Las partículas en conjunción con el bióxido de azufre provocan respiración agitada, disminución del volumen de las vías respiratorias, dificultad para respirar e irritación en las vías respiratorias, de leve a severa. Adicionalmente, las partículas muestran efectos sobre la visibilidad, sobre todo las menores a 2.5 micras, dado que interfieren con la luz visible.

La disminución de la visibilidad se debe a la dispersión y absorción de la luz por los aerosoles o partículas.



Las partículas suspendidas menores a 10 micras de diámetro aerodinámico pueden ser inhaladas y llegar a los pulmones, causando daños a la salud. Actualmente, se considera que este tipo de partículas son un mejor indicador de la calidad del aire que las partículas suspendidas totales, que anteriormente se utilizaban como contaminante criterio. Actualmente, la norma de calidad del aire para PM10 adoptada en Costa Rica y en los Estados Unidos es de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La exposición a PM10 ha generado una creciente preocupación en los últimos años, pues día a día aparecen estudios que demuestran una asociación significativa entre la concentración ambiental de partículas de la fracción respirable y la mortalidad y morbilidad de las poblaciones. En forma sorprendentemente consistente, a través de muchos estudios se ha encontrado un 3% de incremento en la mortalidad normal diaria por cada $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de incremento en PM10 a partir del valor de la norma, siendo la asociación más significativa con cánceres cardiopulmonares y de pulmón.

Es de especial preocupación el hecho de que no parece existir una concentración mínima en la cual ya no se detecten impactos en la salud. Tomando en cuenta las concentraciones de PM10 que se presentan cotidianamente en la GAM se puede concluir que más de la mitad de la población de la ciudad se ve expuesta diariamente a concentraciones superiores a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y que un número considerable de individuos están expuestos a concentraciones mucho mayores. A pesar de que no existen estudios completos realizados en Costa Rica, los datos arriba mencionados nos sugieren que la contaminación por partículas suspendidas debe contribuir de manera significativa a la incidencia de enfermedades respiratorias así como a un incremento en la mortalidad por encima de los niveles atribuibles a otros factores.

Dióxido de azufre

El dióxido de azufre, que puede ser oxidado en la atmósfera a trióxido de azufre, se genera tanto en fuentes naturales como en la combustión de materiales, principalmente combustibles fósiles, que contienen azufre. Los óxidos de azufre son solubles en agua y al hidratarse dan lugar a la formación de ácidos sumamente agresivos. Aquéllos se hidratan con la humedad de las mucosas conjuntival y respiratoria y constituyen un riesgo por producir irritación e inflamación aguda o crónica y suelen adsorberse en las partículas

suspendidas, lo que da lugar a un riesgo superior, puesto que su acción conjunta es sinérgica (USEPA, 1986).

La magnitud de la respuesta de un individuo asmático es típicamente la broncoconstricción, misma que es variable y diferente para cada persona; aunque dicha respuesta es inducida por la exposición a cualquier concentración de bióxido de azufre, la realización de una actividad moderada a exposiciones de 0.4 a 0.5 ppm o mayores, implica un riesgo importante para la salud de la persona; puede que sea necesario no sólo detener su actividad, sino recibir atención médica.

La combinación del bióxido de azufre con partículas suspendidas, en condiciones favorables para su acumulación y oxidación (la presencia de metales en las partículas cataliza la oxidación), ha sido la responsable de episodios poblacionales, así como del incremento de la morbilidad y la mortalidad en enfermos crónicos del corazón y vías respiratorias.

Los óxidos de azufre penetran en los pulmones y se convierten en un agente irritante del tracto respiratorio inferior, cuando se adsorben en la superficie de las partículas respirables que se inhalan o al disolverse en las gotas de agua que penetran por la misma vía (Stoker, 1981). Tanto la adsorción como la conversión a sulfato tienen lugar en la atmósfera. Los aerosoles sulfatados son agentes irritantes de tres a cuatro veces más potentes que el bióxido de azufre. Estas pequeñas partículas penetran hasta los pulmones, donde se depositan y, si el bióxido de azufre no está ya en forma de sulfato, el ambiente húmedo de los pulmones proporciona las condiciones apropiadas para su oxidación.

Los sulfatos constituyen un peligro serio para la salud, habiéndose demostrado que concentraciones muy bajas de sulfatos (de 8 a 10 microgramos por metro cúbico) ejercen efectos adversos sobre los asmáticos, los ancianos y otras personas susceptibles con problemas respiratorios crónicos.

Óxidos de nitrógeno

El monóxido y el bióxido de nitrógeno son potencialmente dañinos para la salud humana, estimándose que el bióxido es aproximadamente 4 veces más tóxico que el monóxido. A la concentración que se encuentra en la atmósfera el óxido nítrico no es irritante y no se le considera como un peligro para la salud, sin embargo, al oxidarse se convierte en bióxido de nitrógeno que sí representa un riesgo para la salud. El óxido nítrico se deriva de los procesos de combustión; es un contaminante primario y juega un doble papel en materia

ambiental, ya que se le reconocen efectos potencialmente dañinos de manera directa, al mismo tiempo que es uno de los precursores del ozono y otros oxidantes fotoquímicos.

La acumulación de bióxido de nitrógeno en el cuerpo humano constituye un riesgo para las vías respiratorias ya que se ha comprobado que puede alterar la capacidad de respuesta de las células en el proceso inflamatorio, como sucede con las células polimorfonucleares, macrófagos alveolares y los linfocitos, siendo más frecuente en casos de bronquitis crónica (USEPA, 1986).

La mayor parte de la información disponible en cuanto a pruebas con concentraciones reducidas, procede de estudios de laboratorio con personas voluntarias, y con animales cuando se trata de concentraciones elevadas. El aumento de las dosis desemboca en una secuencia de efectos: problemas de percepción olfativa, molestias respiratorias, dolores respiratorios agudos, edema pulmonar (acumulación de fluido) y, finalmente, la muerte.

1.3. Evolución de la Calidad del Aire en la Ciudad de San José (2004-2006):

Material Particulado PM-10 (niveles y principales componentes iónicos):

Para realizar el muestreo del material particulado PM-10, se mantienen desde el año 2004, dos sitios de monitoreo ubicados en la Ciudad de San José, costado sur de la Catedral Metropolitana y Junta de Educación, los cuales se caracterizan por ser categoría B de acuerdo con la clasificación de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. La categoría B se asigna a aquellos sitios donde se presenta alta concentración de contaminantes con bajo potencial de acumulación, ubicado de 3 a 15 metros de una arteria del alto flujo vehicular con buena ventilación natural.

En la tabla II se presentan la concentración media, mínima, máxima y desviación estándar, de cada una de las variables analizadas en los dos sitios de muestreo. Las concentraciones máximas para PM₁₀ así como las medias del período de muestreo no sobrepasan los valores establecidos por el Decreto de Inmisiones de Contaminantes Atmosféricos de Costa Rica (Decreto 30221-SALUD) que establece 150 µgm⁻³ como valor de referencia para 24 horas y 50 µgm⁻³ como promedio anual.

Los dos sitios de muestreo seleccionados para el monitoreo de material particulado PM-10, representan zonas diferentes de la Ciudad de San José, la Catedral Metropolitana se encuentra apostada en el centro de la ciudad, que es una zona de alto flujo vehicular caracterizada por ser netamente comercial, mientras que la Junta de Educación se localiza

en una zona de transición entre el sector comercial y residencial de la capital de Costa Rica. Lo anterior se ve evidenciado en el hecho de que para el período de medición, las medias para ambos sitios resultaron ser significativamente diferentes entre sí, al aplicar la prueba de Kruskal-Wallis a un 5% de significancia, provocado por la influencia de las emisiones de fuentes móviles y las bajas velocidades de circulación de vehículos en la zona comercial de la capital.

TABLA II. Concentración media, máxima, mínima y desviación estándar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de las variables medidas en el material particulado PM10 colectado en dos sitios de la Ciudad de San José, Años 2004-2006.

	Catedral Metropolitana de San José				Junta de Educación de San José			
	PM 10	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	PM 10	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻
N	221	221	221	221	214	214	214	214
Máxima	88	1,08	3,21	11,25	60	0,71	4,15	5,54
Mínima	18	16,87	0,20	0,40	10	16,77	0,15	0,40
Media	41,9	4,48	0,97	1,36	27,2	4,46	0,98	1,16
Desviación Estándar	12,3	3,63	0,49	0,97	7,6	3,42	0,59	0,67

Al analizar la figura 1, se puede notar que para el sitio ubicado en la Catedral Metropolitana, el promedio anual de concentración de material particulado PM-10 presenta una tendencia a la baja de aproximadamente 10% anual, de forma tal que el nivel anual en el 2004 es significativamente diferente, con un 5% de significancia, al registrado para el año 2006.

Para el otro punto, ubicado en la zona de transición, los valores se han mantenido prácticamente constantes ya que las variaciones están comprendidas en el intervalo de incertidumbre del método de análisis.

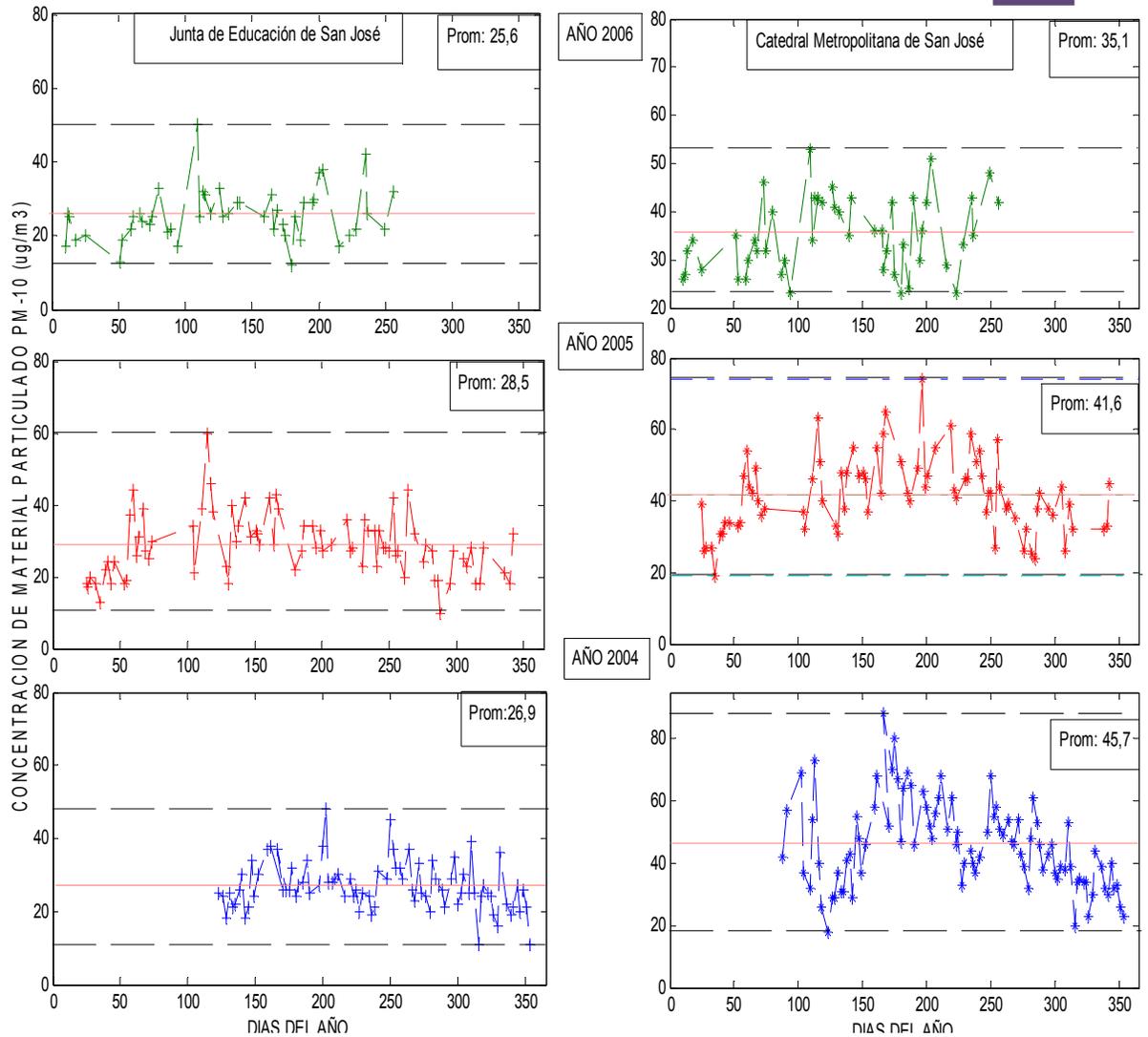


Figura 1. Variación anual de la concentración de material particulado PM-10 en la Ciudad de San José, Costa Rica años 2004-2006.

Para analizar la distribución de las concentraciones de PM_{10} y de los iones SO_4^{2-} , NO_3^- y Cl^- en los dos sitios de muestreo, se empleó la prueba de “Kolmogorov Smirnov”. Este contraste, que es válido únicamente para variables continuas, compara la función de distribución (probabilidad acumulada) teórica con la observada, y calcula un valor de discrepancia, que corresponde a la máxima en valor absoluto entre la distribución observada y la distribución teórica, proporcionando asimismo un valor de probabilidad P , que corresponde, si se está verificando un ajuste a la distribución normal, a la probabilidad de obtener una distribución que discrepe tanto como la observada si

verdaderamente se hubiera obtenido una muestra aleatoria, de tamaño n , de una distribución normal.

Como se puede apreciar en la tabla III, los valores de z resultaron ser mayores de 0,5, por lo que la distribución de las muestras no es normal para todos los parámetros evaluados. Además esta prueba estadística muestra, que los resultados obtenidos probablemente provengan de una misma población pero no de la misma fuente. Como se menciona anteriormente, esta prueba compara la distribución de frecuencia acumulada con la distribución observada y con esto se puede inferir que únicamente los valores de concentración para PM_{10} -Catedral y PM_{10} -Junta a diferencia de los iones $SO_4^{=}$, NO_3 y Cl^- de los dos sitios de muestreo, determinan el punto en el que estas dos distribuciones muestran la mayor divergencia.

Tal como se observa en la tabla IV, el sulfato es el ion que presenta la mayor concentración durante el análisis, lo anterior por el hecho de que en el presente se siguen emitiendo importantes concentraciones de SO_2 , tanto desde fuentes fijas como móviles, debido a la utilización en el país, de combustibles con altos contenidos de azufre, cercanos al 0,45% en el caso del diesel (utilizado por el 100% de la flotilla de transporte público) (Herrera et al., 2006). Para este ion en particular y a diferencia de los otros, se presenta un valor de concentración anual para el 2005, diferente con un 5% de significancia, a las medias para los años 2004 y 2006. Durante ese año se presentó un patrón anormal en el comportamiento de los vientos, que se caracterizó por una reducción hasta de un 45% en la velocidad en los meses de época lluviosa y la presencia de vientos predominantes del norte-noreste y este. Si se comparan los valores obtenidos para los aniones con los reportados por Báez et al.(2007) para el sector sur de la Ciudad de México se puede observar que resultan menores las medias, con excepción del cloruro en donde los valores para San José son casi un 60% mayores.

TABLA III. Resultados obtenidos al aplicar la prueba estadística de Kolmogorov-Smirnov a los datos de material particulado PM10 y aniones en los sitios de muestreo.

	Catedral Metropolitana de San José				Junta de Educación de San José			
	PM 10	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	PM 10	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻
N	221	221	221	221	214	214	214	214
Parámetros Normales:								
Media	41,9	4,44	0,96	1,35	27,2	4,46	0,98	1,15
Desviación Estándar	12,28	3,63	0,50	0,98	7,60	3,43	0,60	0,67
Diferencias más extremas:								
Absoluta	0,077	0,268	0,089	0,128	0,099	0,255	0,149	0,112
Positiva	0,077	0,268	0,089	0,128	0,099	0,255	0,149	0,112
Negativa	-0,048	-0,173	-0,071	-0,108	-0,061	-0,156	-0,095	-0,082
Z Kolmogorov-Smirnov	1,142	3,981	1,319	1,898	1,449	3,734	2,185	1,641
Asymp. Sig	0,148	0,000	0,062	0,001	0,030	0,000	0,000	0,009

TABLA IV. Promedios anuales de la concentración de sulfatos, nitratos y cloruros presentes en el material particulado PM-10 para los dos sitios de monitoreo ubicados en la Ciudad de San José, años 2004-2006

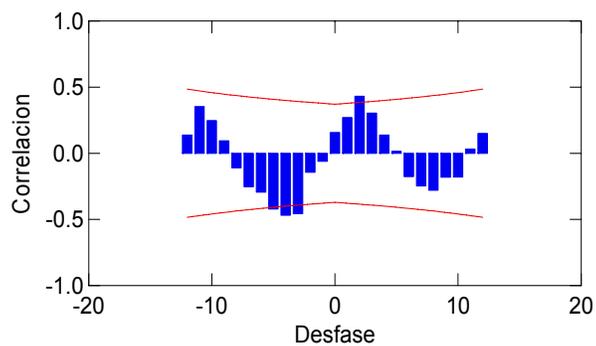
Sitio de monitoreo	Año	Promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mediana ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Desviación Estándar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Varianza ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ²	Rango ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
SULFATO						
Catedral Metropolitana de San José	2004	2,73	2,66	0,61	0,37	1,72
	2005	6,96	6,25	3,69	13,6	9,60
	2006	2,86	2,77	0,50	0,25	1,61
Junta de Educación de San José	2004	2,50	2,59	0,52	0,27	1,67
	2005	7,15	6,80	3,01	9,07	8,71
	2006	2,88	2,90	0,47	0,22	1,25
NITRATO						
Catedral Metropolitana de San José	2004	0,86	0,84	0,30	0,09	0,83
	2005	1,06	1,11	0,21	0,04	0,63
	2006	1,04	0,83	0,50	0,25	1,30
Junta de Educación de San José	2004	0,83	0,86	0,28	0,08	0,73
	2005	1,14	1,06	0,22	0,05	0,76
	2006	1,13	0,86	0,69	0,47	2,08

CLORURO						
Catedral Metropolitana de San José	2004	1,30	1,39	0,42	0,18	1,38
	2005	1,29	1,20	0,51	0,26	1,75
	2006	1,36	1,30	0,48	0,23	1,29
Junta de Educación de San José	2004	1,15	1,09	0,38	0,15	1,19
	2005	1,13	1,20	0,39	0,15	1,13
	2006	1,29	1,26	0,41	0,23	1,22

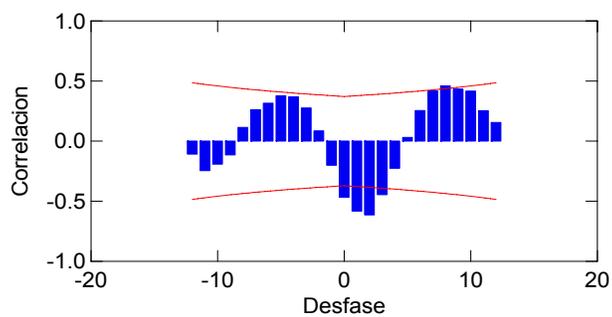
17

En forma adicional se realizó un análisis de correlación cruzada entre los datos de PM10 obtenidos para ambos sitios y algunas de las variables meteorológicas que se han registrado en los tres años de estudio, especialmente la temperatura diaria promedio, la velocidad del viento y el nivel de precipitaciones. La correlación entre los datos de concentración de material particulado y lluvia presenta ciclos de aproximadamente seis meses (figura 2), en donde los valores más altos se registran en la época lluviosa, cuando al aumentar los niveles de precipitación se incrementan las concentraciones de material particulado, sin embargo después del sexto mes de inicio de la época lluviosa comienza una inversión del patrón conforme al cual, al disminuir las precipitaciones se da un incremento en la concentración de PM 10. Al analizar las relaciones con la temperatura promedio diaria, se observan también que de marzo a agosto de cada año se da una correlación positiva entre la temperatura y la concentración de PM-10 mientras que en los meses restantes se cambia el patrón donde al disminuir la temperatura aumenta la concentración de PM10. Los dos patrones de correlación anteriores se contraponen a la tendencia presentada para el caso de la velocidad del viento. Es importante resaltar que existe una fuerte correlación entre los datos de temperatura y precipitaciones con respecto a la velocidad del viento, tal como se muestra en la tabla V, de tal forma que durante la época lluviosa (mayo-noviembre) los valores promedios mensuales de velocidad del viento disminuyen hasta en un 55% causando un incremento en los niveles de precipitación y temperatura, además de un descenso en la capacidad de remoción de contaminantes, situación que explica los mayores niveles de PM10 durante la época lluviosa.

PM10-Precipitaciones,Junta de Educacion



PM10-Vel.Viento,Junta Educacion



PM10-Temperatura,Junta de Educacion

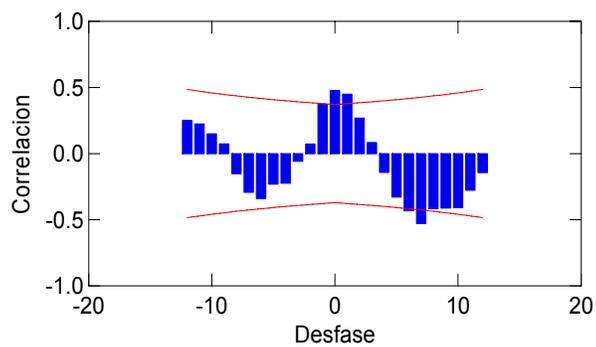


Figura 2. Gráficas de correlación cruzada para los niveles de concentración de PM-10 en el sitios de monitoreo ubicado en la Junta de Educación de San José y los parámetros meteorológicos, 2004-

2006

TABLA V. Matriz de coeficientes de correlación de Spearman aplicada a las muestras de material particulado PM10 recolectadas en la Ciudad de San José, Costa Rica: 2004-2006.

	PM-10 Junta	PM-10 Catedral	Precipitaciones	Temperatura	Velocidad del Viento
PM-10 Junta	1,000				
PM-10 Catedral	-0,073	1,000			
Precipitaciones	0,123	0,263	1,000		
Temperatura	0,441	0,688	0,373	1,000	
Velocidad del viento	-0,421	-0,354	-0,804	-0,668	1,000

Los valores en negrilla representan $p < 0,02$, $n = 29$

Es importante mencionar que durante los primeros meses de la época seca se produce en forma adicional un descenso considerable en la cantidad de vehículos que circulan en la ciudad debido al período de vacaciones de las instituciones educativas (primaria, secundaria y universitaria) del país.

A partir de las observaciones anteriores, se procedió a construir un modelo de regresión múltiple que permita, mediante el uso de variables meteorológicas independientes, predecir las concentraciones de material particulado PM-10 en la Ciudad de San José. Para el sitio de muestreo localizado en la Junta de Educación de San José, se obtuvo el siguiente modelo ajustado de regresión lineal múltiple:

$$PM_{10} (\text{Junta de Educación}) = 44,8 + 0,887 T - 2,254 VV - 1,04 P \quad (1)$$

Donde:

T: temperatura promedio diaria (°C)

VV: velocidad del viento (km/h)

P: nivel de precipitaciones (l/m²)

El análisis de varianza realizado muestra que el modelo es significativo ya que se obtuvo un valor de $p = 0,011$ cercano a cero por lo tanto se rechaza la hipótesis nula de que la variabilidad observada en la concentración de material particulado sea explicada por el azar y se admite que hay asociación entre esta y las variables meteorológicas.

Para medir la bondad del ajuste se utilizó el término R cuadrado corregido (0,352), a partir del cual se puede inferir que si se conocen los datos de velocidad del viento, temperatura promedio diaria y precipitaciones se puede hacer una predicción de la concentración de PM-10 donde la incertidumbre está disminuida en un 35% con respecto a la original.

En la tabla VI se muestran los resultados del análisis de correlación de Spearman, entre las concentraciones de PM₁₀ y aniones presentes en el sitio de muestreo ubicado en la Catedral Metropolitana y las correspondientes a la Junta de Educación. De esta, se puede inferir que no existe una buena correlación de las concentraciones entre sitios, lo que permite presumir que a pesar de que las concentraciones de aniones en material particulado no son significativamente diferentes en los dos sitios, la naturaleza de las

fuentes de emisión y los procesos que afectan los niveles de inmisiones de contaminantes en ambos sitios es distinta.

Es importante señalar, que tanto en la Catedral como en la Junta de Educación se observa una correlación significativa entre los niveles de material particulado PM10 y las concentraciones de sulfato y nitrato a un nivel de significancia de $p < 0,02$, por lo que es probable que la presencia de los iones SO_4^{2-} , NO_3^- , determinen la acidez de las partículas y que la acidez esta dada por H_2SO_4 .

TABLA VI. Matriz de correlaciones de Spearman entre las concentraciones de PM10 y aniones para cada uno de los sitios de muestreo, ubicados en la Ciudad de San José.

		Catedral Metropolitana de San José				Junta de Educación de San José			
		PM 10	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	PM 10	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-
Catedral Metropolitana de San José	PM 10	1,000							
	SO_4^{2-}	0,393	1,000						
	NO_3^-	0,437	0,601	1,000					
	Cl^-	0,084	0,149	0,278	1,000				
Junta de Educación de San José	PM 10	0,199	0,143	0,103	0,006	1,000			
	SO_4^{2-}	-0,031	0,252	0,086	-0,191	0,417	1,000		
	NO_3^-	0,064	0,118	0,084	-0,090	0,396	0,550	1,000	
	Cl^-	0,065	-0,159	-0,058	0,080	-0,013	-0,006	0,198	1,000

Los valores en negrilla representan $p < 0,02$, $n= 29$

Al aplicar el análisis de componentes principales para los datos analíticos (PM_{10} , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^-) y las variables meteorológicas predominantes durante el muestreo, se obtiene que para ambos sitios de monitoreo, aproximadamente, el 65% de la varianza total puede ser explicada por dos factores. En ambos casos el primer factor PC1 (ver tabla VII), muestra una fuerte relación entre la velocidad del viento y la concentración de cloruro, por lo que se puede concluir que el principal aporte a la concentración de este ion es de origen marino, ya que la dirección de los vientos predominantes en la ciudad es este-noreste provenientes del Mar Caribe. El segundo factor PC2, para los dos sitios, evidencia la influencia de las actividades antropogénicas sobre la calidad del aire de la ciudad, ya que indica una relación importante entre el sulfato, nitrato, PM_{10} y la temperatura como variable meteorológica.

TABLA VII. Matriz de valores para los componentes principales obtenidos de los muestreos de material particulado PM_{10} en la ciudad de San José, 2004-2006.

Variables	Catedral Metropolitana		Junta de Educación	
	PC1	PC2	PC1	PC2
PM 10	0,401	0,677	-0,396	0,748
Lluvia	0,540	0,090	-0,863	-0,055
Temperatura	0,377	0,687	-0,626	0,657
Velocidad del Viento	0,698	-0,383	0,886	-0,314
Sulfato	-0,172	0,842	0,040	0,819
Nitrato	0,027	0,567	0,127	0,615
Cloruro	0,566	0,298	0,601	0,085
Porcentaje de Varianza Explicado	32,6	31,5	35,1	30,7

Los valores de PC > 0,5 se consideran significativos.

La principal influencia de la temperatura se da sobre los nitratos presentes en los aerosoles, ya que estos se distinguen de los sulfatos por la volatilidad del NO_3^- (como ácido nítrico) y del NH_4NO_3 (como $\text{NH}_3 + \text{HNO}_3$). El equilibrio



es tal que a condiciones ambientales, las presiones parciales del amoníaco y del ácido nítrico son despreciables sobre el NH_4NO_3 cristalino lo mismo que sobre disoluciones que contengan iones amonio y nitrato. Debido a esto es necesario considerar ese equilibrio como una función de la concentración o en forma equivalente de la actividad acuosa.

Dióxido de Nitrógeno:

Al analizar los promedios anuales obtenidos para este gas, en el período 2004 - 2006 (tabla VIII) se puede observar que en al menos 3 sitios de la ciudad (Hospital San Juan de Dios, Catedral Metropolitana y Avenida 10) se supera el valor recomendado por la Organización Mundial de la Salud como referencia mensual de NO_2 de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Es importante aclarar, que dichos sitios se encuentran localizados en los principales accesos a la ciudad por los sectores norte y oeste, además de constituir unas de las vías con mayor flujo vehicular de la ciudad.

Se utilizó el análisis de componentes principales para estudiar las variaciones espaciales de la concentración de dióxido de nitrógeno en los 14 sitios de muestreo ubicados en la ciudad de San José. Janssen et al (1989) han utilizado esta herramienta estadística, con anterioridad, para distinguir entre fenómenos locales y de larga escala en el análisis de contaminación del aire.

El valor y signo de cada uno de los factores que conforman los componentes principales permite diferenciar si las características de las fuentes de emisión locales afectan las concentraciones locales de cada uno de los sitios de monitoreo. Estos resultados pueden ser utilizados para validar la clasificación de los sitios de monitoreo. La tabla IX resume los resultados del análisis estadístico para los datos promedio mensuales de dióxido de nitrógeno en el período 2004-2006.

El porcentaje de la varianza total ($\text{Varianza} = \sum (X_{\text{modelo}} - X_{\text{medida}})^2$) explicado por el primer factor corresponde a un 29%, lo que implica que las concentraciones de NO_2 en los distintos sitios de monitoreo están fuertemente correlacionadas (cambios en fase). Lo anterior indica que las variaciones en la concentración de este gas están determinadas principalmente por fenómenos de larga escala (meteorológicos). El segundo componente muestra valores negativos para los sitios ubicados al sur de la ciudad mientras y positivos para aquellos ubicados en el sector norte, lo que hace presumir un gradiente sur-norte, con concentraciones menores en los sitios ubicados al sur de la Ciudad de San José.

TABLA VIII. Promedios anuales de la concentración de dióxido de nitrógeno para los sitios de monitoreo ubicados en la Ciudad de San José, año 2005-2006

Sitio de monitoreo	Valor máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Valor mínimo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mediana ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Desviación Estándar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Varianza ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ²
1	57	36	48	48	6,0	36
2	60	36	46	43	6,9	47,2
3	45	25	32	30	6,6	44,1
4	53	32	43	42	6,2	38,1
5	34	22	27	27	4,1	17,1
6	42	20	27	24	6,2	38,6
7	45	15	28	25	8,3	69,2
8	38	19	25	23	5,8	34,2
9	31	14	22	21	5,7	32,7
10	54	16	35	38	11,1	123,1
11	40	30	35	34	3,8	14,2
12	48	18	30	25	9,8	96,1
13	37	17	25	25	6,5	42,1
14	43	21	34	37	6,4	40,4

Tabla IX. Resumen de los resultados del análisis de componentes principales utilizando los promedios mensuales de NO₂ registrados para los 14 sitios ubicados en la Ciudad de San José, 2004-2006.

	Primer Componente	Segundo Componente	Tercer Componente
Varianza Total Explicada	29%	2%	1%
Factores con valores < 0		Sitio 3 -0,800 Sitio 5 -0,550 Sitio 10 -0,306	Sitio 12 -0,515 Sitio 7 -0,424 Sitio 4 -0,416
Factores con valores > 0	Valores mayores: Sitio 1 0,990 Sitio 6 0,954 Sitio 13 0,931 Sitio 9 0,913 Sitio 11 0,867 Valores menores: Sitio 3 0,465	Sitio 12 0,693 Sitio 11 0,321	Sitio 8 0,434 Sitio 1 0,270 Sitio 3 0,235

II. Indicadores de Presión

Estos indicadores describen las presiones que ejercen las diferentes actividades humanas sobre el ambiente y los recursos naturales. Un ejemplo de indicador de presión sobre la calidad del aire son las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera.

Los indicadores de presión se clasifican a su vez en dos grupos: el primero considera las presiones directas sobre el ambiente, frecuentemente ocasionadas por las actividades humanas, tales como emisiones contaminantes. El segundo toma en cuenta las actividades humanas en sí mismas, es decir, las condiciones de aquellas actividades productivas o de otro tipo que generan la problemática; por ejemplo, la evolución y características de la planta vehicular. Estos últimos son denominados indicadores de presión indirecta y ofrecen elementos para pronosticar la evolución de la problemática, así como también ayudan a definir las acciones y políticas en materia ambiental que deben aplicar los sectores causantes para revertir el problema.

1. Crecimiento de la Flota Vehicular:

En la GAM entre 1991 y 2003 se experimentó un crecimiento mucho más rápido del consumo de gasolina que de diesel. Esto indica que gran parte del nuevo consumo es para uso de vehículos particulares y no de trabajo y que la motorización crece en esta región de manera muy rápida al igual que en el resto del país. La estructura de la flota vehicular costarricense es muy diferente a la que prevalece en los países desarrollados, por supuesto lo más importante es su VEJEZ: la edad de la flota vehicular en Costa Rica es muy alta. Pero también es diferente su composición. En Costa Rica la proporción de motocicletas y autobuses es mucho más alta, además la cantidad de automóviles diesel es mucho menor que en los países europeos (Pujol, 2004).

Tal y como se puede apreciar en la figura 3, un 67 % de la flotilla vehicular esta compuesta por vehículos particulares, de forma tal que existe 1 vehículo por cada 1,65 familias según datos de la última Encuesta de Hogares realizada en el año 2007.

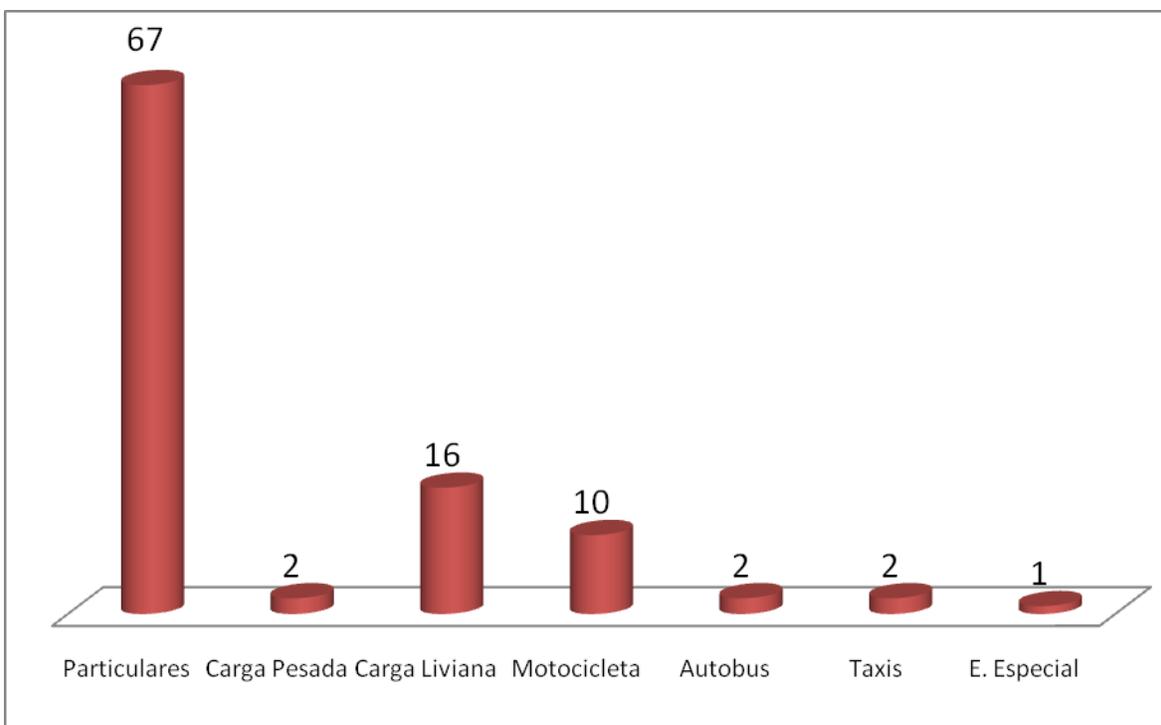


Figura 3. Composición de la Flotilla Vehicular del país para el año 2006. Fuente: Estudio de Vialidad, PRUGAM

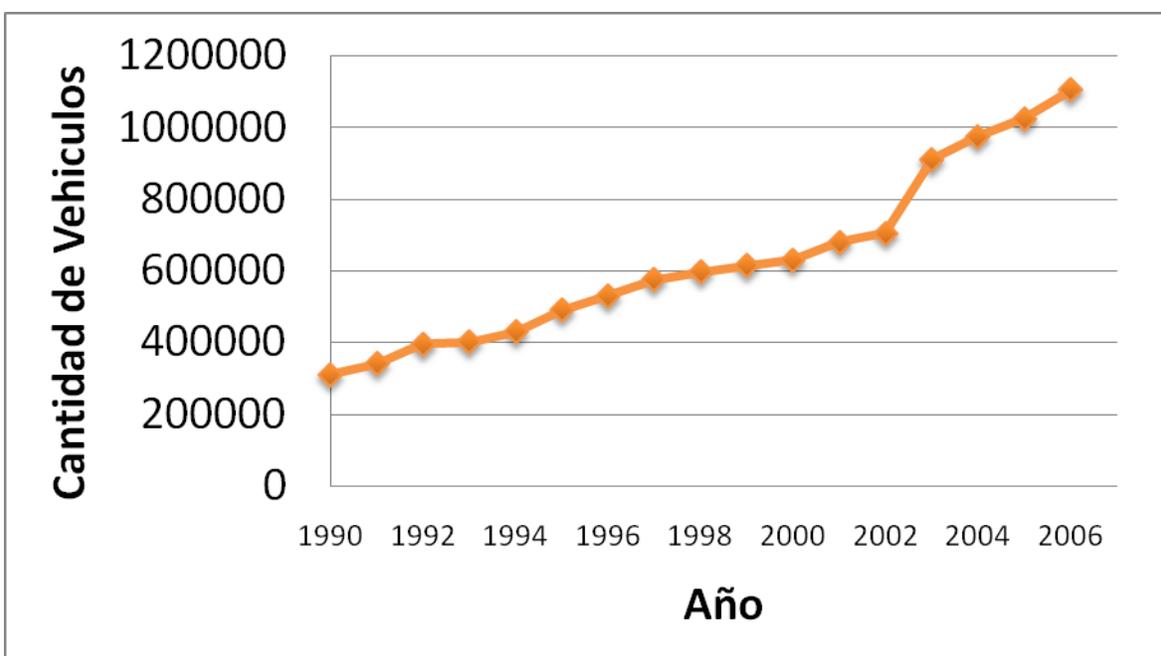


Figura 4. Variación Anual de la cantidad de vehículos que componen la flotilla vehicular del país. Fuente: Estudio de Vialidad, PRUGAM

Si se analiza el comportamiento de la cantidad de vehículos que circulan en el país se puede determinar que desde el año 1990 hasta la fecha, la flota vehicular ha venido creciendo a una tasa promedio de 8,45% anual y en el caso de vehículos particulares se registra un crecimiento mucho mayor cercano al 14,5%. En ambos casos se han mantenido las tasas promedio en los últimos años, a pesar de la crisis petrolera que ha ocasionado que el precio de los combustibles se dispare.

2. Movilidad en la Ciudad de San José:

A pesar de las tasas de crecimiento registradas para la flota vehicular en la última década, la infraestructura vial no ha experimentado el mismo nivel de desarrollo. La falta de semaforización en intersecciones, señalización, construcción de enlaces viales, cruces a desnivel y ampliación de carriles han hecho que la velocidad de circulación promedio de los vehículos en la ciudad disminuya con lo cual se eleva la generación de emisiones de gases contaminantes. En la tabla X se presentan las tasas de flujo vehicular en distintos puntos de la ciudad de San José.

TABLA X. Flujos Vehiculares medidos en algunos puntos de la Ciudad de San José durante el año 2007. Fuente: Estudio de Vialidad, PRUGAM

Sitio de medición	Hora de medición	Dirección	Vehículos por hora
Plaza González Víquez	7 am a 8 am	N-S	781
		S-N	1233
Rotonda de la Y Griega	6:30 a 7:30 am	E-O	1576
		O-E	916
La Uruca Frente a Capris	7:45 a 8:45 am	E-O	935
		O-E	899
Pavas frente a AyA	7:45 a 8:45 am	E-O	1085
		O-E	754
Terminal de Buses Los Caribeños	7 am a 8 am	N-S	1793
		S-N	525

3. Tasas de Generación de Emisiones de contaminantes en fuentes fijas:

Desde el año 2002, el Ministerio de Salud en conjunto con el Ministerio de Ambiente y Energía publicaron el decreto 30222-SALUD-MINAE, el cual regula los niveles máximos de emisión de contaminantes atmosféricos generados por calderas, las cuales constituyen las únicas fuentes de emisión normadas en el país. A partir de los registros de reportes

operacionales de la Dirección de Protección al Ambiente Humano del Ministerio de Salud se puede estimar que operan 54 calderas autorizadas en el Cantón Central, de las cuales un 64% trabaja con Búnker, un 30% con diesel y el restante 6% con gas. En forma adicional un 71% de las mismas son de categoría C, generando presiones de vapor relativamente bajas.

Al analizar los reportes operacionales se puede concluir que las calderas ubicadas en el cantón generan un promedio de 96 mg/m^3 de partículas suspendidas totales, 674 mg/m^3 de óxidos de nitrógeno y 1479 mg/m^3 de dióxido de azufre generando caudales promedio que se distribuyen en una intervalo desde 6570 a 23 450 m^3/h con jornadas de operación promedio de 9 horas.

III. Indicadores de Estado: Año 2007

1.1. Material Particulado PM-10:

Al analizar los resultados obtenidos durante el año 2007 se puede observar que para ambos sitios de muestreo no se sobrepasa en ningún día de medición, la norma nacional para 24 horas que corresponde a 150 ug/m^3 . De igual forma, al observar los promedios anuales de ambos puntos se puede establecer que no se supera la norma nacional que establece 50 ug/m^3 como valor de comparación.

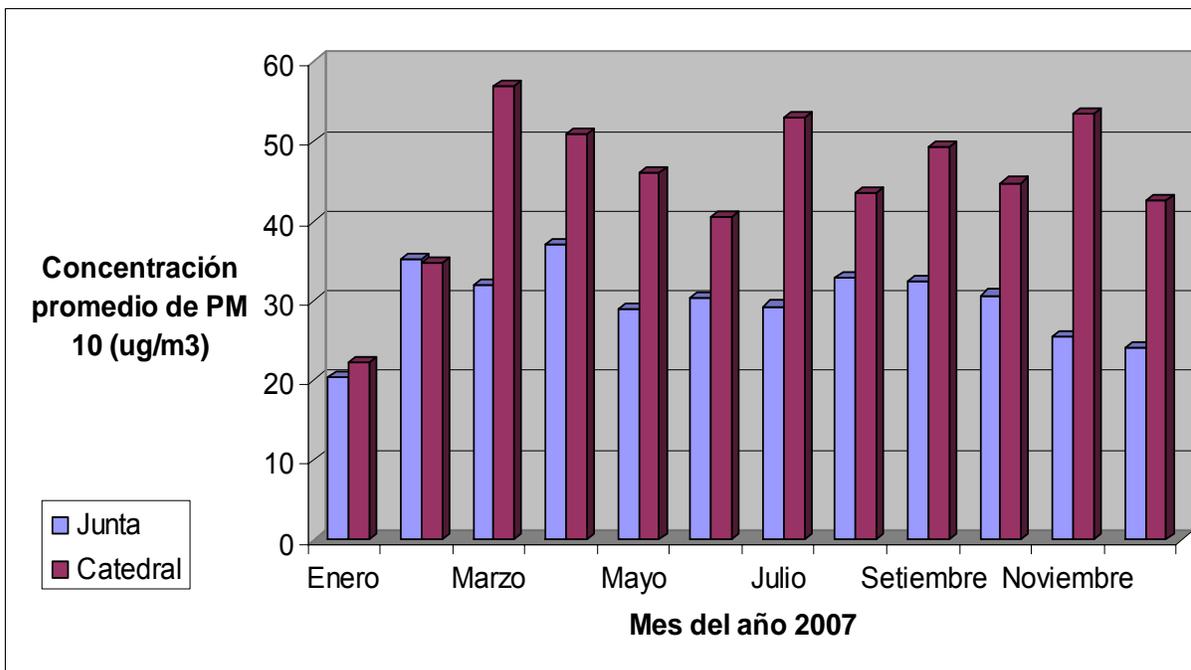


Figura 5. Variación de los promedios mensuales de material particulado PM 10 registrados para los dos sitios de muestreo ubicados en la Ciudad de San José, Año 2007

En la figura 5, se muestra el comportamiento de los promedios mensuales de concentraciones de material particulado PM 10 obtenidos para el sitio ubicado en la Catedral Metropolitana de San José, donde se puede inferir que durante la época seca (diciembre-abril) los valores tienden a ser menores que los promedios registrados durante la época lluviosa (mayo-noviembre). Lo anterior se podría explicar debido al hecho de que durante la

época seca, la velocidad promedio del viento es alrededor de un 55% mayor a la registrada en época lluviosa, por lo que hay una mayor capacidad de remoción de contaminantes y un descenso en las temperaturas promedio registradas. En forma adicional, durante los meses de diciembre y enero, la mayoría de instituciones educativas del país se encuentran en período de vacaciones con lo cual disminuye considerablemente el flujo vehicular en la ciudad. La dirección de los vientos en la Ciudad de San José es predominantemente Noreste-Este durante todo el año sin cambios significativos.

Al analizar la matriz de correlaciones de Pearson (Tabla XI) existente entre los promedios mensuales de PM10 y las variables meteorológicas se puede constatar que la temperatura es el único parámetro que presenta una correlación significativa con los niveles de material particulado. Es importante destacar como la velocidad del viento, determina el comportamiento de las precipitaciones y la temperatura promedio registrada en la ciudad de San José durante el período de muestreo.

TABLA XI. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson aplicada a las concentraciones de material particulado PM10 y variables meteorológicas registradas en la Ciudad de San José, Costa Rica: Año 2007.

	PM 10	Lluvia	Temperatura	Velocidad del Viento
PM 10	1,000			
Lluvia	0,344	1,000		
Temperatura	0,580	0,413	1,000	
Velocidad del viento	-0,398	-0,879	-0,639	1,000

Los valores en negrilla representan $p < 0,02$, $n = 13$

1.2. Concentración de aniones presentes en el material particulado PM-10:



Al analizar los promedios anuales obtenidos para la concentración de sulfatos, nitratos y cloruros en material particulado PM10 (tabla XII), se puede observar que las concentraciones para ambos sitios no son significativamente diferentes a un nivel de significancia del 5%, exceptuando el caso del ión sulfato.

Si se comparan los valores obtenidos para el contenido de sulfatos en material particulado PM10 con los reportados por Mariani et al. 2007, para Río de Janeiro ($1,12 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Moya et al. 2003, para la Ciudad de México ($3,54 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se puede observar que las medias en la Ciudad de San José son mayores a los registrados para ambos sitios, lo anterior debido probablemente a la utilización, en Costa Rica, de combustibles fósiles con alto contenido de azufre, que para el caso del diesel oscila entre 4000 – 4500 ppm según datos de la Refinadora Costarricense de Petróleo.

TABLA XII. Promedios anuales de la concentración de aniones presentes en el material particulado PM-10 para los dos puntos de monitoreo de la Ciudad de San José, año 2007

Anión	Valor máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Valor mínimo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mediana ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Desviación Estándar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Varianza ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ²
Catedral Metropolitana de San José						
Sulfato	12,36	1,30	4,83	4,78	2,2	4,8
Nitrato	0,98	0,12	0,30	0,25	0,1	0,01
Cloruro	3,98	0,20	1,40	1,43	0,91	0,83
Junta de Educación de San José						
Sulfato	7,02	1,05	2,91	2,90	1,3	1,6
Nitrato	0,50	0,14	0,25	0,32	0,09	0,01
Cloruro	2,85	0,19	0,88	1,02	0,59	0,35

El análisis de componentes principales se aplicó al conjunto de variables químicas, con el fin de determinar la influencia de fuentes antropogénicas o naturales en la composición del material particulado recolectada en el área de estudio, realizando una interpretación y evaluación adecuada de las interrelaciones existentes en el set de datos bajo estudio. El software utilizado fue SYSTAT para Windows versión 11.

Para realizar este análisis estadístico se utilizaron los promedios mensuales y desviaciones estándar de las concentraciones de los aniones presentes en el material particulado y las variables meteorológicas para los sitios de muestreo. En la primera etapa se utilizó la matriz de correlaciones de Pearson (tabla XIII) como insumo para el análisis de componentes principales.

TABLA XIII. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson aplicada a las concentraciones de material particulado PM10, aniones y variables meteorológicas registradas en la Ciudad de San José, Costa Rica: Año 2007.

	PM 10	Lluvia	Temperatura	Velocidad del Viento	Sulfato	Nitrato	Cloruro
PM 10	1,000						
Lluvia	0,344	1,000					
Temperatura	0,580	0,413	1,000				
Velocidad del Viento	-0,398	-0,879	-0,639	1,000			
Sulfato	0,583	0,255	0,459	-0,419	1,000		
Nitrato	0,417	0,326	0,343	-0,245	0,576	1,000	
Cloruro	-0,601	-0,822	-0,710	0,898	-0,300	-0,537	1,000

Los valores en negrilla representan $p < 0,05$, $n = 13$

Al aplicar el análisis de componentes principales se puede observar que el 73% de la varianza de los datos crudos se debe a dos factores (tabla XIV), cuyos valores de Eigen, son mayores a uno. En forma adicional se aplicó la rotación varimax al set de datos con el fin de interpretar mejor los componentes extraídos. El primer factor PC1 explica aproximadamente el 58% de la varianza total de los datos y muestra una importante correlación entre la concentración de material particulado PM10, la temperatura y las precipitaciones. Mientras que el segundo factor PC2, responsable del 15% de la varianza total, relaciona fuertemente las concentraciones de material particulado, sulfato y nitrato infiriendo una fuerte contribución antropogénica.

TABLA XIV. Matriz de valores para los componentes principales obtenidos de los muestreos de material particulado PM10 en la ciudad de San José, 2007.

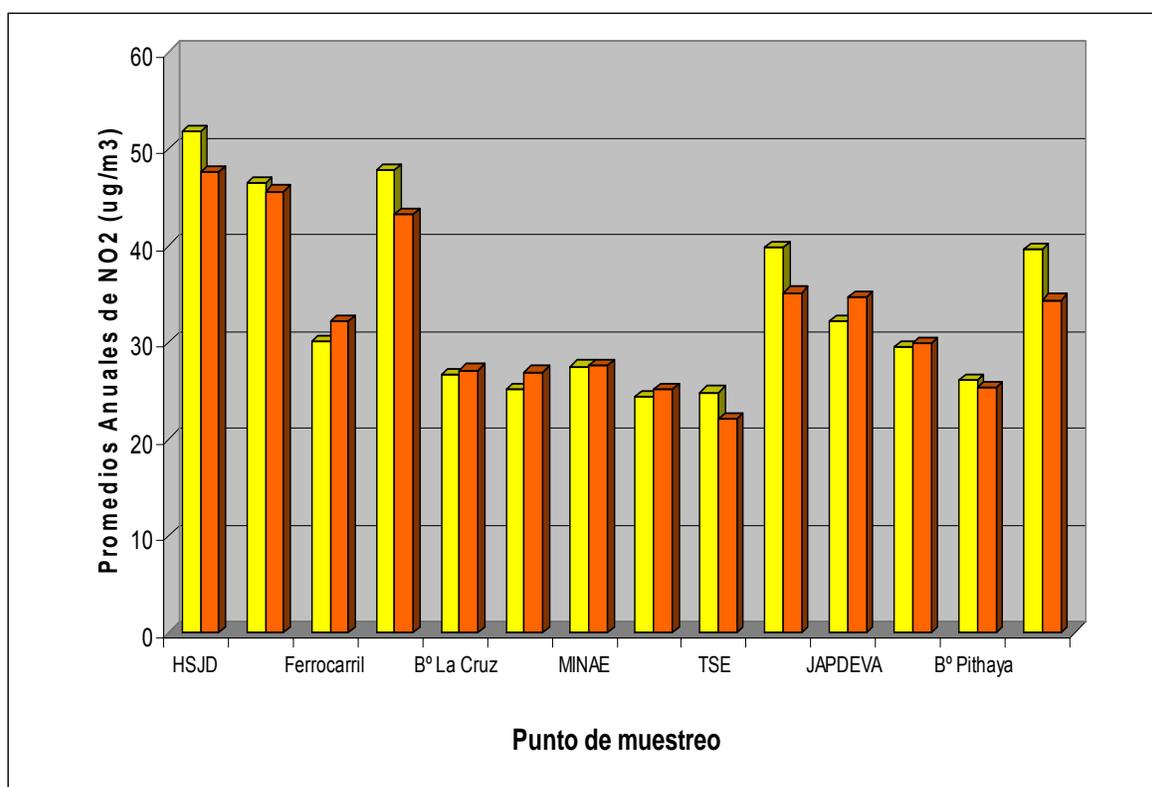
Variables	PC1	PC2
PM 10	0,711	0,489
Lluvia	0,801	-0,495
Temperatura	0,793	0,219
Velocidad del Viento	-0,887	0,342
Sulfato	0,450	0,587
Nitrato	0,115	0,538
Cloruro	-0,947	0,229

Los valores de PC > 0,5 se consideran significativos.

Cabe la pena mencionar la fuerte correlación existente entre los niveles de cloruros presentes en el material particulado y las variables meteorológicas específicamente, la velocidad de viento y las precipitaciones, lo que permite señalar la influencia marina sobre todo si se toma en cuenta que la dirección del viento predominante en la ciudad de San José es este- noreste procedente de la costa atlántica del país. Los promedios mensuales de cloruros presentes en el material particulado son mayores en época seca que lluviosa, donde las velocidades del viento son mayores hasta en un 55%.

1.3. Dióxido de Nitrógeno

Al analizar los promedios anuales obtenidos para este gas (tabla IX) se puede observar que en al menos 5 sitios de la ciudad (Hospital San Juan de Dios, Catedral Metropolitana, Paseo de los Estudiantes, Barrio Cuba y Avenida 10) se supera el valor recomendado por la Organización Mundial de la Salud como referencia mensual de NO_2 de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Amarillo: Año 2007, Naranja: Año 2006

Figura 6. Promedios anuales de Dióxido de Nitrógeno para los 14 sitios de medición de la Ciudad de San José durante el año 2007.

IV. Indicadores de Respuesta

Gestión Municipal en el proceso de reducción de la contaminación de aire en el Cantón Central de San José

La Municipalidad de San José en su función de gobierno local y sustentado en marco jurídico institucional tiene el deber de velar por el bienestar ambiental de los y las habitantes del cantón Central de San José.

El proceso de gestión ambiental busca incidir de forma directa e indirecta sobre los factores que contribuyen con la generación de la contaminación del aire, esta tarea es de índole política, administrativa, técnica y operativa tanto al interior del quehacer municipal como con los diferentes actores sociales que interactúan en el territorio de jurisdicción municipal.

La gestión municipal es compleja e implica un reto para la municipalidad a mediano y largo plazo ya que en la contaminación del aire intervienen tanto fuentes móviles como fijas resultado de las diferentes actividades industriales, comerciales y de servicio, y naturales que se desarrollan en el cantón o fuera de él.

Desde esta perspectiva, existen diversas formas de coadyuvar con el proceso de reducción de la contaminación del aire en el municipio. Con base al marco de competencia municipal en ambiente la Institución realiza tanto acciones mediante la ejecución de obras, programas y proyectos, que complementa con la creación de políticas y estrategias en coordinación con el Gobierno Central, organizaciones no gubernamentales, municipios vecinos, universidades, la empresa privada y la comunidad entre otros.

En el marco de intervención municipal institucional se ha venido trabajando desde la perspectiva preventiva con varias iniciativas que se han institucionalizado como programas y proyectos:

- Transferencia de información y conocimiento de la educación ambiental.



- ✘ Charlas a la comunidad sobre la temática de arborización urbana. Durante el periodo 2005 al 2007 los resultados obtenidos fueron:

- Participación de 1360 niños,
- 91 charlas
- 34 actividades de plantación.

- Construcción de bulevares y vías peatonales en el centro capitalino como áreas de amortiguamiento. El objetivo es disminuir el flujo vehicular y con esto las emisiones de los automotores; propiciando además zonas para que los peatones se las apropien. Actualmente se han construido los siguientes espacios:

Tabla XV. Construcción de bulevares en la Ciudad de San José.

Lugar	Dimensión
Avenida Central	9 cuadras
Avenida cuatro	14 cuadras
Calle 17	2 cuadras
Calle 2	4 cuadras
Calle 3	2 cuadras
Calle 11 bis	1 cuadra
Proyectados :	
Calle 8	de avenida 3 a avenida 10
Calle 3	de avenida 2 a avenida 6
Calle 2	de avenida 6 a avenida 20
Avenida Central	de calle 9 a calle 14

- Programa de bosque urbano que entre sus objetivos relacionados con el componente de calidad de aire busca el aumento de la fijación de carbono y la producción de oxígeno aunado al aporte de lograr mayor confort urbano, valor escénico, protección de suelo contra la erosión y atracción de fauna urbana.

Los resultados obtenidos entre 2004 y 2007 en el PLANARBU es la siembra de 10,000 árboles. En el marco del programa del bosque urbano 2007-2011 se proyecta la siembra de 450,000 unidades (árboles, arbustos, palmeras y plantas ornamentales).

- Sistema de vigilancia y monitoreo de la calidad del aire por fuentes fijas y móviles. Este accionar se realiza en el marco del convenio de cooperación entre la MSJ y la Universidad Nacional
- Monitoreo ambiental al sector industrial con el objetivo de controlar y regular la actividad. El accionar ha ido acompañado de visitas desde 1999 donde se valoran los impactos ambientales. Uno de los instrumentos de trabajo fue el establecimiento de los protocolos ambientales orientados a establecer compromisos de reducción de la contaminación por parte de las empresas.
- Monitoreo de talleres y terminales de buses: En el año 2007 se intervinieron 28 planteles en varios distritos del cantón para regulación y control ambiental.
- Apoyo en la reactivación del tren en la ruta Pavas – San Pedro con el propósito de estimular el transporte masivo de personas en un medio que se busca sea más rápido y eficiente.

En el ámbito de la gestión intersectorial el esfuerzo se ha orientado a la coordinación de iniciativas de interés público, donde la solución de la problemática ambiental implica el compromiso de los diferentes actores sociales.

- **Participación en comisiones de concertación a nivel sectorial.** Los temas abordados se han orientado a los siguientes aspectos.
 - ✘ Restricción al ingreso de vehículos al centro por número de placa
 - ✘ Priorización del transporte Público en la ciudad.
 - ✘ Propuesta de rutas de desplazamiento de vehículos privados (conectores viales)
 - ✘ Jerarquización vial: rutas primarias , secundarias y otras
 - ✘ Mejoramiento de paradas de buses.
 - ✘ Sistematización de transporte público : rutas diametrales e intersectoriales

- ✘ Participación en la Comisión Interinstitucional de Emisiones (Elaboración de Reglamento de Emisiones y revisión del Reglamento de Calderas).
- ✘ Participación en el Programa Calidad de Aire GTZ-MOPT.
- ✘ Participación en inventario de fuentes fijas Swiss Contact- MInSalud.

V. Bibliografía

INEC, Censo de Población de la República de Costa Rica, 2000.

Herrera, J; Rodríguez, S. Tercer Informe de Calidad del Aire de la Ciudad de San José, 2006. Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica.

Alfaro, R. Informe de Calidad del Aire de las Capitales Centroamericanas, 1997. Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica.

Hartwell, T. D.; Clayton, C. A.; Michie, R. M.; Whitmore, R.W.; Zelon, H. S.; Whitehurst, D. A. y Akland, G. G., (1984). *Study of Carbon Monoxide Exposures of Residents of Washington, D.C.* Presentado en la 77th APCA Annual Meeting, San Francisco, CA.

Office of Research & Development, (1993). *Air Quality Criteria for Ozone and Related Photochemical Oxidants.*, U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C.

Folinsbee, L. J. McDonnell, W F.; Horstman, D. H., (1988). "Pulmonary Function and Symptom Responses after 6.6-hour Exposure to 0.12 ppm Ozone with Moderate Exercise." *JAPCA* 38:28-35.

Fernández-Bremauntz, A. A. y Ashmore, M. R., (1994). "Exposure of Commuters to CO in Mexico City. I. Measurement of In-Vehicle Concentrations." Revisado y aceptado para su publicación en *Atmospheric Environment*.

EPA, (1986). *Second Addendum to Air Quality Criteria for Particulate Matter and Sulfur Oxides (1982)*, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency.

Stoker, H. S. y Seager L. S., (1981) *Química Ambiental*, Ed. Blume, Barcelona, España.

Wallace, L., (1990). "Major Sources of Exposure to Benzene and other Volatile Organic Chemicals", *Risk Analysis*, vol. 10; no. 1; 59-159.

WHO, (1989). *Formaldehyde*. Environmental Health Criteria No. 89. World Health Organization, Geneva.

Clark, A.D. (1989) Aerosol light absorption by soot in remote environments. *Aerosol Sci. Technol.* 10, 161-171.

Mészáros, E. (1999). *Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry*. Akadémiai Kiadó, Budapest, p 13-17.

Fitzgerald, J.W. (1980) The relative contribution of fluctuations in relative humidity and particulate concentrations to the variability of the scattering coefficient over the North Atlantic. *Atmospheric Environment* 14, 71-80.

Mylona, S. (1996) Sulphur Dioxide emissions in Europe 1880-1991 and their effects on sulphur concentrations and depositions. *Tellus* 48B, 662-689.

Warneck, P. (1991) Chemical reactions in clouds. *Fresenius J. Anal. Chem.* 340, 585-590.

Báez, P.A. et al. Origin of trace elements and inorganic ions in PM₁₀ aerosols to the South of Mexico City. *Atmospheric Research* (2007), doi:[10.1016/j.atmosres.2006.11.003](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2006.11.003)