

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA

Año 16 N° 63

Julio - Septiembre de 2006

TARIFA POSTAL REDUCIDA N° 1419 DE ADPOSTAL • VENCE DICIEMBRE DE 2006

Publicación
admitida por
Colciencias en el Índice
Nacional de Publicaciones y
Serías de Publicaciones y
Tecnológicas colombianas
-Publindex- Clasificación tipo C

Implicaciones y retos de la nueva normatividad de la calidad del aire en Bogotá y en Colombia

Entrevista

Luis Felipe González Palacio
Estudiante ganador del premio Lino de Pombo
otorgado por la Sociedad Colombiana de Ingenieros



Foro sobre implicaciones y retos de la nueva normatividad de la calidad del aire en Bogotá y en Colombia

Sylian Rodríguez Lattuada

Como un preámbulo al programa de Diplomado en Control de la Contaminación del Aire, la Escuela Colombiana de Ingeniería llevó a cabo el pasado 10 de agosto el foro denominado “Implicaciones y retos de la nueva normatividad de la calidad del aire en Bogotá y en Colombia”, cuya realización responde al interés de la institución por generar espacios que propicien la reflexión desde los puntos de vista técnico, académico, jurídico y de la salud con respecto a las controvertidas normas que estableció recientemente el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (la Resolución 601 y el Decreto 979 de 2006), por las cuales se dictan los nuevos estándares de calidad del aire para todo el país.

En este foro se enfatizó en que la nueva normatividad de calidad del aire significa un gran esfuerzo que las autoridades ambientales, en conjunto con los comités técnicos, académicos, jurídicos y médicos, han iniciado para concientizar a los diferentes sectores de la población de la importancia de prevenir y controlar la contaminación atmosférica. Sin embargo, se destacó que no cumple con las expectativas desde el punto de vista de la salud, ya que el costo social y los perjuicios sobre la ciudadanía podrían ser devastadores e irreversibles a corto plazo y definitivos a largo plazo.

Las autoridades ambientales deberán adoptar estrategias claras de control de la contaminación atmosférica, a través de una legislación que esté acorde con las necesidades del país, enfocándose sobre todo en la prevención y en el control de la emisión de los contaminantes en la fuente, para reducir y minimizar los efectos sobre el hombre y el medio ambiente. El ministerio del ramo, el Dama y el Ideam deberán tomar, por tanto, un conjunto de medidas que permitan mejorar la calidad del aire en nuestras ciudades: propiciar la modernización del parque automotor, propender al mejoramiento de la calidad de los combustibles, impulsar la sustitución de los combustibles actuales por unos más limpios (en especial el biodiésel) y, complementariamente, hacer una mayor inversión en programas y equipos de monitoreo, seguimiento y caracterización de las emisiones atmosféricas, para asegurar el debido control.

El foro contó con la presencia de expertos nacionales en el tema, como los médicos neumólogos Gustavo Aristizábal y Luis Jorge Hernández, miembros del Comité de Prevención y Atención en Enfermedad Respiratoria Aguda (ERA), de la Secretaría Distrital de Salud; el ingeniero civil Eduardo Behrentz, director del Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental de la Universidad de los Andes; el abogado Héctor Guzmán, docente universitario, y el ingeniero químico Robinsson Rodríguez, docente de la Universidad El Bosque. La rigurosidad de las ponencias de estos conferencistas permitió enriquecer ampliamente el debate, resaltando la inconveniencia de los límites fijados por el ministerio, pero planteando también las soluciones más viables a corto plazo que pueden adoptarse para minimizar el impacto de los contaminantes sobre la salud humana.

La Escuela, por intermedio de su Centro de Estudios Ambientales, ha decidido dedicar su mejor esfuerzo a desarrollar el área de control de la contaminación atmosférica, con el fin de posicionarse como líder nacional en este tema. Es así como ha iniciado exitosamente el Diplomado en Control de la Contaminación del Aire, cuyo objetivo primordial es entrenar y capacitar a profesionales en el área de ingeniería ambiental en conceptos, criterios, diseño y aplicación de técnicas y herramientas, que permitan evaluar y manejar el problema de la contaminación atmosférica, por medio de la legislación vigente en Colombia y los más recientes avances en el ámbito mundial.

Se abren así las puertas a nuevos profesionales que posean los criterios esenciales para discutir, reflexionar y avanzar en la prevención y en el control de la contaminación del aire de nuestras ciudades

Ingeniera civil y especialista en Saneamiento Ambiental de la Escuela Colombiana de Ingeniería; máster y Ph.D en Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cincinnati (Estados Unidos). Profesora asistente e investigadora del Centro de Estudios Ambientales de la Escuela Colombiana de Ingeniería.
srodriguez@escuelaing.edu.co

El crecimiento a largo plazo

Resumen ejecutivo

Eduardo Sarmiento Palacio

Ponencia presentada en el foro "Crecimiento económico en el largo plazo", auspiciado por la Asociación Colombiana de Universidades (Ascun), la Facultad de Economía de la Escuela Colombiana de Ingeniería y el diario económico *La República*.

FUENTES DE CRECIMIENTO

Los trabajos de Solow, en 1956 y 1957, constituyen los aportes más significativos sobre el proceso de crecimiento y sus causas. Sin duda, representaron un paso trascendental para demostrar que, luego de la revolución industrial, el estado normal es el aumento persistente del ingreso per cápita. Sin embargo, en los últimos cincuenta años no se ha avanzado mayormente en establecer la contribución directa del capital y la tecnología en los diferentes tipos de economías, y el grado de interrelación entre ellos. Ni el trabajo de Solow ni el de los autores de la nueva teoría del crecimiento, entre los cuales sobresalen Romer y Lucas, suministran

una explicación adecuada de las fuentes de crecimiento de las economías en desarrollo. Todos ellos coinciden en señalar que el avance tecnológico es la única causa del crecimiento del ingreso per cápita a mediano y largo plazos.

En los trabajos de Solow se muestra que las causas del crecimiento están representadas por el capital y la tecnología. Ahora, en razón de las productividades marginales decrecientes, la contribución del capital se reduce hasta desaparecer. A largo plazo, la única fuente legítima de dinamismo es la tecnología. El resultado no tiene parecido ni semejanza con América Latina. Si bien la contribución del capital tien-

de a disminuir con el tiempo, de ninguna manera desaparece. Entre las variables identificables, el capital es la que mejor explica el crecimiento: en todos los trabajos empíricos se encuentra que, en conjunto con la mano de obra, contribuyen en más del 50% del crecimiento económico. El residuo, denominado en la literatura como la productividad total de los factores (PTF), en parte por representar todas las variables diferentes del capital y del trabajo, es probablemente el índice que mejor explica las variaciones del producto en períodos de diez años.

Sin embargo, su significado cambia con el tiempo. A largo plazo domina el avance tecnológico y a corto y mediano plazos la de-

Las principales causas del crecimiento son el aumento del stock de capital y la demanda efectiva.

manda. Así lo confirman las regresiones que muestran que el crecimiento económico está estrechamente asociado con la tasa de ahorro de los períodos siguientes. En cierta forma, señalan que los factores impulsores de la demanda que contribuyen a la reactivación de la producción se convierten en ahorro. Tales serían los casos de la liquidez y la inversión. Así las cosas, las principales causas del crecimiento son el aumento del *stock* de capital y la demanda efectiva.

Ninguna de las dos condiciones se ha cumplido en América Latina. En Colombia, el *stock* de capital ha crecido en los últimos treinta años por de-

Ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia; Ph. D. en economía de la Universidad de Minnesota. Ha sido decano de economía en la Universidad de los Andes; asesor de la Junta Monetaria; subjefe de Planeación Nacional.

Columnista del diario *El Espectador*, autor de varios libros y de múltiples ensayos y artículos. Actual director del Centro de Estudios Económicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

bajo de 4,5% y en el promedio de la región sucede algo similar. La región ha fallado en el propósito de mantener altos niveles de ahorro y orientarlos a la inversión productiva. Por lo demás, la demanda efectiva ha crecido por debajo de la capacidad instalada, que en términos aproximados corresponde al *stock* de capital, por errores de política y la excesiva prioridad a la inflación. Así, la constante de Colombia y América Latina ha sido crecimientos inferiores a 4,5%, lo que no se compadece con el estado de desarrollo de la región. Luego del monumental atraso con respecto a las economías de Estados Unidos y Europa, América Latina estaba en condiciones de avanzar cerca del 10%, como lo han logrado Japón, los Tigres Asiáticos, y ahora India y China.

La deficiencia de demanda efectiva se origina en un exceso de ahorro sobre la inversión más la exportación neta, y en desajustes sectoriales entre la oferta y la demanda. En la actualidad el exceso de ahorro se origina en la competencia internacional, que coloca el salario por debajo de la productividad. De ninguna manera se trata de una situación que pueda superarse aumentando indiscriminadamente la cantidad de dinero; su orientación es mucho más importante. No obstante, la tarea no puede realizarse dentro del marco institucional existente de austeridad monetaria y de mercado. Se requiere una concepción del banco central, no necesariamente autónomo, menos comprometida en la regulación de los agregados monetarios y la tasa de interés, y más en la dirección de la emisión y el crédito, al igual que una política comercial selectiva que propicie mayores salarios para la producción doméstica, así como sostener el mercado interno.

La elevación de la capitalización no se reduce a estimular el ahorro interno y externo. Igual de importantes son los incentivos para elevar la productividad de la inversión, y esto sólo se presenta en la medida en que se incorpore mayor conocimiento.

Una de las mayores deficiencias de la nueva y vieja teoría del crecimiento es el desarrollo balanceado. Se considera que la economía tiende a un equilibrio, en el cual el producto, el capital y el trabajo avanzan al mismo ritmo. Si bien

existen fuerzas que llevan a ese resultado, de ninguna manera constituye la solución más adecuada. Tal como se observa en los modelos de optimización, el máximo crecimiento y el máximo bienestar se presentan cuando los sectores de mayor expansión o de productividad crecen más rápidamente. Por eso, cuanto mayor el crecimiento del capital, tanto mayor el crecimiento del producto.

Las economías que han alcanzado tasas de 10% son la mejor ilustración del crecimiento desbalanceado. El capital crece más que el producto y éste más que la mano de obra y su productividad.

La otra diferencia crítica está en el tema distributivo. Se da por sentado que el crecimiento no afecta significativamente la distribución del ingreso y, en caso de que lo hiciera, se podría subsanar con políticas asistencialistas. Sin embargo, los resultados dentro de la globalización y el libre mercado son muy distintos. La globalización presiona los salarios por debajo de la

productividad, amplía la brecha entre la mano de obra calificada y no calificada, y propicia el predominio de las grandes empresas, que generan tres veces menos empleos que las pequeñas. Por lo demás, en amplias áreas, como la tributación, las privatizaciones y la flexibilización laboral, la eficiencia se consigue a expensas de grandes inequidades.

REACTIVACIÓN Y SOSTENIBILIDAD EN COLOMBIA

La reactivación económica fue inducida por la expansión del gasto público financiado con emisión y la revaluación. Los mayores gastos de inversión y de funcionamiento provocaron una fuerte expansión de la

demanda, que no se ha compensado con mayores impuestos y colocación de títulos. Por otra parte, la revaluación, en conjunto con las bajas tasas de interés, propició burbujas en la construcción y la bolsa, que se manifiestan en cuantiosas alzas de precios, y enormes crecimientos de las importaciones de materias primas y bienes finales. Por lo demás, los dos elementos se refuerzan. La expansión del gasto público presiona la revaluación y ésta facilita la emisión para el presupuesto y abarata las erogaciones de la deuda externa.



En la actualidad el exceso de ahorro se origina en la competencia internacional, que coloca el salario por debajo de la productividad.

El balance está a la vista. En la actualidad, los medios de pago crecen 35%, el 2% del crecimiento del PIB se origina en el gasto público financiado con emisión y las importaciones de bienes intermedios y de consumo aumentan 23%. De acuerdo con las teorías de la Universidad de Chicago, este incremento de los medios de pago daría lugar a una expansión similar en la demanda agregada, que desembocaría en explosión inflacionaria o crisis cambiaria.

Por fortuna, las cosas son menos dramáticas. En razón de la competencia de la apertura externa, que coloca a los salarios por debajo de la productividad, el efecto del dinero sobre la demanda agregada es mucho menor que en el pasado. Sobre esa base hace seis años recomendé realizar una emisión de 2,5% del PIB para sacar la economía de la recesión. El expediente, que demostró ser altamente efectivo para reactivar la producción, sugerí aplicarlo por una vez, incluso por dos veces, pero de ninguna manera durante toda la vida. Por simples razones físicas, no es posible mantener indefinidamente una contribución del gasto público de 2% en el crecimiento del producto nacional. Así mismo, propuse dejar de lado la modalidad de cambio fijo e intervenir abiertamente en el mercado para adquirir el excedente de divisas a un nivel predeterminado. Infortunadamente, el



En razón de la competencia de la apertura externa, que coloca a los salarios por debajo de la productividad, el efecto del dinero sobre la demanda agregada es mucho menor que en el pasado.

Banco de la República adoptó la fórmula a medias y no evitó la revaluación.

El verdadero peligro reside en que la ampliación del dinero está acompañada de una revaluación y disparo de las importaciones. La entrada de importaciones no se limita a cubrir los faltantes generados por la mayor demanda interna sino que también erosiona el aparato productivo y, en consecuencia, tienden a acrecentarse. En el último año el desempleo pasó de

11,3 a 12,9%, el subempleo llegó a 37% y se perdieron 600.000 puestos de trabajo. El gobierno estima que el déficit en cuenta corriente llegará a 2% del PIB en el presente año y 2,5% en los años siguientes. Bastaría una caída de la actividad de Estados Unidos o el

desplome de los precios del petróleo para que el déficit se salga de los niveles aceptados internacionalmente y se repita la historia de 1999, cuando llegó a 5% del PIB.

Como están las cosas, el esquema de expansión del gasto público financiado con emisión y baja tasa de cambio no es sostenible. La contribución del gasto público al crecimiento no puede mantenerse indefinidamente. La entrada masiva de importaciones corroe el sector productivo. Tarde o temprano, termina en devaluación masiva o cuantioso déficit en cuenta corriente cubierto con crédito externo, que tornaría inviable la economía colombiana.

MODELO ALTERNATIVO

Las formulaciones de libre mercado no contribuyen a entender la naturaleza del crecimiento de las economías emergentes. El crecimiento del producto es determinado por la acumulación de capital y la demanda efectiva, y resulta en un perfil que tiende a ampliar las desigualdades e incluso a aumentar la pobreza. Esta es una clara evidencia de que el mercado no conduce al mayor crecimiento ni a la reducción de las desigualdades. De hecho, se plantea una intervención estatal encaminada a promover la capitalización y la demanda efectiva, neutralizar los sesgos de libre mercado contra el salario y el empleo, y elevar la progresividad del sistema fiscal y la efectividad de las políticas sociales.

En primer lugar, se requiere una estructura productiva que permita absorber el doble del crecimiento del stock de capital. Si bien el adiestramiento de la fuerza de trabajo es un requisito necesario, no es suficiente. Es indispensable elevar la productividad del capital mediante el aprendizaje en el oficio que permita pasar a actividades más complejas, el adiestramiento de la mano de obra y el gasto en ciencia y tecnología.

En segundo término, es necesario mantener la demanda efectiva en línea con la capacidad productiva. Lo primero es sacar al país de la obsesión de reducir la inflación a cualquier costo, sin tener en cuenta su origen y su naturaleza. La prioridad del banco central debe ser, más bien, conciliar la estabilidad a mediano plazo, la producción y el empleo, y en situaciones como las actuales, el último objetivo tendría que recibir una clara ventaja. Su función operativa debería encaminarse a crear las condiciones para movilizar los ahorros internos y los fondos externos hacia la inversión productiva, y propiciar la expansión de los sectores con mayor potencial y producción y empleo.

En tercer lugar, se plantea corregir los sesgos de la demanda efectiva deficiente y de libre mercado sobre el salario y el empleo. Parte del propósito se lograría dentro de la industrialización, sustentada en el aprendizaje en el oficio como motor de crecimiento. En este contexto, habría que darle amplio espacio para conformar una estructura de protección encaminada a mantener mayores salarios para el mercado interno y proteger la mano de obra no calificada. Adicionalmente, convendría detener el proceso de fusiones y privatizaciones y crear las condiciones institucionales de asociación y financiación para promover la pequeña y mediana empresa.

Los milagros económicos son un corolario de las proposiciones anteriores. Sus componentes centrales están representados por elevados crecimientos del capital y la demanda efectiva. Entre los medios para lograrlos se destacan el motor de la industrialización, que abra oportunidades de capitalización y permita conciliar los mercados interno y externo; el banco central no autónomo, y una estrategia para movilizar los ahorros internos y los fondos externos hacia la inversión productiva.

DISTRIBUCIÓN DEL INGRESO

Para completar, se necesita un sistema tributario basado en la tributación del ingreso, el patrimonio y los bienes lujosos, y una estructura de gasto pública encaminada a asegurar el acceso de toda la población a los derechos fundamentales. Frente a la ineficacia del mercado para dirigir los recursos, se requiere la intervención más directa del Estado en la calidad de las necesidades básicas, incluso ofreciendo la educación y la salud en forma exclusiva y única, y en la asignación de recursos en la Constitución a las administraciones municipales para la realización de planes de vivienda y empleo.

La organización descrita aseguraría que el crecimiento no acentúa las desigualdades del ingreso y contribuiría a reducir la pobreza. Sin embargo, sus alcances serían modestos, toda vez que no afectarían mayormente la concentración, que aparece representada en la enorme diferencia de ingreso entre el decil 10 y el decil 9 de la distribución del ingreso, y viene de tiempo atrás. Es insuficiente para colocar al país dentro de una posición decente, que guarde relación con su nivel de desarrollo. Es indispensable ir más allá en un consenso social orientado a quebrar la concentración, que es la principal causa de la mala distribución del ingreso. Hay que replantear la excesiva prioridad que se le concedió en la era neoliberal al derecho de propie-

dad, que en muchos casos se ha convertido en un privilegio de los poderosos, revisando las normas sobre expropiación de las áreas rurales y urbanas, derechos adquiridos a elevadas pensiones, patentes a los usos de los inventos, provisión de los monopolios oficiales en los servicios con elementos de bienes públicos, como las comunicaciones, y los gravámenes al capital y la propiedad; avanzar en una severa regulación de los mercados para evitar las prácticas monopólicas, la especulación, la corrupción, el alza excesiva de tarifas de servicios públicos, la explotación del trabajo y el freno a las privatizaciones; crear toda clase de diques para compensar las ventajas de los más eficientes, como las grandes empresas, los estudiantes de mayores ingresos y el comercio internacional.

A TÍTULO DE SÍNTESIS

En síntesis, la economía colombiana ha operado dentro de las directrices de la teoría neoclásica que se materializa en el Consenso de Washington. En virtud del principio de mano invisible de Adam Smith, cuya validez se evaluó en los estudios de competencia perfecta de Arrow y de Debreu, el libre mercado conduce a la solución más eficiente. Por lo demás, con base en el principio de que la eficiencia y la equidad son separables, se predice que el crecimiento fundado en el libre mercado no afecta mayormente la equidad, y en caso de que lo haga los daños pueden corregirse con políticas asistencialistas. Así, el libre mercado, cuyo motor es el libre comercio, y la orientación del gasto público hacia el sector más necesitado garantizan el crecimiento y la mejora de la distribución del ingreso.



Este modelo se aplicó en la órbita angloamericana y en la década de los noventa se trasladó a América Latina mediante el Consenso de Washington. Los resultados son insatisfactorios.

El máximo crecimiento se presenta dentro de perfiles desbalanceados que no surgen en forma silvestre; por el contrario, están condicionados a una organización industrial fundamentada en el aprendizaje en el oficio que propicie la capitalización y dentro de una acción orientada a mantener la demanda efectiva en línea con la capacidad instala-

da. Por lo demás, el crecimiento dentro del libre mercado y la globalización redundan en estructuras altamente inequitativas y reducen la capacidad de las políticas públicas para disminuir las desigualdades y la pobreza. El balance es claramente negativo. Ahora, los daños del modelo económico sobre la distribución del ingreso no son susceptibles de corregirse con políticas públicas. En un artículo reciente de la revista *The Economist* se encuentra que en Estados Unidos la participación del 1% más rico disminuyó en el período 1917-1980 y se disparó en los siguientes veinticinco años. Tal como lo ratifica el censo, el salario real de los grupos medios y bajos se redujo en los últimos quince años. Algo similar ocurre en Colombia. De acuerdo con datos provenientes de las más diversas fuentes, oficiales y no oficiales, entre 1990-2005 el coeficiente Gini de la distribución del ingreso se incrementó y la pobreza se elevó, y de acuerdo con todas las series disponibles, el ingreso de trabajo bajó en la última década.

En la práctica, se plantea un modelo que en su conjunto armonice el crecimiento con la equidad y fortalezca las políticas públicas.



de obligaciones presupuestales para dotar a los municipios de recursos para llevar a cabo programas de vivienda y empleo.

El esquema descrito de modelo económico y política pública social garantizaría un sistema de crecimiento con equidad, pero es insuficiente para contrarrestar las enormes desigualdades de la distribución del ingreso. El propósito se sale de las acciones unilaterales. Su viabilidad está condicionada a un gran consenso nacional en torno a la expropiación de terrenos urbanos, estructura tributaria y regulación de los mercados claves para evitar prácticas monopólicas y especulativas.

BIBLIOGRAFÍA

Jorgeson, D. & Eric, Y.P. (2001). "Whatever Happened to Productivity Growth". In Charles Rhulten, Edwin R. Dean, and Michael J Herper (eds.). *New Developments in Productivity Analysis*. Chicago: University of Chicago Press.
Klenow, P. & Rodríguez, A. (1997). The Neoclassical Revival in Growth Economics: Has it gone too Far. In *Macroeconomics Annual*, NBER.

Loayza, N. Fajnzylber, P. & Calderón, C. (2005). *Economic Growth in Latin America and the Caribbean. Stylized Facts, Explanations, and Forecasts*. Washington: World Bank.
Lucas, R. (1998). The Mechanics of Economic Development. *Journal Monetary Economic*, 22.
Romer, P.M. (1987). Growth based on increasing returns due to specialization. *American Economic Review*, 77,56-62.
Sarmiento, E. (2000). *Cómo construir una nueva organización económica*. Bogotá: Oveja Negra-Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
Sarmiento, E. (2002). *El modelo propio*. Bogotá: Grupo Editorial Norma-Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
Sarmiento, E. (2005). *El nuevo paradigma de la estabilidad, el crecimiento y la distribución del ingreso*. Bogotá: Grupo Editorial Norma-Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
Solow, R. (1956). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *Quarterly Journal of Economics*, 70: 65-94.
Solow, R. (1957). Technical Change and the Aggregate Production Function. *Review of Economics and Statistics*, 39.
Solow, R. (1988). Nobel Lecture: Growth Theory and After. *American Economic Review*. 78: 307-317.
World, B. (1991). *The Challenge of Development*. Report 1991. Oxford: Oxford University Press.
Young, A. (1995). "The Tyranny of Numbers: Confronting the Statistical Realities of the East Asian Growth Experience". *Quarterly Journal of Economics*, 641-680

Precalificación de conexiones para pórticos de lámina delgada

Enrique López Guerrero* y Gabriel Valencia Clement**

En la historia reciente de la ingeniería estructural en el ámbito mundial, los sismos de Northridge en California (1994) y en Kobe (1995), marcaron una disyuntiva en la concepción del diseño y comportamiento de estructuras de acero ante las solicitaciones por sismo, pues se presentaron daños muy graves en algunos elementos, pero primordialmente en las conexiones, en los cuales se alcanzaron niveles de esfuerzos, deformaciones y en general comportamientos no previstos. El presente trabajo constituye un punto de partida, en Colombia, hacia la precalificación de conexiones para pórticos armados con perfiles de lámina delgada. Para tal fin se estudiaron y adaptaron los protocolos de ensayos establecidos por la AISC-2002 y el ATC-24. Se elaboraron modelos teóricos matemáticos por elementos finitos utilizando la aplicación ANSYS V.8.0, con el fin de contrastarlos con los resultados experimentales. Finalmente, se encuentran curvas de histéresis para las diferentes conexiones empleadas, se plantean conclusiones y recomendaciones sobre la validación del estudio por elementos finitos, coeficiente de disipación de energía, además la influencia de colocar platinas de continuidad y el uso en general de este tipo de estructuras según el grado de disipación de energía requerido.

Palabras claves: protocolo de calificación, lámina delgada, conexiones, rotaciones inelásticas.

* Ingeniero civil, magíster en Ingeniería-Estructuras de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.
elopezg98@yahoo.com.

** Ingeniero civil, profesor titular del Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.
gfvalenciac@unal.edu.co.

After the 1994 Northridge and 1995 Kobe earthquakes, the whole concept of design and behavior of steel structures has been changed. When these events occurred, many structures were subject to earthquake forces that caused a great deal of damage to their structural members. After reviewing the causes of damage and failure, it was noted that the connections on these structures were subject to stresses and strains beyond their intended design values. Due to this condition, the investigation and qualification of steel connections has been greatly encouraged. The purpose of the present study is to set a standard in Colombia of a Prequalification Protocol for cyclic loads, under the conditions found on our country, in order to help to improve the design and behavior of thin walled steel frames. In this study, a new proposal for test protocols is presented, compared to the ones given by the AISC-2002 and ATC-24 codebooks. Also, the results obtained through a finite element analysis using the Ansys V.8.0 software, are shown and compared to the results given by actual experimentation. As a result, the hysteretic curves for sixteen test connections evaluated are presented, as well as their analysis and recommendations, compared to the finite element modeling. Other recommendations are given as well, regarding the adequate value for the energy dissipation coefficient, the influence of using continuity plates, and the use of this type of structures according to the level of seismic performance required.

INTRODUCCIÓN

Tras el sismo ocurrido en Northridge (California) en 1994, organismos gu-

bernamentales de Estados Unidos de América dedicaron recursos humanos y económicos importantes a estudiar y analizar las posibles causas de las fallas estructurales presentadas en algunas estructuras de acero. Una rama de estas investigaciones correspondió al estudio de las conexiones, cuyos principales resultados fueron unos protocolos o metodologías de diseño (carta de navegación) destinados a minimizar el riesgo de colapsos y mejorar el desem-

peño estructural a partir de una mayor capacidad de disipación de energía de las conexiones en el rango inelástico.

El desempeño de una conexión está determinado por tres de sus propiedades fundamentales: resistencia, rigidez y capacidad de deformación (ductilidad).

El desempeño de una conexión está determinado por tres de sus propiedades fundamentales: resistencia, rigidez y capacidad de deformación (ductilidad). Antes de la ocurrencia del sismo de Northridge, se pensaba que un adecuado comportamiento de las conexiones estaba relacionado con una máxima rotación angular alcanzada de 0,02 radianes, y que a este nivel existía un adecuado comportamiento inelástico de la estructura; se evidenció, igualmente, que las conexiones alcanzaron niveles más elevados de deformación; en otras palabras, se presentaron mayores solicitaciones de las esperadas y se requerían conexiones con mejor capacidad o desempeño.

El desempeño de una conexión está determinado por tres de sus propiedades fundamentales: resistencia, rigidez y capacidad de deformación (ductilidad).

Para las conexiones de pórticos resistentes a momento (totalmente restringidas) se requiere demostrar, mediante ensayos, que éstas se hallan en capacidad de mantener al menos el 80% del momento de plastificación (M_p), con un nivel de rotación total de 0,04 radianes. Mediante el presente artículo se pretende dar un punto de partida, en Colombia, hacia la precalificación de conexiones entre perfiles de lámina delgada, haciendo una analogía o adaptación de los protocolos adoptados (ATC 24, LRFD-AISC-2002) para cuatro tipos de éstas.

ASPECTOS TEÓRICOS

El cálculo de la capacidad de conexiones y elementos está basado en las consideraciones y recomendaciones consignadas en la norma Aisi (ref. 4), donde se destacan la geometría, las relaciones ancho-espesor, el coeficiente de disipación de energía (R_e) y la influencia del formado en frío, entre otros.

El coeficiente de disipación de energía, conocido como “factor R”, constituye uno de los parámetros de mayor importancia en la estimación de las cargas sísmicas inelásticas utilizadas en el proceso de análisis y diseño estructural. Cuando una estructura entra en rango inelástico, disipa energía básicamente mediante pandeos y fluencias de miembros a compresión, fluencias a tensión axial, manifestado en deformaciones superiores al límite elástico del material.

Cargas nominales de las secciones

Las conexiones deben estar en capacidad de transmitir sollicitaciones tales como axiales, cortantes y momentos flectores, siendo estos últimos el punto objetivo de estudio en esta investigación.

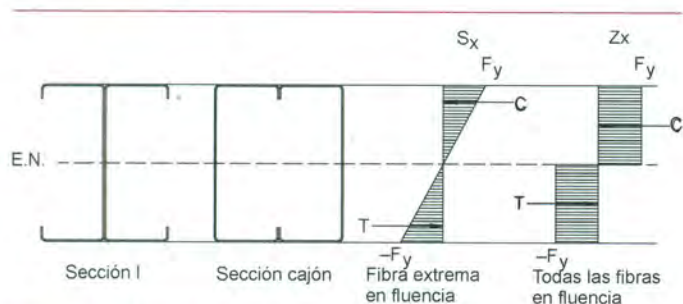


Figura 1. Módulos elástico y plástico.

$$M_e = S_{xe} * F_y$$

En donde:

M_e : momento elástico teórico.

S_{xe} : módulo elástico efectivo de la sección.

F_y : esfuerzo de fluencia del material, obtenido experimentalmente.

Debido a la aparición de fenómenos de pandeo local, aun en rango elástico, la resistencia a flexión generalmente se asocia al momento elástico M_e o M_y , para lo cual en elementos de acero se suelen considerar estos fenómenos con el uso de un concepto conocido como *ancho efectivo*, lo que conduce a calcular el módulo elástico efectivo de la sección (S_{xe}). Sin embargo, para diseño, Aisi permite incrementar dicho valor de M_e hasta en 25%, como una medida del grado de incursión en el rango inelástico. Cabe anotar que el módulo plástico Z_x (figura 1) es solamente teórico, puesto que no se alcanza.

Según lo establecido en Fema 350 (ref. 7), para que una conexión pueda considerarse rígida debe cumplir con que las placas, platinas, pernos, soldaduras y demás aditamentos de sujeción deben diseñarse para que en éstos no ocurra plastificación; en otras palabras, que permanezcan en rango elástico de esfuerzos cuando los elementos que conecten alcancen el rango inelástico.

Tipos de conexiones

Se plantean básicamente cuatro tipos de conexiones, usadas por lo general en el medio, y se diseñan utilizando un procedimiento análogo a los establecidos en Fema 350. Los tipos de conexiones se explican detalladamente en la referencia 8, pero a continuación se hace una descripción básica:

Tipo 1: El elemento tipo columna (P12-12 o P8-12), ensamblado en cajón, y el elemento tipo viga (P12-16 o P8-14), igualmente ensamblado en cajón. Se usa una platina de asiento de 3/16" (figura 20).

Tipo 2: El elemento tipo columna (P12-12 o P8-12), ensamblado en cajón, y el elemento tipo viga (P12-16 o P8-14), igualmente ensamblado en cajón. Se utiliza una platina de asiento de 3/16" y platinas de continuidad de 3/16" para el elemento tipo viga (que a manera de atiesadores interiores son soldados a los perfiles C antes de que éstos sean unidos para conformar la sección cajón).

Tipo 3: El elemento tipo columna (P12-12 o P8-12), ensamblado en cajón, y el elemento tipo viga (P12-16 o P8-14), ensamblado en I. El elemento tipo viga tiene una separación de 15 mm con respecto al elemento tipo columna y se conectan por medio de tres platinas, así: una en la parte superior y otra en la inferior de 3/16", y la tercera ubicada en el alma.

Tipo 4: El elemento tipo columna (P12-12 o P8-12), ensamblado en cajón y el elemento tipo viga (P12-16 o P8-14), ensamblado en I. El elemento tipo viga está separado 15 mm con respecto al elemento tipo columna y se conectan por medio de tres platinas, así: una en la parte superior, otra en la inferior de 3/16" y la tercera ubicada en el alma.

de la viga con el fin de transmitir cortante.

Modelo teórico-matemático

El objetivo de elaborar un modelo por el método de elementos finitos (MEF) es estimar el comportamiento de las conexiones frente a los esfuerzos y deformaciones generados por la aplicación de la carga en el extremo de la viga, y posteriormente establecer una comparación con los resultados experimentales para finalmente validar dichas predicciones. En este caso se optó por el uso del programa Ansys (Advanced Engineering Simulation) en su versión 8.0; se procedió inicialmente con un análisis lineal elástico, luego con uno no lineal y por último con un análisis no lineal con pandeo.

Análisis no lineal

Como resultados básicos obtenidos del MEF lineal, y que permiten predecir el comportamiento experimental al menos en el rango elástico, están deflexiones o desplazamientos en Y (U_y), esfuerzos en la dirección Z, intensidad de esfuerzos y criterio de falla de Von Mises.

En las figuras 2 y 3 se muestra la deflexión en Y cuando se aplica una carga en el extremo de la viga que produce M_c para un modelo tipo 1 y otro tipo 2, los cuales tienen como diferencia básica la presencia de platinas de continuidad. Para el modelo 5 (tipo 1) se alcanza una deflexión de 21 mm, mientras que para el modelo 6 (tipo 2) se alcanza una de 19 mm, indicando que las platinas de continuidad disminuirían en 10% las deflexiones en el punto de aplicación de las cargas.

En las figuras 4 y 5 se observa que se alcanzan valores de esfuerzos superiores a F_y , presentándose concentraciones de esfuerzos en las esquinas superiores de contacto entre la viga y la columna; por tanto, se hace necesaria la ejecución de un análisis no lineal, ya que los valores de esfuerzo del material teóricamente no pueden sobrepasar a F_y , al menos para un amplio rango de deformaciones.

Cuando no hay platinas de continuidad, los esfuerzos en compresión son transmitidos por la viga directamente al alma de la columna. En el modelo con platinas de continuidad los esfuerzos de compresión que llegan a la columna son absorbidos y distribuidos a las platinas en toda la sección, por lo que es recomendable su uso en los puntos en los cuales se esperan compresiones transversales al eje elevadas (aplicación de cargas, apoyos, etc.), disminuyendo así la probabilidad de aparición de pandeos locales o arrugamiento del alma en dichos puntos.

En la figura 6 se muestra la distribución de esfuerzos para una línea pa-



Figura 4. Esfuerzo de Von Mises. Modelo 5. Análisis elástico.

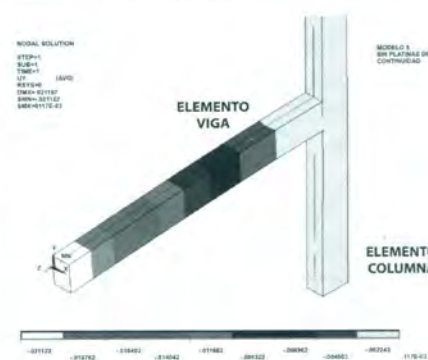


Figura 5. Esfuerzos de Von Mises. Modelo 6. Análisis elástico.

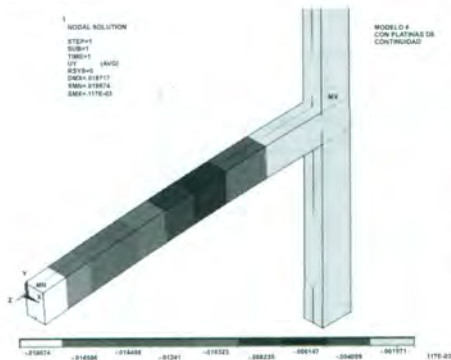


Figura 2. Deflexiones modelo 5. Análisis elástico.

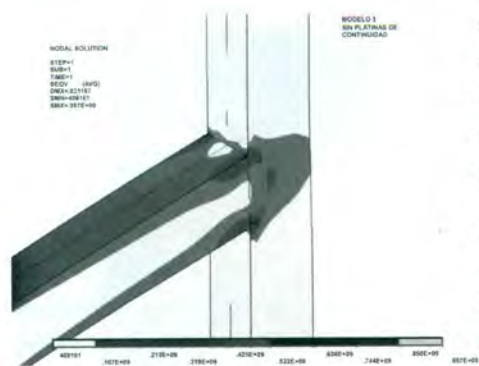


Figura 3. Deflexiones modelo 6. Análisis elástico.

ralela a la cara de la columna, ubicada en el elemento tipo viga a 20 mm de la unión con la columna, en donde se aprecia que para una serie de fibras ubicadas a la misma distancia al eje neutro de la sección, éstas no están a un mismo nivel de esfuerzos, indicando que no hay una distribución constante de esfuerzos en la sección.

Existe una concentración o aumento de esfuerzos hacia las esquinas, con valores teóricos superiores a F_y y se presenta una distribución casi lineal en la parte central (figura 7). Mientras que para una línea longitudinal sobre el alma de la columna (figura 8) se identifican dos puntos de quiebre en la curva, puntos en los cuales existen las platinas de continuidad, es importante resaltar nuevamente que las platinas evitan que se incremente el esfuerzo que le llega a la columna.

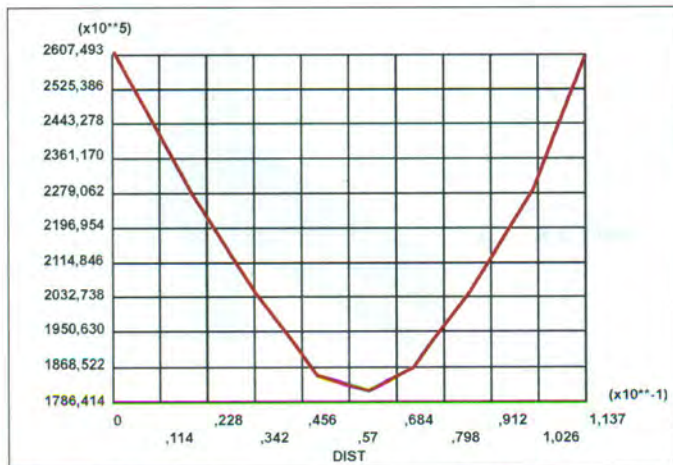


Figura 6. Distribución de esfuerzos para la sección horizontal de esfuerzos en el elemento tipo viga.

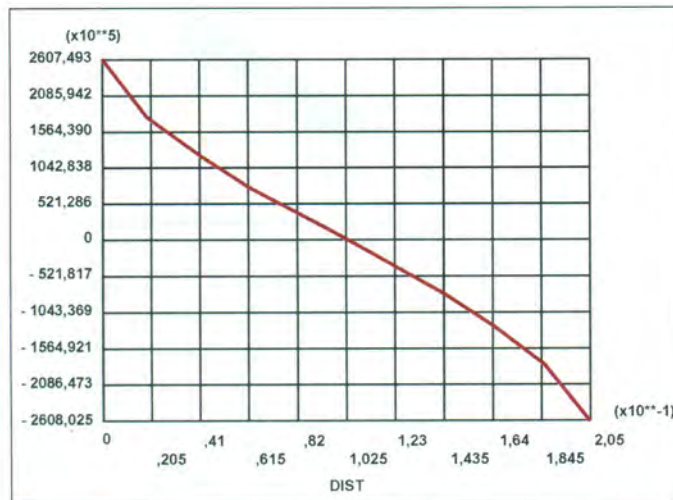


Figura 7. Distribución de esfuerzos en Z para el alma de la viga.

Análisis no lineal de pandeo

Con un análisis no lineal de pandeo se busca estimar el comportamiento de la sección cuando, además de la no linealidad del material, se tiene en cuenta la aparición de pandeos locales o estados secundarios de estabilidad; igualmente, cuando hay cargas excéntricas o excentricidad geométrica, se requiere una aplicación gradual de carga para encontrar el punto de inestabilidad. Para el análisis se adopta un comportamiento bilineal de esfuerzo-deformación del material (figura 10). Igualmente, se tienen en cuenta los grandes desplazamientos (no linealidad de geometría). Para la solución matemática del modelo se usa el método de Newton-Raphson.

Para el análisis no lineal y no lineal con pandeo se utiliza la mitad de la geometría del modelo original, aprovechando la simetría de éste, y aplicando restricción en X (al desplazamiento) en los nuevos bordes, mejorando en buena medida el tiempo de solución.

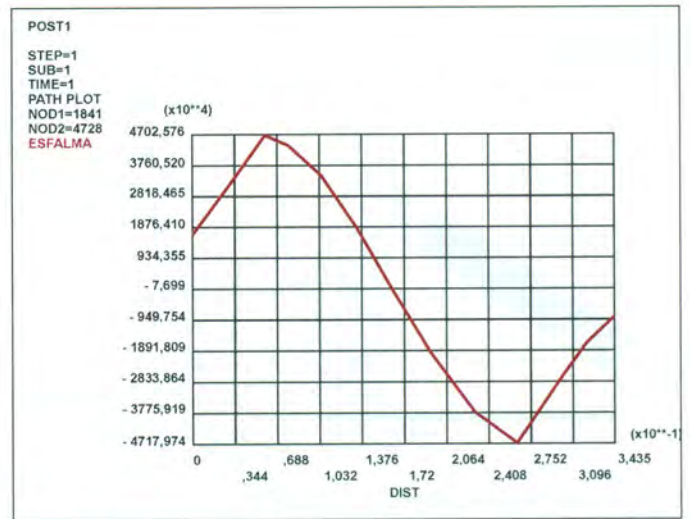


Figura 8. Distribución de esfuerzos para el alma de la columna. Perfil con platinas de continuidad.

El factor de seguridad (figura 9), tal como lo define Ansys, es la relación entre el esfuerzo principal y el esfuerzo de fluencia del material; nuevamente se identifican puntos o sitios de mayor esfuerzo ubicados en las esquinas del elemento tipo viga.

Análisis no lineal

El propósito de este análisis es tener en cuenta la influencia de la no linealidad del material en los resultados asociados con las deflexiones y los esfuerzos en la zona de conexión, así como la no linealidad geométrica cuando por efecto de las cargas la geometría de la estructura varía considerablemente (grandes desplazamientos).



Figura 9. Distribución del factor de seguridad.

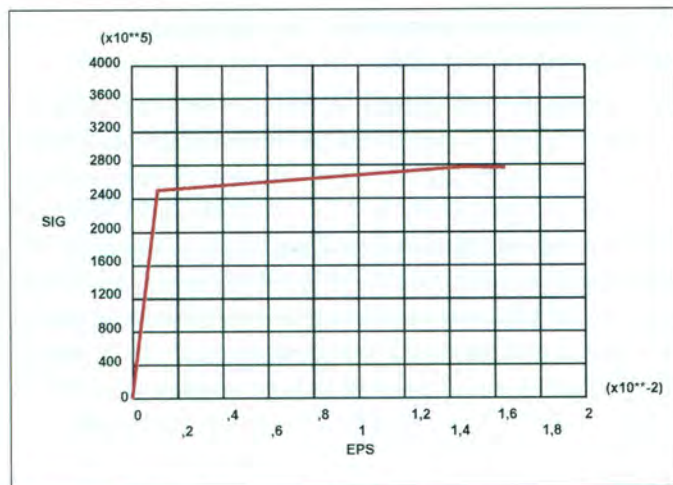


Figura 10. Curva esfuerzo-deformación del material bilineal.

En la figura 11 se muestra la variación del desplazamiento (deflexión) en el extremo de la viga (punto de aplicación de la carga), con respecto a la magnitud de la carga aplicada, en donde se presentan saltos e irregularidades cuando se sobrepasa el rango elástico; no obstante, registra una tendencia a perder resistencia, que se representa por una línea recta descendente.

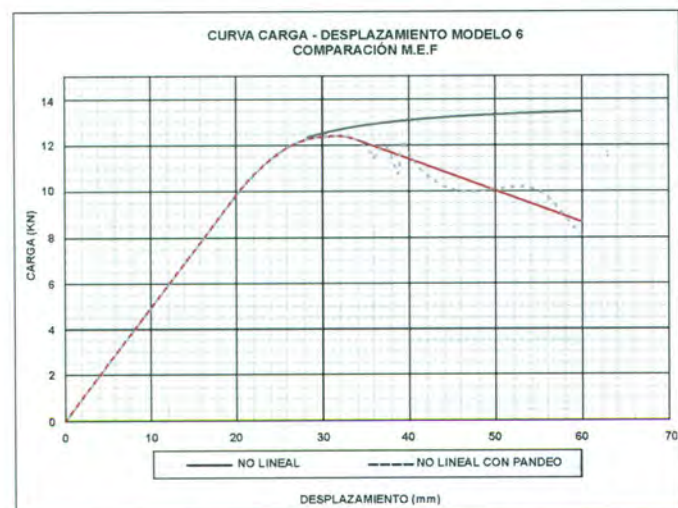


Figura 11. Curva carga desplazamiento. Modelo 6. Análisis no lineal y no lineal con pandeo.

Con el fin de hacer comparables las curvas histeréticas de los ensayos dinámicos, se elabora un modelo que tiene en cuenta una carga cíclica similar a la aplicada; para tal efecto, se establece una función de carga del tipo sinusoidal, la cual se aplica en el extremo de la viga. Nuevamente el material utilizado es idealizado del tipo bilineal de esfuerzo-deformación.

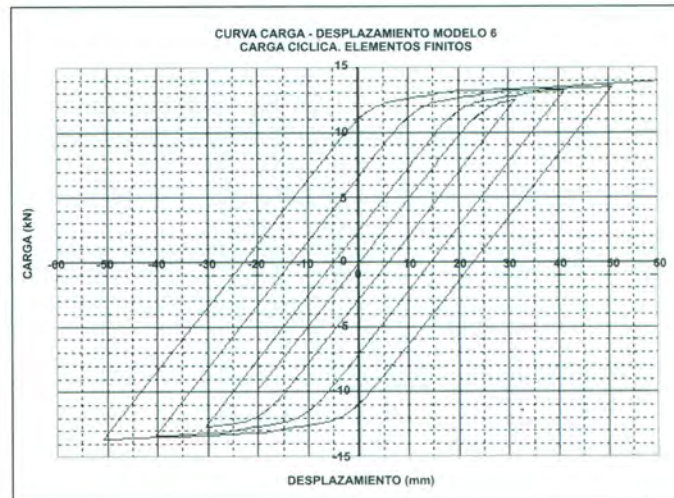


Figura 12. Curva histerética. Modelo 6. Material bilineal.

En la figura 12 se presenta la respuesta histerética para la conexión tipo 6, cuando ésta se somete al protocolo de carga del ensayo mediante el uso de elementos finitos. No muestra degradación de rigidez, ya que no se tienen en cuenta fenómenos de inestabilidad local; en igual forma presenta una rigidez constante, manifestada en la pendiente similar en cada uno de los ciclos, tanto en carga como en descarga; lo anterior muestra un comportamiento típico de un material elasto-plástico ideal, tal como se definió en la curva bilineal de la figura 10. La respuesta histerética es idealizada y no representa el comportamiento considerando los efectos del pandeo local. Como resultado de un ensayo físico

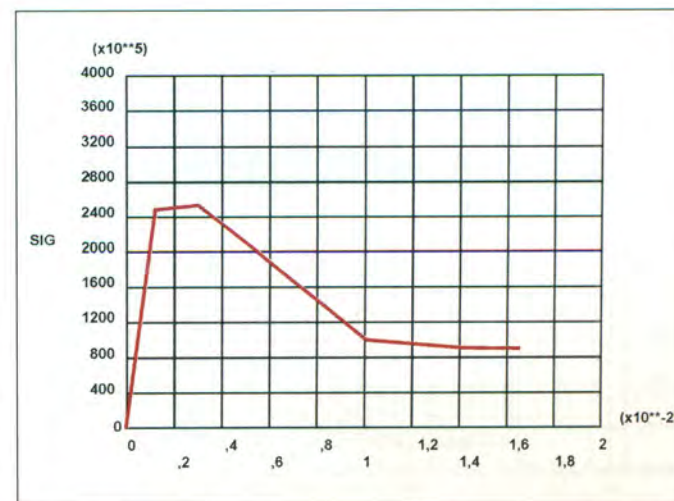


Figura 13. Idealización multilínea del esfuerzo-deformación del material.

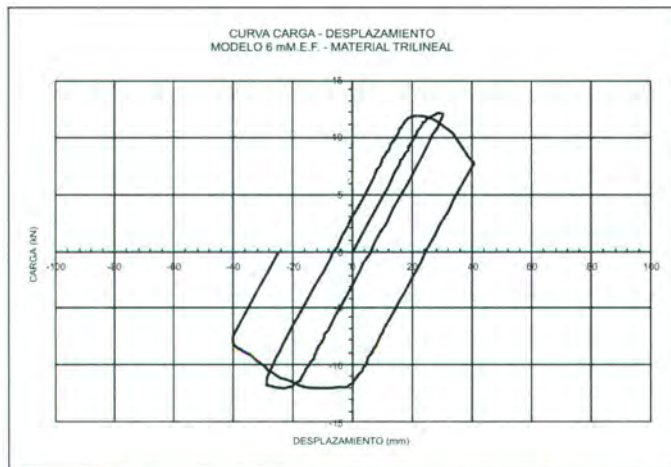


Figura 14. Curva histerética. Modelo 6. Material trilineal.

preliminar, se establece un comportamiento (figura 13) correspondiente a una envolvente de máximos en cada ciclo de carga aplicado. Mediante esta aproximación, se puede simular el efecto de la aparición de fenómenos de inestabilidad local; aunque no sea representativa de este comportamiento, permite observar su influencia en análisis por MEF.

En la figura 14 se muestra la respuesta histerética del modelo 6, cuando se utilizan un material trilineal y una carga de tipo sinusoidal que simula el protocolo establecido; es importante anotar que la disminución de resistencia no está asociada al pandeo local propiamente dicho, presenta comportamientos erráticos en la curva y no muestra una tendencia confiable.

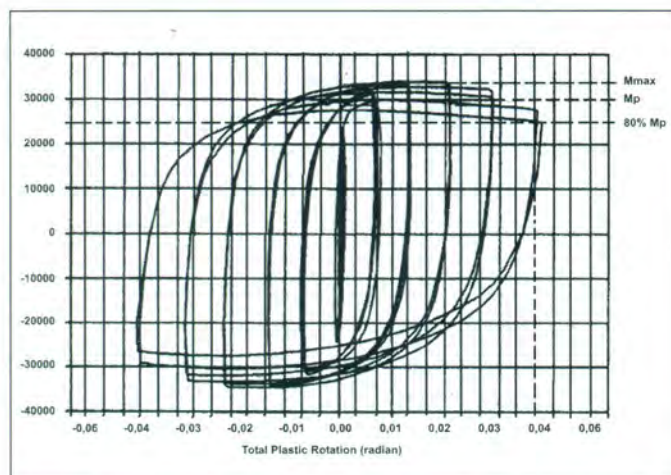


Figura 15. Comportamiento típico de secciones compactas.

Comportamiento histerético de conexiones de secciones compactas

Cuando una conexión para secciones compactas de acero es solicitada por las cargas cíclicas recomendadas en los protocolos de ensayos de los anexos P y S y en general de las provisiones sísmicas de la AISC de 2002, debe tener un comportamiento similar al presentado en la figura 15. Dicho comportamiento refleja propiedades como resistencia y ductilidad tales que mantienen la integridad de la estructura ante ciclos histeréticos de cargas, en donde se destaca que para una rotación total de 0,04 radianes se debe resistir al menos el 80% del momento plástico de la sección.

ASPECTOS EXPERIMENTALES

Para la determinación del marco experimental se adoptan las recomendaciones dadas en ATC-24 y en diferentes reportes de investigaciones relacionados con el tema en cuestión. Estudios recientes en ingeniería sísmica han enfatizado en la necesidad de tener condiciones cercanas a la realidad en el proceso experimental, las cuales pueden ser geometría, ciclos y frecuencia de aplicación de carga, procedimientos de fabricación en taller y montaje en obra, procesos de soldadura normalizados y diseño estructural propiamente dicho. Por otro lado, se deben cumplir criterios tales como jerarquía de falla, momentos y cortantes de plastificación (resistentes), cargas de aplastamiento, esfuerzos y deformaciones esperados.

Con el fin de simplificar el modelo físico que se va a construir, se aprovecha la validación que ofrece utilizar una subestructuración a partir del diagrama de momentos ge-

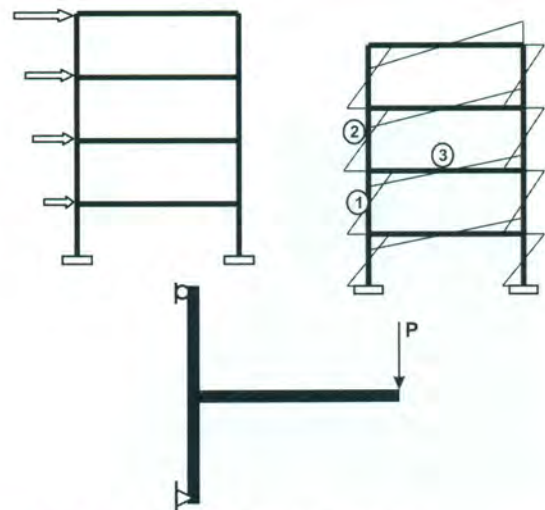


Figura 16. Modelo de subestructuración.

nerado por cargas de sismo en un pórtico tradicional, en el cual se identifican tres puntos cuyos valores de momento flector son cercanos a cero (dichos puntos a la postre serán apoyos y punto de aplicación de carga).

Tipos de sección

Se emplean perfiles adosados, conformando secciones en cajón y en I, simulando las condiciones constructivas normalizadas. Adicionalmente, se usan atiesadores en el punto de aplicación de la carga y en los puntos de apoyo, con el fin de evitar la falla local por aplastamiento del alma (*web crippling*).

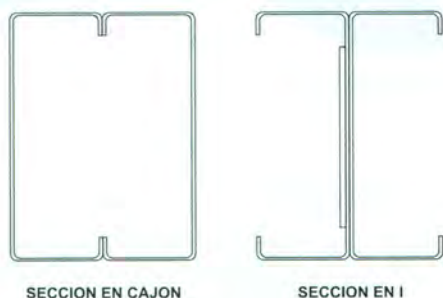


Figura 17. Tipos de sección.

La doble línea en el alma de la sección en I representa una platina para transmisión de cortante (figura 17). Las resistencias nominales para cada tipo de perfil se resumen a continuación:

Perfil	S_x (mm ³)	M_c (kN*m)
P-8-14	38 438	18,85
P-12-16	58 826	28,85

Curva de esfuerzo-deformación del material

La curva de esfuerzo-deformación del material permite determinar las dos propiedades básicas (esfuerzo de fluencia F_y y módulo de elasticidad E) usadas en el cálculo de las propiedades mecánicas de las secciones. Se ensayaron seis probetas, obteniéndose los siguientes valores: $E=216\ 500$ MPa y $F_y = 250$ MPa.

Procedimiento de ensayo

Protocolo de carga

Para la adopción del protocolo de carga existen dos referencias básicas: la del AISC-2002 en los apéndices P y S y la del ATC-24. Se adoptan las del ATC-24, debido a que en las

primeras su enfoque es hacia perfiles laminados (compactos). El proceso de calificación consiste en someter la conexión a una serie de intervalos de ciclos de carga, estableciendo la sollicitación impuesta. El protocolo tiene como punto de referencia la deformación teórica, en la cual se inicia la fluencia en la fibra extrema (δ_y). La aplicación de carga cíclica es posible mediante el empleo de un actuador dinámico. En términos generales, los protocolos de carga pretenden evaluar el desempeño de la conexión en los rangos elástico e inelástico, más en este último, puesto que lo que finalmente se busca es evaluar el grado de disipación de energía en rango inelástico y extrapolar al comportamiento global de toda la estructura. En la tabla 1 se muestra el protocolo de carga básico recomendado por ATC-24 y la figura 18 corresponde a su representación gráfica.

Tabla 1
Protocolo de carga básico

Etapa	Nº de ciclos	n-veces δ_y
1	3 ciclos A	0,5 δ_y
2	3 ciclos A	0,75 δ_y
3	3 ciclos A	1,0 δ_y
4	3 ciclos A	2,0 δ_y
5	3 ciclos A	3,0 δ_y
6	3 ciclos A	4,0 δ_y
7	3 ciclos A	5,0 δ_y
8	3 ciclos A	6,0 δ_y
9	3 ciclos A	7,0 δ_y
10	3 ciclos A	8,0 δ_y

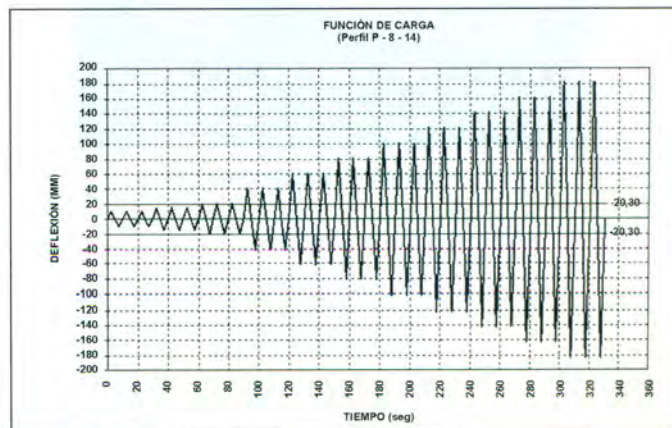


Figura 18. Función de carga inicial P-8-14.

Para completar el proceso, se continúa con tres ciclos a incrementos constantes de $1,0 * \delta_y$ hasta llegar a la falla o a una evidente degradación de resistencia. Finalmente, se adoptó el protocolo de carga mostrado en la figura 19, el cual permite visualizar el comportamiento de la conexión cuando se acerca y se sobrepasa el rango elástico:

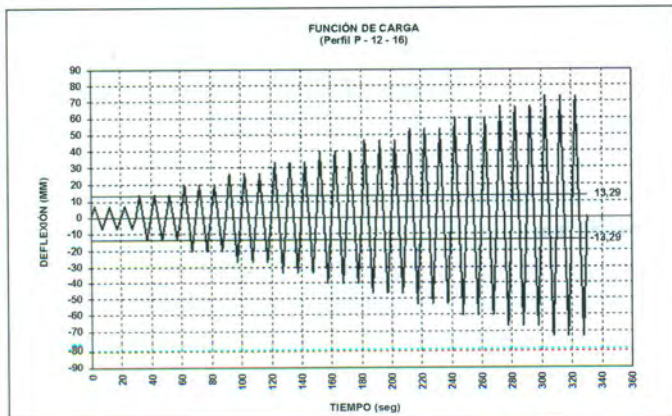


Figura 19. Protocolo de carga P-12-16.

Variables experimentales

En el proceso de fabricación de los modelos se controlaron variables como manipulación, almacenaje, cortes, aplicación de soldaduras, ensamble y transporte, en un todo de acuerdo con el sistema de gestión de calidad de la firma Tecmo S.A.



Figura 20. Fabricación. Detalle platina de asiento.

Por otro lado, el uso del actuador dinámico y el colector automático de datos del Laboratorio de Materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería permitió aplicar de una manera confiable el protocolo de carga establecido (deformación controlada).

Instrumentación

Por los fenómenos de pandeo local, se descarta el uso de deformímetros eléctricos puesto que éstos tendrían deformaciones que no reflejan los esfuerzos reales de material sino las deformaciones locales propias del pandeo local. Como uno de los objetivos es medir rotaciones y dado que se disponía de sólo tres lectores de deformación lineal

(LDT), éstos se colocaron de tal modo que se pudieran medir ángulos a partir de deformaciones lineales (figura 21) y con ello calcular indirectamente la rotación total de la conexión (nudo).

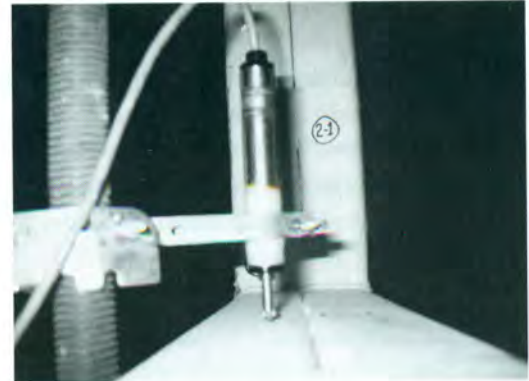


Figura 21. Detalle LDT.

Ensayos de laboratorio

En los ensayos se aplicó la carga dinámica en el extremo del elemento tipo viga, según el protocolo apropiado para cada tipo de sección. La toma de datos se hizo por medio del colector automático de datos y los propios del gato con el cual se aplica la carga. En la figura 22 se observa el montaje general del ensayo.

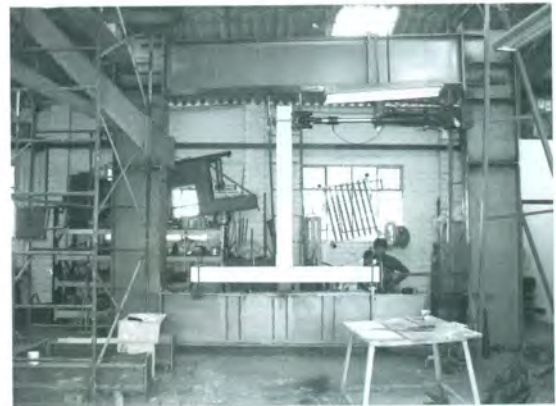


Figura 22. Aplicación de cargas con gato servocontrolador.

RESULTADOS

Derivadas del protocolo de carga y el procesamiento de los datos, se obtienen gráficas histeréticas como las mostradas en las figuras 23 a 26, así:

Curvas momento-rotación

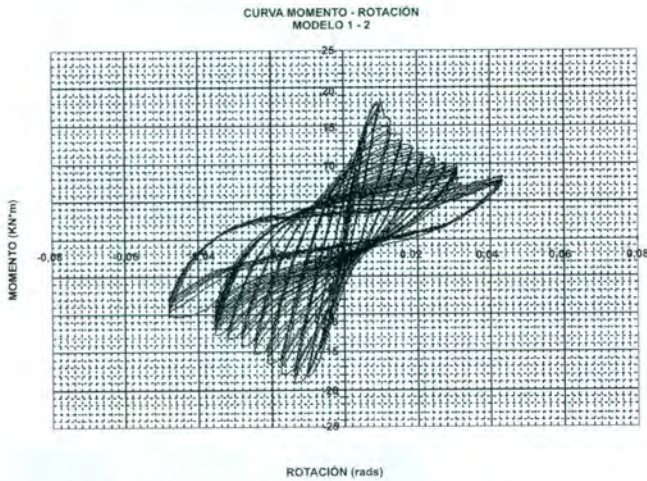


Figura 23. Curva momento-rotación modelo 1-2.

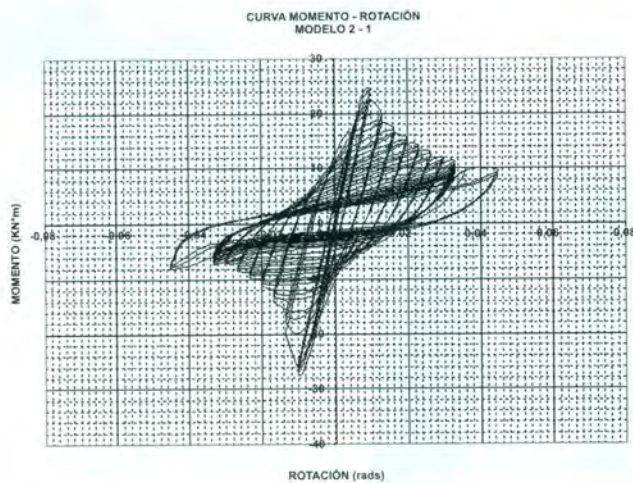


Figura 24. Curva momento-rotación modelo 2-1.

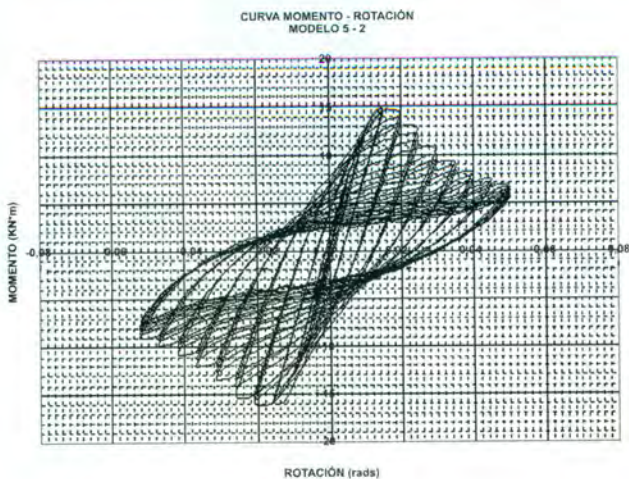


Figura 25. Curva momento-rotación modelo 5-2.

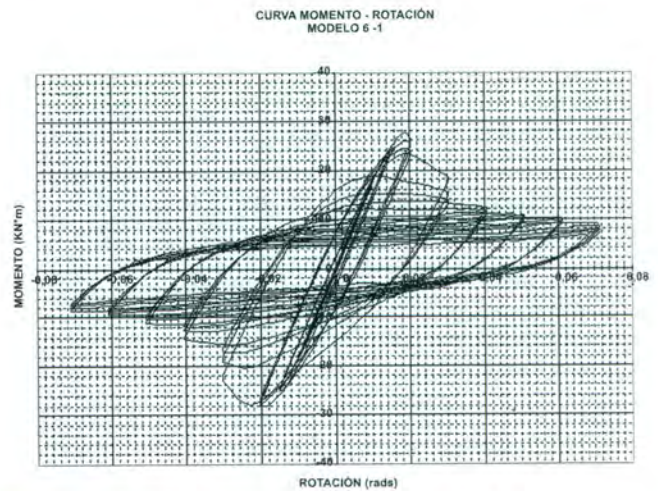


Figura 26. Curva momento-rotación modelo 6-1.

Influencia de las platinas de continuidad

La influencia de las platinas se observa al comparar los resultados obtenidos para los modelos que sí las tenían frente a los modelos que no. En términos generales, el momento lineal del ensayo se incrementa entre 1,69 y 2,05 veces. Para el 80% del momento máximo se tiene una variación entre 1,80 y 1,85. El momento asociado a 0,01 radianes de rotación varía entre 1,53 y 1,55 veces. El momento asociado a 0,02 radianes de rotación está entre 1,83 y 1,94 veces. El momento asociado a 0,04 radianes de rotación varía entre 1,41 y 1,55 veces. El momento máximo experimental se incrementa entre 1,80 y 1,85 veces. La rotación asociada al momento lineal varía entre 1,36 y 1,88 veces. Las rotaciones asociadas al momento máximo varían entre 1,27 y 1,59 veces. Las rotaciones asociadas al 80% del momento máximo varían entre 1,04 y 1,19.

Curvas de degradación

Otro factor importante que se analiza es la tendencia a la degradación de la resistencia una vez que se alcanzan los momentos máximos experimentales. Esta curva (figura 27) se traza tomando la parte lineal de los primeros ciclos de carga, y una vez alcanzado el máximo valor de momento, se unen los puntos máximos de los momentos de cada triada de ciclos de carga, hasta un valor máximo de 0,04 radianes de rotación de la conexión. En las figuras 28 y 29 se visualiza la correlación existente entre el M_y y el $M_{máx}$ con valores de momento de particular interés, como (M_e , M asociado a 0,01, 0,02 y 0,04 radianes de rotación).

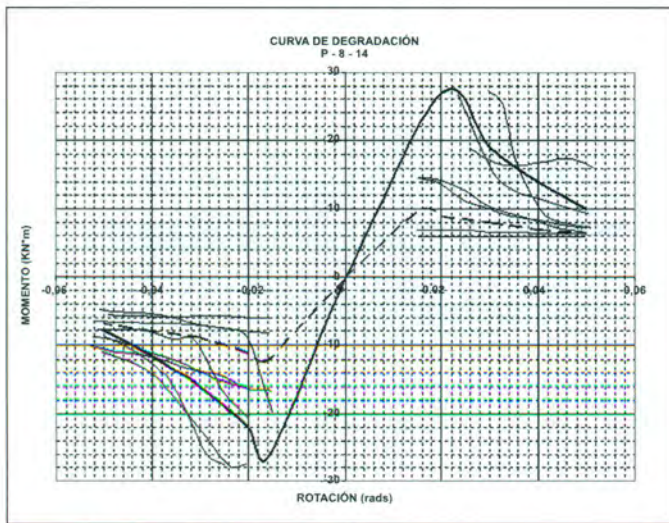


Figura 27. Curvas de degradación P-8-14.

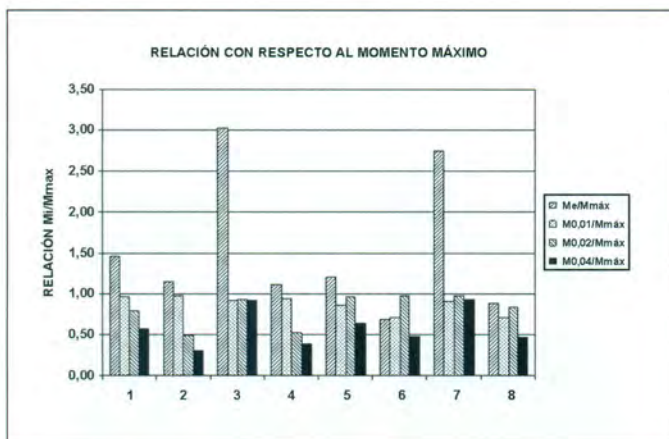


Figura 28. Relación de los momentos con respecto al momento máximo.

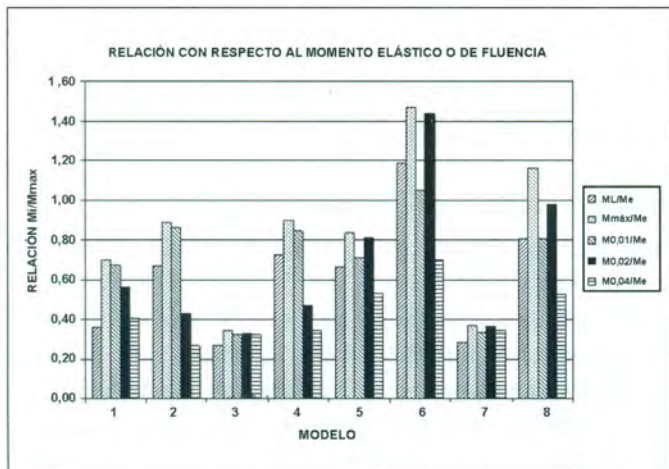


Figura 29. Relación de los momentos con respecto al momento elástico M_y .

Tipos de falla

En los ensayos se presentaron los siguientes tipos de falla, que aparecen en las figuras 30 a 33:

- Pandeo local del patín por compresión.
- Desgarramiento del patín del elemento columna en la zona de placa de asiento.
- Desgarramiento en el elemento viga por tensión.
- Pandeo local del patín entre soldaduras en la zona de mayor momento flector.
- Pandeo del alma a una distancia $d/2$.
- Pandeo local del patín, el cual es desplazado por la presencia de la platina de asiento.
- Cizallamiento de los patines por ciclos de tensión y compresión.

Figura 30. Pandeo local del patín por compresión.



Figura 31. Pandeo del patín entre soldaduras. Zona de mayor momento.

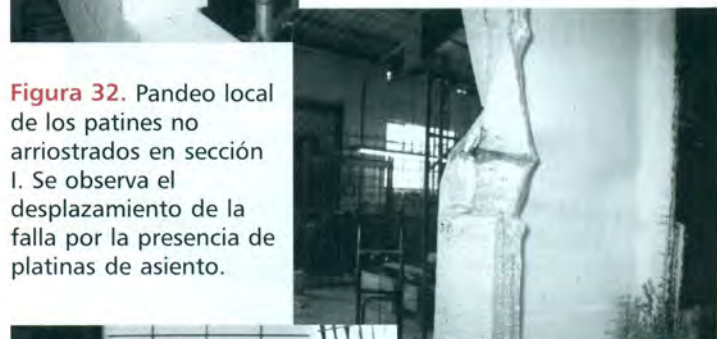


Figura 32. Pandeo local de los patines no arriestrados en sección I. Se observa el desplazamiento de la falla por la presencia de platinas de asiento.

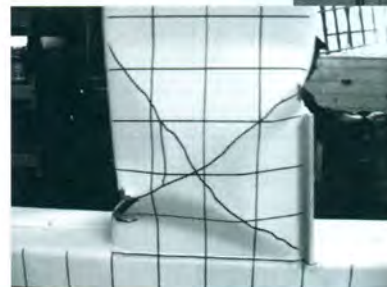


Figura 33. Diagonal de pandeo desplazada por efecto de la platina de asiento.

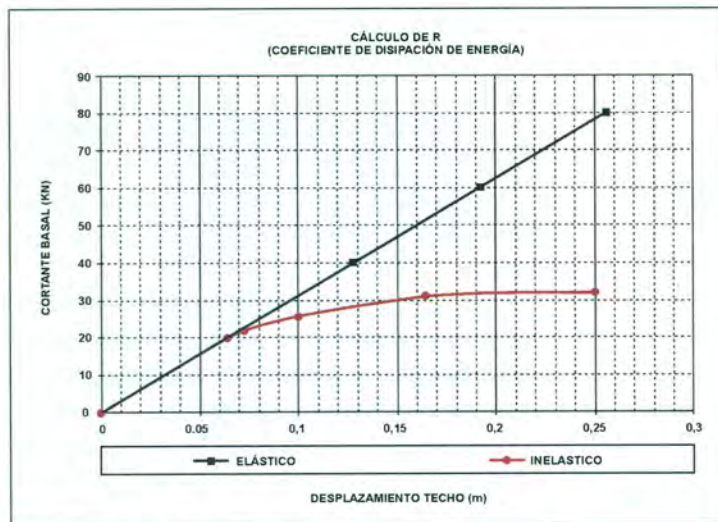


Figura 34. Cálculo del coeficiente de disipación de energía, R .

Estimación del coeficiente de disipación de energía, R

Con el fin de establecer un rango de valores razonable para el diseño de pórticos diseñados con los perlines y conexiones ensayadas, se hace un análisis estático no lineal sobre un pórtico típico de tres pisos. Cabe anotar que se usaron las curvas de degradación de rigidez obtenidas, las cuales muestran el comportamiento de la conexión cuando ésta es sometida a deformaciones mayores que el rango elástico.

De la figura 34 se deduce que el valor del R varía entre 1,33 y 1,85 para este tipo de estructuras y para las conexiones empleadas, el cual se calcula básicamente para un mismo valor de desplazamiento de techo, como el cociente entre el cortante basal correspondiente a la curva elástica y la inelástica; por otra parte, es necesario tener en cuenta que la degradación de rigidez limita en gran manera la respuesta de la estructura en el rango inelástico debido a la aparición de pandeos locales, manifestándose en la curva de capacidad como una pérdida de resistencia y rigidez lateral, en donde con un incremento de carga horizontal se presentan los fenómenos de pandeo local y el momento tomado por

el elemento debe redistribuirse a los elementos adyacentes.

CALIBRACIÓN DEL MODELO TEÓRICO MATEMÁTICO

Se encuentran relaciones que corresponden a los resultados obtenidos para el modelo por elementos finitos con respecto a los resultados experimentales. Tanto gráfica como numéricamente se muestra que los datos experimentales son menores en el rango elástico y mayores en la incursión en el rango inelástico, en relación con el análisis con el modelo no lineal; cabe anotar que los datos experimentales corresponden a una envolvente de los puntos máximos para cada ciclo de carga.

Las diferencias pueden deberse a las siguientes razones:

- El modelo por elementos finitos, por ser teórico, no tiene en cuenta imperfecciones del material, variación del espesor de la lámina, efecto del formado en frío, esfuerzos residuales, condiciones asociadas a la parte experimental, como la fabricación, las condiciones de apoyo, la aplicación de la carga, los esfuerzos inducidos por la soldadura, e imperfecciones de la geometría de la sección transversal.

• La idealización bilineal del comportamiento esfuerzo-deformación del material, adoptada por la facilidad y agilidad que ofrece en la convergencia de la solución del modelo, limita la respuesta del modelo igualmente a un comportamiento bilineal mostrado con claridad, pues no permite que el material alcance esfuerzos mayores, los que sí se observaron efectivamente cuando se ensayaron las probetas, debido a fenómenos de endurecimiento por deformación y otros efectos.

El modelo permite identificar la variación de la posición del eje neutro a lo largo del modelo, en la cual se muestra que en la zona de aplicación de la carga (extremo izquierdo) prácticamente toda la sección está a compresión hasta una distancia aproximadamente “ d ”, para la cual el eje neutro coincide con el centroide geométrico de la sección.

De igual manera, los modelos no lineales permiten identificar puntos de interés, como aquellos en donde se presentan las máximas deformaciones a tensión y a compresión, y sitios potenciales de pandeo local por exceso de compresión; así mismo, permiten observar la distribución de esfuerzos en la zona de conexión, en donde las compresiones y las tensiones del elemento viga se transmiten a la columna.

En cuanto al modelo teórico no lineal con pandeo, éste arroja resultados similares al modelo solo no lineal, sin pandeo local en la parte de respuesta lineal; cuando se presenta una pequeña incursión en el rango inelástico se inicia un comportamiento errático, manifestado en altibajos en la curva de resistencia con una tendencia general a perder rigidez; esta condición hace que no sea válida la comparación con la curva de degradación de resistencia envolvente del modelo.

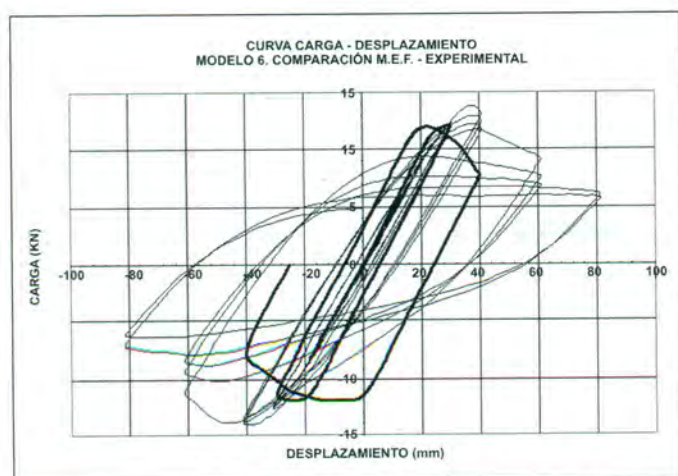


Figura 35. Curvas histeréticas. MEF no lineal trilineal - experimental. Conexión 6.

En la figura 35 se presenta la comparación entre el modelo no lineal con la curva del material trilineal y los datos experimentales, en la que la línea continua es la experimental y la línea a trazos es la correspondiente al modelo por elementos finitos; en primera instancia se aprecia que la máxima carga esperada es de 12,05 kN para una deflexión de 27,9 mm, mientras que experimentalmente se llega a 13,69 kN de carga máxima, asociada a una deflexión de 37,1 mm, presentándose un diferencia de 14% en cargas y de 33% en desplazamientos por debajo de lo encontrado experimentalmente. Por otro lado, las curvas histeréticas presentan comportamiento similar hasta dejar el rango elástico; entre éstas se establece una diferencia marcada, debido a que en la experimental se registra una degradación gradual de rigidez en la medida en que se aumentan la cantidad de ciclos y la amplitud de éstos. Esto se manifiesta en la disminución de la pendiente de la recta a lo largo del tiempo, en razón de que el modelo no tiene en cuenta la degradación de rigidez o resistencia asociada con la disipación de energía entre ciclos de carga.

CONCLUSIONES

- El uso de perfiles de lámina delgada para estructuras con disipación especial y moderada de energía no es técnicamente viable, debido a la aparición de fenómenos de inestabilidad local cuando los momentos actuantes se acercan al momento elástico resistente teórico y al bajo desempeño en el rango inelástico. Únicamente se recomendaría su uso

en estructuras con capacidad de disipación de energía mínima en el rango inelástico.

- Para los modelos que no tenían platinas de continuidad, se presentó falla en el elemento tipo columna, impidiendo que se llegara al momento M_c de la viga. Para todos los modelos se registró un aumento en momento resistente por la presencia de estas platinas entre 1,5 y 3 veces.

- Los modelos teóricos matemáticos estudiados con Ansys, para deflexiones y momentos flectores, presentan una correlación aceptable con los resultados experimentales, con una variación promedio del 10%.

- Los modelos con platinas de continuidad permiten que se desarrolle un mayor momento flector resistente frente a los modelos que no tienen platinas, pero presentan una marcada tendencia a perder rigidez.

- Los especímenes 6, que tienen placas de continuidad, alcanzaron valores de momento máximo de 1,50 veces con respecto a los que no las presentaban, indicando que lo estipulado en la norma es aun conservador cuando se cumplen estas condiciones.

- No se conoce el valor de M_c (momento elástico experimental) debido a que en los primeros ciclos de carga no se llevan los modelos a dicho momento.

- Se comprueba experimentalmente que las secciones cerradas o en cajón tienen mayor capacidad ante sollicitaciones de torsión o flexotorsión.

El uso de perfiles de lámina delgada para estructuras con disipación especial y moderada de energía no es técnicamente viable, debido a la aparición de fenómenos de inestabilidad local cuando los momentos actuantes se acercan al momento elástico resistente teórico y al bajo desempeño en el rango inelástico.

RECOMENDACIONES

- Mientras no se realicen más investigaciones, se recomienda usar un valor de R para diseño entre 1,3 y 1,9, para estructuras armadas con perfiles de lámina delgada con relaciones ancho espesor del orden de 200 a 300 para almas y de 30 a 40 para aletas, siempre y cuando se empleen platinas de continuidad.

- Se recomienda hacer ensayos monotónicos con el fin de conocer la curva de degradación en una condición no cíclica. Sin embargo,

la única forma de conocer la respuesta o el comportamiento inelástico es mediante ensayos histeréticos, con incursiones más allá del rango elástico.

- Estudiar efectos P- Δ debido a que los momentos se estudiaron para las vigas, en las cuales no hay fuerza axial significativa. Se pueden tener menores momentos para las

Tabla 2
Protocolo de carga recomendado

Etapa	Protocolo de carga		
1	3 ciclos A	0,5	δy
2	3 ciclos A	1,0	δy
3	3 ciclos A	1,5	δy
4	3 ciclos A	2,0	δy
5	3 ciclos A	2,5	δy
6	3 ciclos A	3,0	δy
7	3 ciclos A	3,5	δy
8	3 ciclos A	4,0	δy
9	3 ciclos A	4,5	δy
10	3 ciclos A	5,0	δy

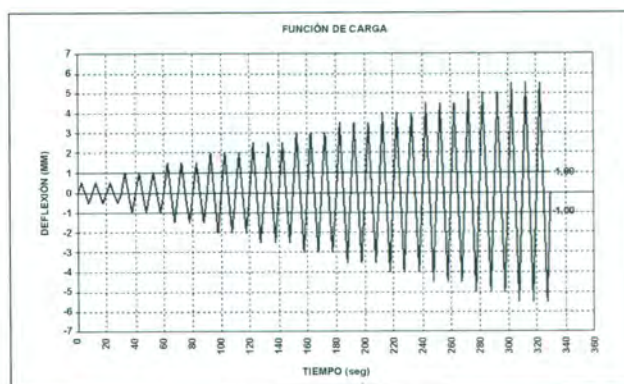


Figura 36. Protocolo de carga recomendado.

rotaciones esperadas, según los resultados de la presente investigación.

- Para secciones ensambladas y en puntos en los cuales se esperen compresiones por flexión, se recomienda tener una longitud de soldadura no menor que d (altura efectiva) del elemento, medida a lado y lado de dichos puntos.

- Diseñar protocolos de carga para elementos de lámina delgada. Para tal fin se recomienda emplear como primera aproximación el que se muestra en la tabla 2 y en la figura 36, ya que permite observar el comportamiento para cargas cercanas a M_y .

- Analizar por MEF, con curvas multilineales de esfuerzo-deformación, teniendo en cuenta carga y descarga y diferenciando entre éstas.

- Hacer ensayos cíclicos para conexiones con perfiles con otras relaciones ancho-espesor para almas mayores de 300 y para aletas mayores de 50.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de Colombia, en especial a los docentes y estudiantes de la Maestría en Estructuras.

Se recomienda hacer ensayos cíclicos para conexiones con perfiles con otras relaciones ancho-espesor para almas mayores de 300 y para aletas mayores de 50.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, por su apoyo humano y físico en el proceso de experimentación.

A Tecmo S.A., por la fabricación de los modelos físicos.

A Corpacero, por el suministro de los materiales.

REFERENCIAS

1. Applied Technology Council (1995). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. ATC-40, Redwood City, California.
2. Applied Technology Council (1996). *Cumulative Damage Tests and Fracture Analyses of Bolted-Welded Seismic Moment Frame Connections*. ATC-24, Redwood City, California.
3. American Institute of Steel Construction (AISC). (2002). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. Chicago, Illinois.
4. American Iron and Steel Institute (Aisi). (2002). *Cold Formed Steel Manual*. Washington.
5. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (1998). *Reglamento de Construcciones Sismorresistentes. Decreto 33 de 1998*. Colombia.
6. Daza, Luis G. (1996). *Nuevo enfoque para determinar el factor de modificación de respuesta*. Puerto Rico: Universidad de Puerto Rico, Recinto de Río Piedras, Departamento de Ingeniería.
7. Federal Emergency Management Agency (Fema) 350, 450. Fema 368 (2002). *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*.
8. López, Enrique (2006). *Precalificación de conexiones para pórticos de lámina delgada*. Proyecto de grado Maestría en Estructuras. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería.
9. Newmark, N.M. & Hall W.J. (1982). *Earthquake Spectra and Design*. Oakland, California: EERI Monograph Series, EERI.
10. Valencia, Gabriel (2002). *Estructuras de acero*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
11. Valencia, Gabriel (2004). *Notas de clase. Diseño sismorresistente de estructuras de acero*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
12. Yu, Wei-Wen (1991). *Cold-Formed Steel Design*, 2nd ed. Nueva York

Modelación fotoquímica del ozono en Cali-Yumbo

Mauricio Jaramillo Ayerbe, María Eugenia Núñez Cabrera, William Andrés Ocampo Duque, Diego Darío Pérez Ruiz y Gloria Esperanza Portilla

La contaminación fotoquímica contribuye al deterioro de la calidad del aire de las áreas urbanas por la generación de ozono troposférico. En este estudio se realiza una modelación del ozono en la región metropolitana de Cali-Yumbo (Colombia), que tiene como objetivo la comprensión de las relaciones entre las concentraciones máximas de ozono (O_3), como contaminante secundario, y los niveles iniciales de los contaminantes primarios, principalmente óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COV). En términos generales, el modelo predice que para las condiciones de la ciudad, un aumento en la relación NO_x/COV conllevaría una disminución en las concentraciones máximas de ozono, y viceversa.

Tropospheric ozone production is a photochemical process which contributes to air pollution over urban areas. In this study we model ozone (O_3) in the metropolitan area of Cali-Yumbo (Colombia), in order to establish the relationship between maximum ozone concentrations and initial amounts of primary pollutants, which are mainly nitrogen oxides (NO_x) and volatile organic compounds (VOC). In broad terms, the model predicts that, for the conditions prevailing in the city, an increase in the NO_x/VOC ratio would lead to a decrease in maximum ozone concentrations, and viceversa.

Keywords: air pollution, tropospheric ozone, air quality.

Grupo de Producción Más Limpia, Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana, Cali. mjaramil@puj.edu.co, mnunez@puj.edu.co, willocam@puj.edu.co, diegoperezr@yahoo.com, gportilla@puj.edu.co.

INTRODUCCIÓN

En la región urbana de Cali y Yumbo (Colombia), el incremento y concentración de la población, y el escaso desarrollo vial y urbanístico, unido a las emisiones atmosféricas causadas por las industrias y vehículos, son factores que generan efectos negativos en la calidad del aire y que afectan potencialmente la salud de los dos y medio millones de habitantes de esa zona metropolitana.

El ozono (O_3) es un gas irritante de las vías respiratorias. Por ser un contaminante secundario, se forma en la atmósfera inferior (troposfera) como resultado de procesos químicos entre

compuestos orgánicos volátiles (COV) y óxidos de nitrógeno (NO_x), con la influencia de la radiación solar. La disminución de las concentraciones de ozono supone a su vez la reducción de estos compuestos primarios o precursores, los cuales provienen principalmente de fuentes móviles, como vehículos, y fijas, como instalaciones industriales.

El propósito de este estudio es investigar los patrones de formación de ozono para el área de Cali y Yumbo utilizando modelos matemáticos de la cinética fotoquímica, que permiten relacionar concentraciones ambientales

de ese contaminante secundario con las fuentes de emisión de precursores. Estas relaciones no son directas, pues responden a una multitud de reacciones químicas y fotoquímicas que intervienen en el proceso, y tienen como consecuencia que, dependiendo de las concentraciones iniciales, una reducción en uno de los precursores puede resultar en un aumento del contaminante secundario, y viceversa.

Las emisiones atmosféricas causadas por las industrias y los vehículos son factores que generan efectos negativos en la calidad del aire y afectan potencialmente la salud.

El estudio tiene relevancia para el análisis de los efectos ambientales de programas de reconversión industrial y de sustitución de combustibles, como la utilización de gas natural vehicular. También con-

tribuye a la tarea de pronosticar la influencia de las fuentes generadoras futuras sobre la calidad del aire, a establecer las normas de emisión para estas nuevas fuentes, con el fin de mantener el nivel deseado de la calidad ambiental, y a anticipar los efectos ambientales de la puesta en marcha del sistema de transporte masivo que actualmente se construye para la ciudad de Cali.

METODOLOGÍA

Selección del modelo

El modelo utilizado en este estudio es el Ozip (EPA)^[1], el cual permite simular la formación de ozono y otros con-

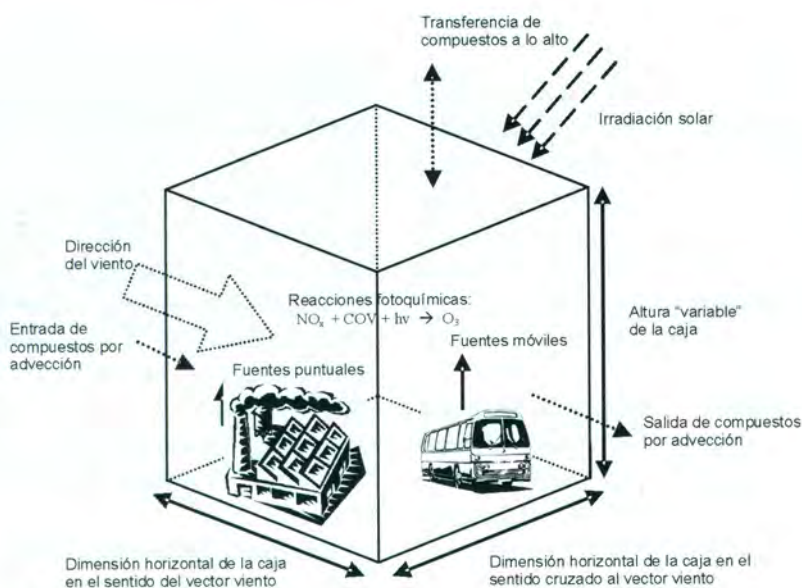


Figura 1. Esquema del modelo lagrangiano Ozip^[1].

taminantes secundarios en atmósferas urbanas, calculando los valores máximos (horarios) para un conjunto de condiciones iniciales, concentración de precursores, parámetros meteorológicos de transporte y emisiones. Estos resultados permiten a su vez construir isopletras, o curvas de concentración constante de ozono, en función de concentraciones iniciales de NO_x y COV.

El Ozip es un modelo utilizado para predecir la calidad del aire y para su simulación a nivel regional. Se clasifica como lagrangiano, porque tiene en cuenta volúmenes de control móviles, y puede considerarse también un modelo de caja (figura 1). Contempla una columna, o volumen conocido de aire, que viaja en la dirección del viento, con las dimensiones horizontales invariables a medida que la caja se mueve. La altura de la caja variará dependiendo de la altura de mezcla, la cual es a su vez función de las condiciones meteorológicas de la región de estudio.

En un modelo de caja los precursores, como NO_x y COV provenientes de fuentes puntuales, móviles y de área, entran a la caja y se transforman bajo

la acción de la luz solar en compuestos contaminantes secundarios, como ozono, teniendo en cuenta diferentes mecanismos o reacciones involucradas.

El modelo utilizado genera isopletras de ozono con valores cercanos al máximo permitido por la norma nacional para la calidad del aire (figura 2). La forma de las curvas determina los efectos

producidos por la minimización de precursores con un plan de control específico. Por ejemplo, en la estrategia planteada por la trayectoria A, que consiste en disminuir el precursor NO_x, el modelo predice incremento, no reducción, en la concentración resultante de ozono, por lo que no se aconseja este plan de acción en la región para la cual se ha hecho la simulación.

Para el modelo se seleccionan valores correspondientes a las más altas concentraciones de ozono reportadas en un período idealmente no inferior a tres años. En nuestro caso se utilizaron datos de monitoreo de calidad del aire recolectados por la autoridad ambiental regional (CVC).

Así, al inicio de la simulación, se asumen en la columna las concentraciones iniciales específicas para COV, NO_x y CO (monóxido de carbono). A medida que la columna se mueve sobre la ciudad o la región de estudio, la altura de la columna cambia debido a las variaciones horarias en la altura de mezcla (figura 3). Se supone que el ozono y los precursores presentes en la capa superior se mezclan rápidamente con el aire.

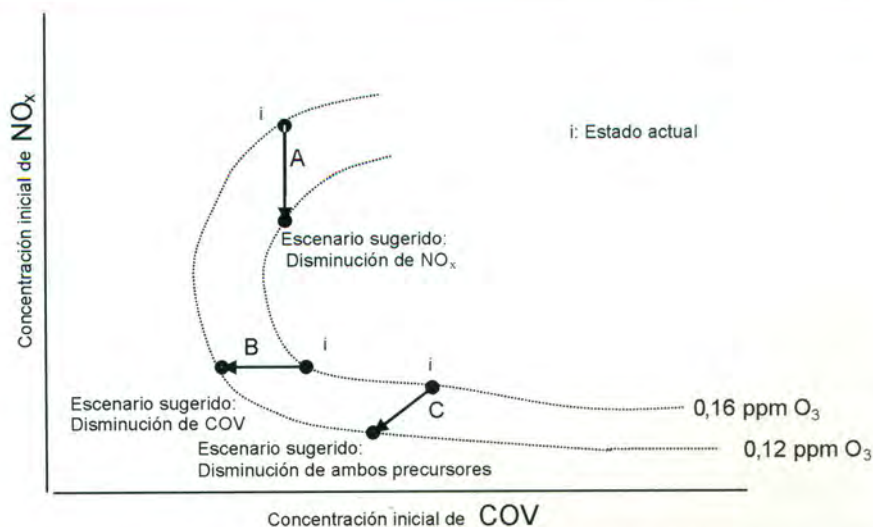


Figura 2. Forma general y usos de las isopletras de concentración de ozono generadas por el modelo Ozip para una región^[3].

La simulación se aplicó seleccionando un área representativa de la ciudad de Cali, de 24 km² con altos niveles de contaminantes, y se escogió el 27 de agosto de 1997 como fecha de estudio, día para el cual se dispone de mediciones completas de contaminantes primarios realizadas por la estación de monitoreo de calidad del aire de la CVC.

Datos de entrada del modelo

El modelo utilizado es semiempírico y requiere como datos de entrada valores que se agrupan con las siguientes características:

- *Área y fecha de la simulación.* Este dato se debe determinar para un área establecida en un día específico, área representativa con niveles elevados de contaminantes; para la celda de modelación se escogió un sector de 24 km² ubicado al norte de la ciudad de Cali, área de flujo vehicular alto^[2] dentro de la cual existen mediciones de los contaminantes primarios en la fecha escogida, miércoles 27 de agosto de 1997, mediciones realizadas por la CVC en la estación de monitoreo de calidad del aire Defensa Civil.

- *Niveles iniciales de contaminantes primarios.* En el sector escogido, en la fecha seleccionada, se obtuvieron mediciones de COV (1,2 ppmvC) y CO (3,0 ppmv) en la hora inicial de la simulación (ppmv son partes por millón por volumen). Para la generación de isopletas de concentraciones máximas de ozono, se requieren para la modelación de la variación diurna 121 réplicas, utilizando un rango de valores iniciales de NO_x desde 0 hasta 0,20 ppmv.

- *Modelo fotoquímico.* Existen varios modelos validados para las condiciones atmosféricas de nuestra región; el modelo seleccionado para este estudio fue el *Carbon Bond Mechanism IV* (CB4)^[3], que utiliza nueve especies agrupadas

usando criterios de reactividad química propios del modelo.

- *Latitud y longitud.* Con los valores iniciales de las mediciones de contaminantes primarios, la fecha y la posición geográfica, se determinaron los valores del ángulo de la posición solar respecto al cenit. La ubicación geográfica correspondiente a la ciudad de Cali especifica una latitud de 3,5 °N y una longitud de 76,5 °W.

- *Intervalo de tiempo de la simulación.* El lapso que se tuvo fue de 07:00 a 20:00, hora local, período en el cual la exposición a la luz solar da lugar a las principales reacciones fotoquímicas que generan ozono

- *Altura de la capa de mezcla y otras variables.* Se utilizaron promedios horarios anuales de sondeos realizados en el aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón en el año 1994 y reportados por R.M. Gómez^[4]. Éstos corresponden a una altura de 210 m a las 07:00 (inicio de la modelación), que aumenta en forma esencialmente lineal hasta 1.220 m a las 17:00, para después caer a menos de 400 m a las 18:00 (figura 3).

Temperatura: 24 °C

Presión: 684 torr. (912 mb)

Humedad relativa: 70 %.

Los anteriores tres parámetros se consideraron constantes durante el intervalo de la simulación y corresponden a valores medios en el mes de agosto.

- *Inventario de emisiones.* Las emisiones de NO_x, COV y CO se determinaron a partir de la información sobre fuentes móviles y fuentes fijas, según estudios previos^{[2], [5]}. En la modelación se supone que no ha habido una variación significativa en los flujos vehiculares *relativos* en los diferentes sectores de la ciudad en el intervalo de tiempo entre estas fechas^[6].

Las emisiones horarias totales para el sector elegido se resumen en la tabla 1. Estos valores, que se expresan en kilogramos de contaminante emitidos por hora y por kilómetro cuadrado, incluyen la contribución de fuentes fijas y móviles. Los valores de NO_x total incluyen NO y NO₂, escogiéndose un valor de 0,25 para la fracción NO₂/NO_x al comienzo de la simulación.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En las figuras 4, 5 y 6 se presentan los resultados de la modelación para la variación diurna de COV total, NO_x total y O₃, respectivamente, en los casos



Figura 3. Altura de la capa de mezcla en función de la hora local^[4].

Tabla 1
Densidad de emisiones horarias totales

Hora	Emisiones (kg/km ² -h)			Hora	Emisiones (kg/km ² -h)		
	Total COV	Total CO	Total NO _x		Total COV	Total CO	Total NO _x
7:00 a.m.	94,52	645,64	63,58	2:00 p.m.	87,38	575,81	53,51
8:00 a.m.	91,51	618,60	57,11	3:00 p.m.	85,79	557,93	54,55
9:00 a.m.	88,98	593,01	53,56	4:00 p.m.	84,78	548,80	51,23
10:00 a.m.	84,18	542,66	50,60	5:00 p.m.	86,99	569,04	53,95
11:00 a.m.	88,70	591,67	54,16	6:00 p.m.	91,27	611,15	56,85
12:00 m	93,63	649,64	54,25	7:00 p.m.	85,03	543,46	49,71
1:00 p.m.	88,34	585,47	54,58	8:00 p.m.	70,46	384,43	40,26

Fuente: los autores.

considerados con concentración inicial de NO_x: 0,060 ppmv (NO_x bajo, línea sólida) y 0,120 ppmv (NO_x alto, línea punteada).

Variación diurna de la concentración de COV. En la figura 4 se muestra que hay poca diferencia entre los resultados de las predicciones del modelo para ambos casos de NO_x inicial, excepto al comienzo (07:00 a 09:00) y al final de la modelación (19:00 a 20:00). La disminución en los niveles de COV entre las 10:00 y las 15:00 es consistente con el comportamiento esperado a partir de las reacciones fotoquímicas que los afectan.

Variación diurna de la concentración de NO_x total. Las observaciones de los resultados del modelo para NO_x total mostrados en la figura 5 son similares a las de la variación diurna de los COV. La disminución de concentraciones comienza entre las 08:00 y 10:00, extendiéndose hasta las 15:00, y es característica de las reacciones fotoquímicas que al incrementar sus tasas de reacción, debido al aumento de la elevación solar, llevan a la disminución de los óxidos de nitrógeno y al aumento del ozono. Dicha disminución, sin embargo, es poco pronunciada y esto puede deberse a la combinación de altas densidades en las emisiones y una baja altura de la capa de mezcla.

Variación diurna de la concentración de O₃. En la figura 6 se muestra la ocurrencia de concentraciones máximas alrededor de las 15:00 a 16:00 hora local,

seguidas de una disminución relativamente rápida después de las 17:00. Este incremento está relacionado directamente con la formación de ozono a medida que las reacciones fotoquímicas se ven favorecidas cuando el sol asciende.

La incertidumbre generada por el desconocimiento del valor inicial de

NO_x es apreciable en las horas de baja incidencia de los rayos solares. Para los valores estimados de ozono (figura 6) hay una diferencia del 8%, la cual se presenta a las 16:00 horas cuando se observa un valor de concentración de ozono máximo de 0,120 y 0,130 ppm, según el valor inicial de NO_x seleccionado.

Isopletras de concentración de ozono. En la figura 7 se muestran las curvas de concentración máxima de O₃ (isopletras) en función de los valores iniciales de COV (ppmvC) y de NO_x (ppmv). En este caso, las concentraciones iniciales de COV variaron desde 0,04 hasta 3,0 ppmvC, y las de NO_x desde 0 hasta 0,20 ppmv. Como criterio para esta variación, se consideró que el rango de concentraciones iniciales de los precursores

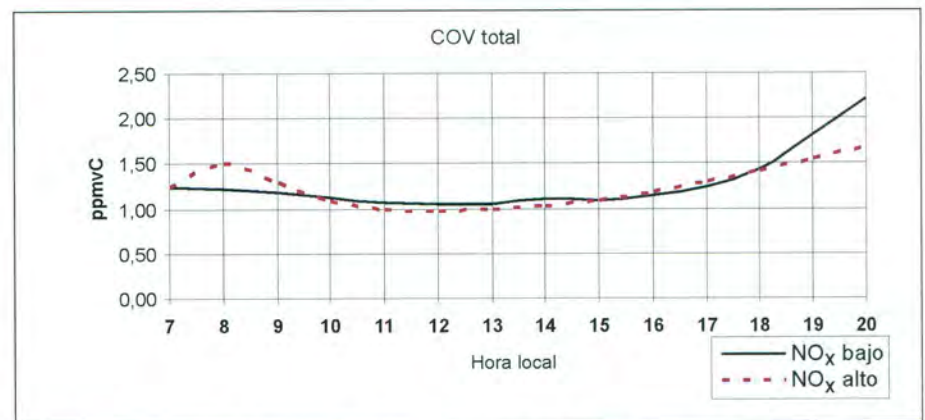


Figura 4. Variación diurna de la concentración de COV total para los dos valores iniciales de NO_x (0,060 ppmv, NO_x bajo, y 0,120 ppmv, NO_x alto).

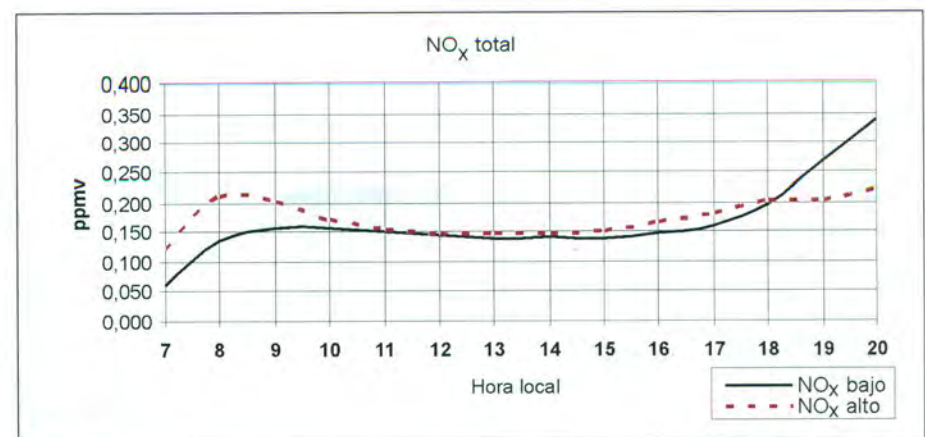


Figura 5. Variación diurna de la concentración de NO_x total para los dos valores iniciales de NO_x (0,060 ppmv, NO_x bajo, y 0,120 ppmv, NO_x alto).

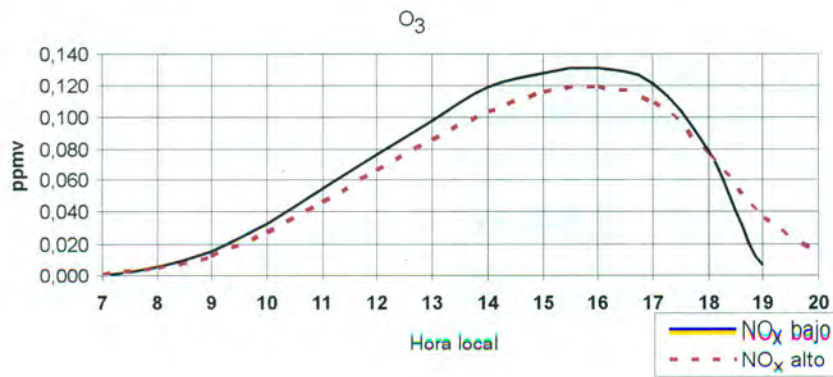


Figura 6. Variación diurna de la concentración de O₃ para los dos valores iniciales de NO_x (0,060 ppmv, NO_x bajo, y 0,120 ppmv, NO_x alto).

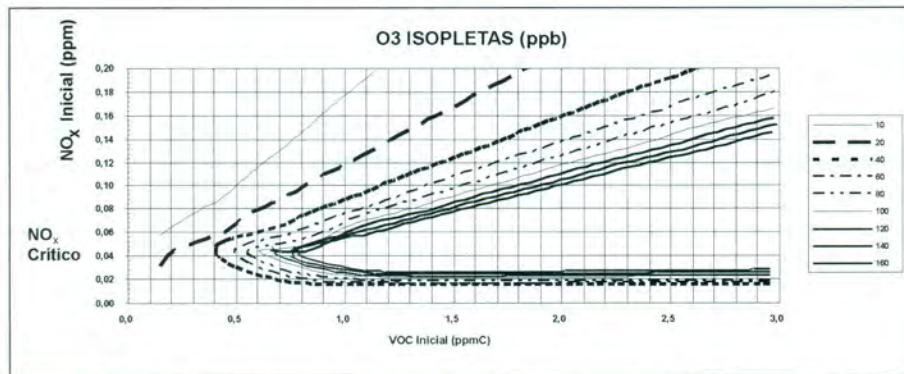


Figura 7. Isopletras de O₃ en función de concentraciones iniciales de NO_x y COVs.

utilizadas en la modelación para las isopletras de ozono debe corresponder, aproximadamente, al doble de los valores empíricos al inicio de la simulación.

Puede concluirse que con valores iniciales de NO_x entre 0,060 y 0,120 ppmv, la situación en el diagrama de isopletras, señalado en la figura 7 con una línea sólida, indica una combinación de COV elevados relativos a los óxidos de nitrógeno, en forma tal que una disminución en los NO_x iniciales, manteniendo los COV iniciales constantes, llevaría a un aumento en las concentraciones de ozono.

En la tabla se presenta la relación entre los datos de entrada al modelo (NO_x base) y las variaciones de los contaminantes con respecto a la formación de ozono.

En términos generales, un aumento en la relación NO_x/COV redundaría en una disminución de la concentra-

ción de ozono resultante; el caso contrario se da para una reducción de dicha relación. Para establecer la variación de la relación de NO_x/COV, se podría determinar una ecuación general representada por $COV = NO_x + [C/NO_x^z]$, donde C es una constante que depende del valor de la isopletra y z un exponente, que según la disposición de las curvas debe ser constante también.

Datos de monitoreo

La modelación de la variación diurna de los COV mostrada en la figura 4 puede contrastarse con las mediciones correspondientes realizadas en la estación de monitoreo en la fecha escogida (figura 8). Puede apreciarse un marcado descenso en las concentraciones de COV después de las 11:00 horas, característico del resultado de las reacciones fotoquímicas, y un aumento después de las 16:00 a medida que disminuye la intensidad de la radiación solar. De manera menos pronunciada, este comportamiento puede apreciarse en los resultados de la variación diurna de los COV que arroja la simulación (figura 4). En las mediciones se observa una disminución de COV después de las 17:00 que puede deberse a efectos de transporte y dispersión y por tanto no se refleja en la modelación. La diferencia entre las mediciones y la simulación puede estar relacionada también con el modelo de altura de capa de mezcla utilizado y sugiere que en la fecha mencionada dicha altura se incrementó significativamente por encima de los valores considerados al correr el modelo, en especial entre el mediodía local y las 17:00.

CONCLUSIONES

- El modelo determina una concentración de NO_x crítica (aproximadamente 0,045 ppm) para la cual, al mantener

Tabla 2 Variación de concentraciones de ozono según variación de precursores

Contaminante base-rango	NO _x	COV	Variación de concentración de ozono
Valor inicial NO _x 0,060 - 0,120 ppmv	Disminución de NO _x iniciales	Valor inicial constante	Aumento
Rango menor de NO _x a 0,060 ppmv	Aumento del NO _x inicial por encima del NO _x crítico	Valor inicial constante	Disminución
Rango menor de NO _x crítico o 0,045 ppm	Reducción del NO _x inicial por debajo del crítico	Valor inicial constante	Aumento
Rango constante	Valor inicial constante	Aumento valor inicial	Aumento

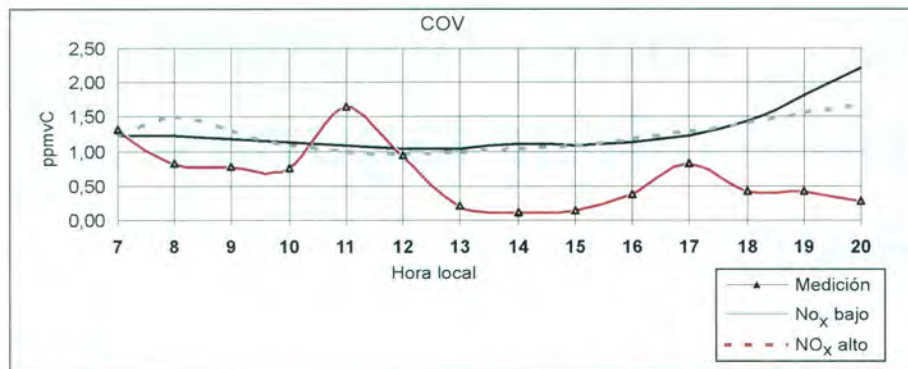


Figura 8. Variación diurna de COV: mediciones realizadas por la CVC el 27 de agosto de 2003 y resultados de la modelación (figura 4) para los dos valores iniciales de NO_x.

los COV iniciales constantes, un incremento en el NO_x inicial por encima del valor crítico conlleva una disminución en la concentración de ozono. En contraste, para condiciones de COV iniciales constantes, una reducción del NO_x inicial por debajo del valor crítico implica una disminución en la concentración de ozono. Por otro lado, si se considera un valor inicial de NO_x constante, en cualquier caso un aumento en el valor inicial de COV produce un aumento en los valores de concentración de ozono esperados. En términos generales, se debe considerar que un aumento en la relación NO_x/COV causa una disminución de la concentración de ozono resultante y viceversa.

• La falta de mediciones meteorológicas como perfiles verticales de temperatura y presión, de los cuales pueden derivarse datos sobre la altura de la capa de mezcla, así como la carencia de información sobre mediciones de NO_x en la estación utilizada para la obtención de los datos de entrada, contribuyen a la incertidumbre en los resultados de la modelación en los procesos que afectan las concentraciones de contaminantes. Esto es válido para modelos relativamente simples, como el utilizado en el presente estudio, y mucho más para modelos complejos que puedan aplicarse en el futuro.

• Las mediciones de compuestos orgánicos volátiles (COV) son importantes en el monitoreo de la calidad del aire por la incidencia que estos hidrocarburos tienen en la formación de contaminante secundarios.

• La presencia de COV se atribuye en la región principalmente a las fuentes móviles (parque automotor). La escasa normatividad y regulación sobre la presencia de COV en el aire urbano no limita las altas concentraciones de este precursor, el cual es directamente responsable por la formación de ozono, luego la reducción de la concentración de COV es decisiva.

• La presencia de NO_x se atribuye en la región a las fuentes puntuales. De acuerdo con la modelación, la reducción en las emisiones de NO_x no es tan determinante al establecer controles para la contaminación en la ciudad. Los efectos inversos de la variación de los óxidos de nitrógeno –dependiendo de su concentración inicial– en las concentraciones de ozono ilustran la importancia de la modelación para disponer de estrategias efectivas de mejoramiento.

• El establecimiento de controles ambientales para mejorar la calidad del aire se debe focalizar en el sector transporte. El cumplimiento en la reducción de COV se puede conseguir previo establecimiento de una norma ambien-

tal regional y nacional sobre la concentración máxima horaria y diaria de COV en el aire urbano.

• El monitoreo de calidad del aire debe contemplar también la medición de las variables que afectan el transporte y la cinética de los contaminantes, como por ejemplo la meteorología y el perfil de temperaturas para la determinación de la capa de mezcla.

• Se ha demostrado con estas aproximaciones que se sobrepasa en repetidas ocasiones la norma nacional de calidad del aire en la ciudad y que es importante establecer mecanismos de control y planes de reducción con interés y voluntad gubernamentales. Adicionalmente, es fundamental contar con un inventario de emisiones actualizado para apoyar la modelación e interpretar en un contexto integral los datos de monitoreo.

REFERENCIAS

1. U.S. Environmental Protection Agency (2001). Our Built and Natural Environments, A Technical Review of the Interactions between Land Use, Transportation, and Environmental Quality, Doc. No. EPA 231-R-01-002, enero.
2. Jaramillo, M., Núñez, M.E., Ocampo, W., Pérez, D. & Portilla, G. (2004). "Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos convencionales en la zona de Cali-Yumbo". *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, No. 31, pp. 38-48.
3. Shere, K.L. & Demerjian, K.L. (1984). "User's guide for the photochemical box model (PBM)", EPA-600/8-84-022A. (NTIS Accession Number PB85-137 164) U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.
4. Gómez, R.M. (2001). "Modelación de la calidad del aire en el Valle del Cauca, Colombia". Tesis de Maestría. México: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
5. Jaramillo, M., Núñez, M.E., Portilla, G., Ocampo, W. & Pérez, D. (2003). "Emisiones de contaminantes atmosféricos convencionales por fuentes móviles en el sector urbano de Cali". *Epíclidos* (Revista de la Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, seccional Cali), Vol. 2, No. 1, pp. 73-90.
6. Geicol Ltda. (2003). *Estudios definitivos de los elementos de infraestructura de los corredores troncales del Sistema Integrado de Transporte Masivo de Pasajeros de Santiago de Cali*. Informe Final. Estudios de Tránsito, municipio de Santiago de Cali, Metrocali S.A. Cali, Colombia: diciembre

Uso de la AUV_{254} como sustituto de la DBO para evaluar lagunas de estabilización

Fabio Leonardo Mesa Ramírez* y Jairo Alberto Romero Rojas**

El propósito de este artículo es evaluar la utilidad del ensayo de absorbancia de luz ultravioleta a 254 nm, AUV_{254} , como sustituto del ensayo convencional de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) para cuantificar la calidad orgánica del agua residual y, por tanto, la eficiencia de una planta de tratamiento de aguas residuales. Se recogieron muestras de aguas residuales, durante diez semanas, para su caracterización y para complementar la investigación hecha en el año 2004⁽²⁾. El ensayo de AUV_{254} es representativo de la calidad orgánica del agua residual y permite, de manera rápida y sencilla, evaluar el sistema de tratamiento.

Palabras claves: AUV_{254} ; DBO; lagunas de estabilización; aguas residuales.

INTRODUCCIÓN

La cuantificación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) en las lagunas de estabilización es un requisito necesario para conocer los parámetros de diseño de dichos sistemas y para controlar su rendimiento. Sin embargo, se requieren cinco días para obtener su valor y, además, es un ensayo que debe realizarse repetidamente para obtener resultados aceptables. La factibilidad de utilizar AUV_{254} como parámetro sustitutivo de la DBO constituye un objetivo principal en la evaluación de la contaminación orgánica por métodos sencillos, más rápidos y más económicos^(1,2).

Algunos componentes orgánicos comúnmente encontrados en el agua y en aguas residuales como lignina, tanino, sustancias húmicas y varios componentes aromáticos, absorben fuertemente radiación ultravioleta⁽³⁾. La AUV_{254} es un parámetro sustitutivo útil para medir componentes orgánicos de aguas naturales, salinas y residuales. Pueden existir fuertes correlaciones entre la AUV_{254} y el contenido de carbono orgánico, el color, los precursores de trihalometanos y otros subproductos de la desinfección. La ab-

sorción UV también puede emplearse para control de efluentes industriales y para evaluar eficiencia en remoción orgánica.

Los compuestos orgánicos del agua absorben luz UV en proporción a su concentración. Las muestras son filtradas o centrifugadas para controlar las variaciones en la absorción UV causadas por partículas. El ajuste de pH antes de filtrar es opcional. La selección de la longitud de onda es arbitraria. Históricamente, 253,7 nm se ha usado como la longitud de onda estándar; no obstante, un analista experimentado

puede escoger una longitud de onda diferente que minimice las interferencias de compuestos distintos del de interés y maximice la absorción de éste.

Las principales interferencias en la medida de AUV_{254} se deben a las partículas coloidales, a sustancias orgánicas diferentes de la de interés y a compuestos inorgánicos absorbentes de luz UV, principalmente hierro ferroso, nitrato, nitrito y bromuro. Algunos oxidantes y agentes reductores, como el ozono, clorato, clorito, cloraminas y tiosulfato, también absorberán luz UV a 253,7 nm. Muchas aguas naturales y aguas

El ensayo de AUV_{254} es representativo de la calidad orgánica del agua residual y permite, de manera rápida y sencilla, evaluar el sistema de tratamiento.

* Ingeniero civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

** I.C., MEEE, profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería. jromero@escuelaing.edu.co

procesadas en plantas de potabilización están libres de estas interferencias. La AUV, por la materia orgánica, puede variar para valores de pH por debajo de 4 o arriba de 10; para el ensayo se deben evitar estos valores.

Un barrido de AUV entre 200 y 400 nm puede usarse para determinar la presencia de interferencias. Los espectros típicos de absorción de materia orgánica natural son curvas sin características distintivas que aumentan la absorción con el decrecimiento de la longitud de onda. Los picos agudos o irregularidades en la absorción pueden ser indicadores de interferencias inorgánicas o de contaminantes orgánicos inesperados. Como muchos compuestos orgánicos en aguas y aguas sucias (ejemplo: ácidos carboxílicos y carbohidratos) no absorben significativamente luz UV, se debe correlacionar la AUV con el carbono orgánico disuelto o con la Demanda Química de Oxígeno (DQO) soluble. Con todo, dichas correlaciones varían de un agua a otra y entre aguas crudas y aguas tratadas. Además, la oxidación química (ejemplo: ozonización, cloración) de la materia orgánica puede reducir la AUV sin remover la materia orgánica y así puede cambiar las correlaciones. La AUV y las correlaciones con ella son específicas de cada sitio y pueden no ser comparables de una fuente de agua a otra. El ensayo, sin embargo, por su sencillez, representa un sustituto de la DBO y de la DQO que justifica su evaluación.

Se considera Materia Orgánica Natural⁽⁵⁾ (MON) a las sustancias húmicas provenientes del suelo y producidas en aguas naturales mediante procesos químicos y biológicos de descomposición de vegetación y otros materiales orgánicos. Las sustancias húmicas se definen según el método para extraerlas del agua o del suelo y se dividen en ácidos fúlvicos solubles y en ácidos húmicos menos solubles; en aguas naturales predominan los ácidos fúlvicos solubles.

La concentración de MON se expresa por el contenido de Carbono Orgánico Total (COT), el cual se considera igual al Carbono Orgánico Disuelto (COD), más el Carbono Orgánico Particulado (COP). Se define como COD aquel que pasa a través de un filtro de 0,45 μm de poro y COP aquel que es retenido sobre el filtro.

La mayor parte de las aguas subterráneas de Estados Unidos tienen un COD menor de 2 mg/L, aguas oligotróficas de lagos entre 2 y 10 mg C/L, aguas de ríos de montaña entre 1 y 3 mg C/L y aguas de ríos grandes entre 2 y 10 mg C/L. La concentración promedio de COT en aguas crudas de plantas de purificación, en Estados Unidos, es de 4 mg C/L. Existe una correlación directa entre el valor del COT de un agua y su Potencial de Formación de Trihalometanos (PFTHM), dada por la siguiente ecuación⁽²⁾.

$$\text{PFTHM} = 43,78 (\text{COT})^{1,248} \quad (1)$$

Donde:

PFTHM = Potencial de Formación de Trihalometanos.

COT = Carbono Orgánico Total, mg C/L.

La MON absorbe luz UV, por lo que la absorbancia de luz UV a una longitud de onda de 254 nm, AUV₂₅₄, se utiliza como indicador sustitutivo del COT. También se usa como indicador la relación entre la AUV₂₅₄ y la concentración de carbono orgánico, conocida como Absorbancia Específica de Luz Ultravioleta (AEUV).

$$\text{AEUV} = \frac{\text{AUV}_{254}}{\text{COT}} \quad (2)$$

Donde:

AEUV = Absorbancia Específica de Luz Ultravioleta, L/mg C cm.

AUV₂₅₄ = Absorbancia de Luz Ultravioleta a 254 nm, cm^{-1} .

COT = Carbono Orgánico Total, mg C/L.

Aguas con una fracción ácida húmica, generalmente con COD bajo, tienden a tener valores de AEUV menores de 2 L/mg C · m, mientras que aguas con fracción ácida húmica alta tienen valores de AEUV entre 3 y 5 L/mg C · m. En la práctica, de acuerdo con la ecuación anterior, aguas con contenido mínimo de COT tienen AUV₂₅₄ menores de 4 m^{-1} o 0,04 cm^{-1} .

En términos de DBO:

$$\text{AEUV} = \frac{\text{AUV}_{254}}{\text{DBO}} \quad (3)$$

Donde:

AEUV = Absorbancia Específica de Luz Ultravioleta, L/mg DBO cm.

AUV₂₅₄ = Absorbancia de Luz Ultravioleta a 254 nm, cm^{-1} .

DBO = Demanda Bioquímica de Oxígeno, mg O₂/L.

METODOLOGÍA

El sistema de tratamiento utilizado para este estudio es el de las lagunas de estabilización de Chía. La planta de tratamiento posee en la actualidad una estructura de entrada, compuesta por un tanque con aliviadero a la cual llega una tubería de 60 cm de diámetro, con una pendiente del 0,98% que transporta el agua del sector ubicado entre las calles 9 y 21 y las carreras 2 y 11 del municipio de Chía. Además, se conecta una tubería de 70 cm de diámetro que cuenta con una pendiente del 0,1%, que a su vez transporta las aguas residuales de la zona suburbana de la vereda de Bojacá hasta Tres Esquinas y del colector de Centro Chía. Mediante un sistema de derivación (*bypass*), en tubería de 60 cm de diámetro, se pueden descargar las aguas directamente al río Bogotá. Para realizar aforos posee una canaleta Parshall en

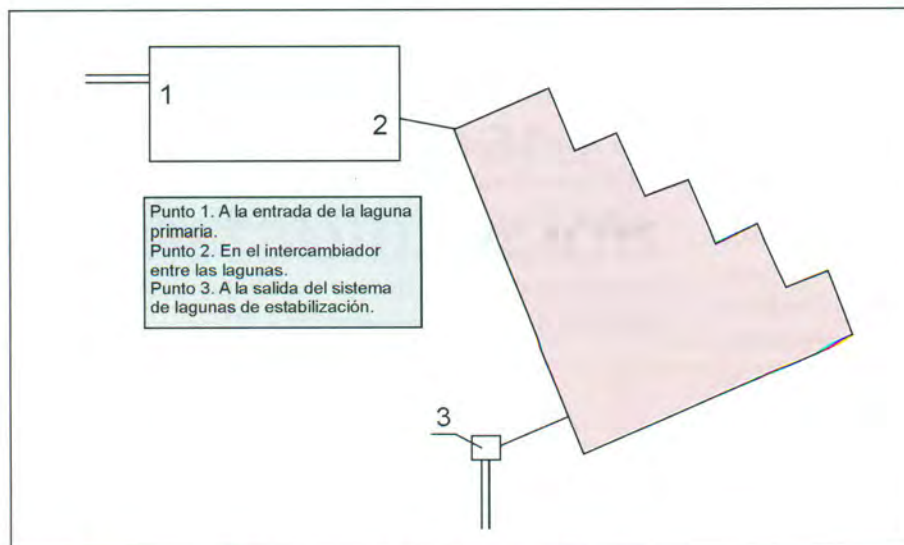


Figura 1. Esquema de las lagunas y puntos de muestreo.

la entrada al sistema, mientras que a la salida del mismo posee un vertedero triangular de 90°. El diseño del sistema de tratamiento contempló la construcción de dos lagunas en serie: la primera anaeróbica y la segunda facultativa. El caudal medio adoptado para el diseño de la planta fue de 100 L/s.

MUESTREO

Se realizó de manera manual en tres puntos del sistema de tratamiento, como se indica en la figura 1.

Punto 1. Entrada a la laguna primaria.

Punto 2. En el intercambiador entre las lagunas.

Punto 3. Salida del sistema de lagunas de estabilización.

Se tomaron muestras compuestas de un litro, proporcionales al caudal, a partir de cuatro muestras simples horarias en cada uno de los tres puntos, entre las 8:30 a.m. y las 11:30 a.m., durante diez semanas.

AFORO

Para el aforo se usó la canaleta Parshall ubicada en la unidad de entrada al sistema, y para el caudal efluente el vertedero triangular de 90° de la unidad de salida.

RESULTADOS

Los ensayos de DBO, AUV₂₅₄, OD, pH y temperatura, se hicieron de conformidad con el Standard Methods⁽³⁾.

- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). Método 5210B.
- AUV₂₅₄. Método 5910, sobre muestra centrifugada durante cinco minutos a la máxima velocidad de una máquina IEC Clinical Centrifuge.
- Oxígeno Disuelto (OD). Método 4500-O B.
- Temperatura. Método 2550 B.
- pH. Método 4500 H⁺B.

En las tablas 1 a 10 y en las figuras 2 a 8 se presentan los resultados de la caracterización del agua cruda y de los efluentes primario y secundario de la planta de tratamiento de aguas residuales, para el período 2005. En la tabla 11 y en las figuras 9 y 10 se incluyen los resultados de DBO, AUV₂₅₄ y AEUV para los años 2004 y 2005.

En la tabla 1 se pueden observar los resultados de oxígeno disuelto. En todos los casos el OD es igual a cero,

Tabla 1
Caracterización del agua residual

Fecha de muestreo	Caudales promedio		Clase	OD (mg/L)	Temperatura promedio (°C)	pH	DBO (mg/L)	AUV ₂₅₄ (cm-1)	AEUV (L/mg DBO cm)
Q _{afluente} (L/s)	Q _{efluente} (L/s)								
Ago-24	135,6	43,1	Cruda	0	17	7,62	199	1,055	0,0053
			Primaria	0	17	6,93	153	0,708	0,0046
			Secundaria	0	17	7,56	78	0,691	0,0089
Ago-31	45,6	43,1	Cruda	0	19	8,05	182	1,593	0,0088
			Primaria	0	19	7,17	120	1,093	0,0091
			Secundaria	0	19	7,54	70	0,732	0,0105
Sep-07	42,2	43,1	Cruda	0	19	7,80	231	1,509	0,0065
			Primaria	0	19	7,11	123	0,983	0,0080
			Secundaria	0	19	7,58	59	0,707	0,0120
Sep-14	38,8	43,1	Cruda	0	19	8,40	234	1,453	0,0062
			Primaria	0	18	7,20	169	1,069	0,0063
			Secundaria	0	17	7,84	57	0,699	0,0123
Sep-21	32,4	38,9	Cruda	0	19	7,76	287	1,579	0,0055
			Primaria	0	20	7,27	135	1,024	0,0076
			Secundaria	0	18	7,42	72	0,857	0,0119
Sep-28	64,2	38,9	Cruda	0	19	8,01	250	1,350	0,0054
			Primaria	0	20	7,24	129	0,724	0,0056
			Secundaria	0	19	7,73	68	0,615	0,0090
Oct-5	42,2	43,1	Cruda	0	19	7,50	223	1,387	0,0062
			Primaria	0	20	7,25	117	0,942	0,0080
			Secundaria	0	19	7,64	56	0,663	0,0118
Oct-12	26,4	43,1	Cruda	0	19	7,60	152	1,295	0,0085
			Primaria	0	20	7,10	108	0,836	0,0077
			Secundaria	0	18	7,26	56	0,754	0,0134
Oct-19	38,8	47,5	Cruda	0	19	7,37	221	1,256	0,0057
			Primaria	0	18	7,13	93	0,834	0,0090
			Secundaria	0	18	7,49	47	0,583	0,0124
Oct-26	64,2	43,1	Cruda	0	19	6,55	191	0,966	0,0051
			Primaria	0	19	6,47	53	0,645	0,0122
			Secundaria	0	18	6,90	42	0,621	0,0148

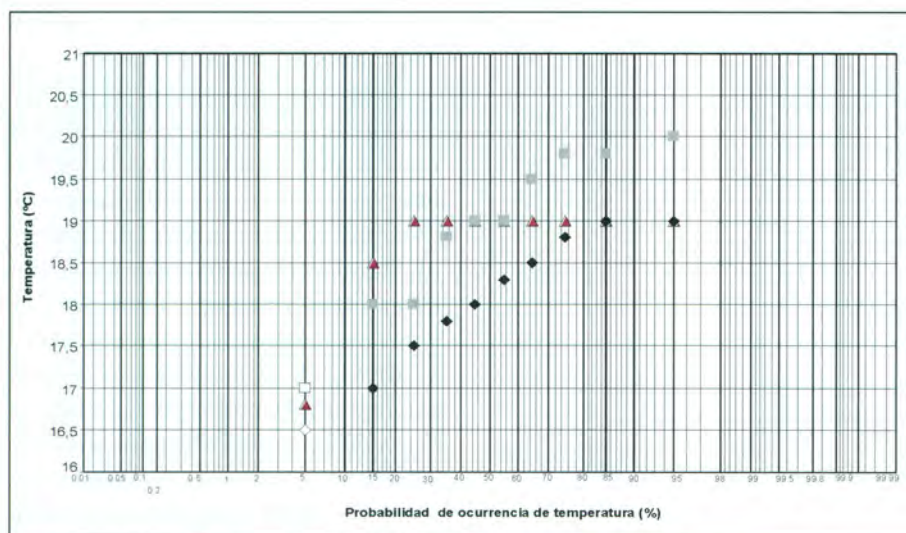


Figura 2. Temperatura del sistema de tratamiento.

Tabla 2
Eficiencias de remoción de DBO del sistema de tratamiento

Fecha de muestreo 2005	DBO (mg/L)			Eficiencia (%)		
	Agua cruda	Efluente primario	Efluente secundario	Primaria	Secundaria	Total
Ago-24	199	153	78	23	49	61
Ago-31	182	120	70	34	42	62
Sep-7	231	123	59	47	52	74
Sep-14	234	169	57	28	66	76
Sep-21	287	135	72	53	47	75
Sep-28	250	129	68	49	47	73
Oct-5	223	117	56	48	52	75
Oct-12	152	108	56	29	48	63
Oct-19	221	93	47	58	49	79
Oct-26	191	53	42	72	21	78
Promedio	217	120	61	44	47	71
Desv. estándar	38	32	11	15	11	7
Intervalo	152-287	53-169	42-78	23-72	21-66	61-79

Tabla 3
Características de operación de la laguna primaria

Fecha de muestreo 2005	Q _{afluente} (m ³ /d ha d)	DBO (mg/L)	COS (kg DBO/ha d)	COV (g DBO/m ³ d)	Tiempo de retención (d)
Ago-24	11.716	199	4.302	96	2
Ago-31	3.940	182	1.323	29	6
Sep-7	3.646	231	1.556	35	7
Sep-14	3.352	234	1.447	32	7
Sep-21	2.799	287	1.482	33	9
Sep-28	5.547	250	2.562	57	4
Oct-5	3.646	223	1.500	33	7
Oct-12	2.281	152	641	14	11
Oct-19	3.352	221	1.367	30	7
Oct-26	5.547	191	1.955	43	4
Promedio	4.583	217	1.813	40	6
Desv. estándar	2.717	38	1.000	22	2

por tanto, se corrobora el hecho de que todo el sistema de tratamiento funciona en condiciones anaerobias.

En las tablas 1 y 9, al igual que en la figura 2, se registran los valores de temperatura del agua, en los diferentes puntos de muestreo. Se puede apreciar que la temperatura máxima registrada fue de 20 °C y la mínima de 17 °C.

En la figura 3, como en las tablas 1 y 5, se registran los valores de DBO para el agua cruda, para el efluente primario y para el efluente secundario. Con un 95% de probabilidad se puede afirmar que la DBO del agua cruda es menor de 287 mg/L con un valor promedio de 217 mg/L, la DBO del efluente primario es menor de 169 mg/L con un valor promedio de 120 mg/L y la DBO del efluente secundario menor de 78 mg/L, con un valor promedio de 61 mg/L.

En la figura 3 se indica que el sistema de tratamiento genera un efluente con concentraciones de DBO menores que el límite establecido por la EPA de 65 mg/L, durante un 66% del tiempo. La DBO promedio del agua cruda es de 217 mg/L, la del efluente primario de 120 mg/L y la del efluente secundario de 61 mg/L. Como se observa en la tabla 2 y en la figura 5, la laguna primaria remueve hasta un 72% de DBO, en promedio un 44%; la laguna secundaria remueve hasta un 66% de DBO, en promedio un 47%, y la eficiencia global de remoción de DBO del sistema es de 61 a 79%, con un valor promedio del 71%. En general, lagunas anaeróbicas con temperaturas entre 11 °C y 20 °C tienen una eficiencia en remoción de DBO del 50%⁽⁴⁾.

En la tabla 3 se muestra como la laguna primaria tiene un tiempo de retención promedio de seis días y una eficiencia promedio de remoción de DBO del 44%. La laguna secundaria tiene un tiempo de retención promedio de 20 días y una eficiencia de remoción de DBO del 47%. El tiempo promedio de retención en las dos lagunas anaerobias es de 26 días, con una eficiencia de remoción promedio en DBO de 71%, valor que puede considerarse típico en tratamiento anaerobio de aguas residuales de baja concentración a bajas temperaturas.

En las tablas 3 y 4 se muestran los valores de las cargas orgánicas de operación de las lagunas primaria y secundaria. La carga orgánica superficial promedio de la laguna primaria, 1.813 kg DBO/ha·d, es una carga orgánica superficial típica de lagunas anaerobias, como era de esperarse. La carga orgánica superficial promedio de la laguna secunda-

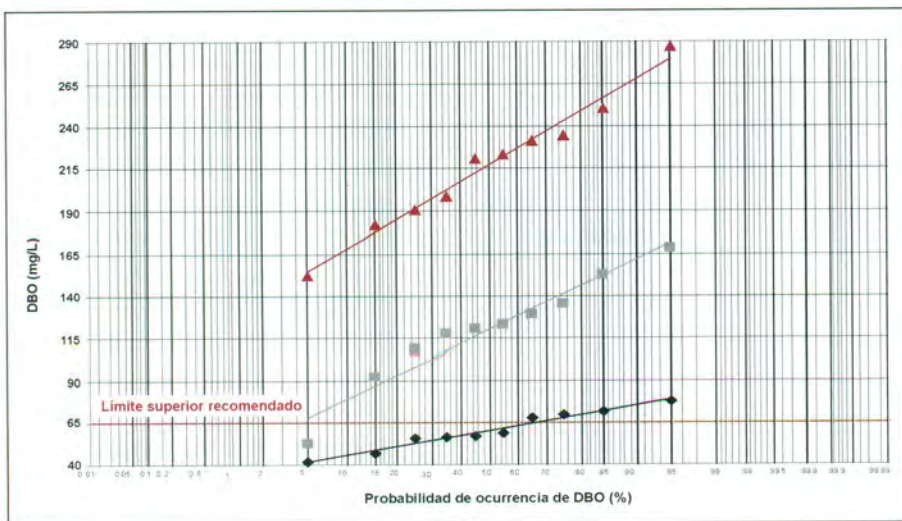


Figura 3. DBO del sistema de tratamiento.

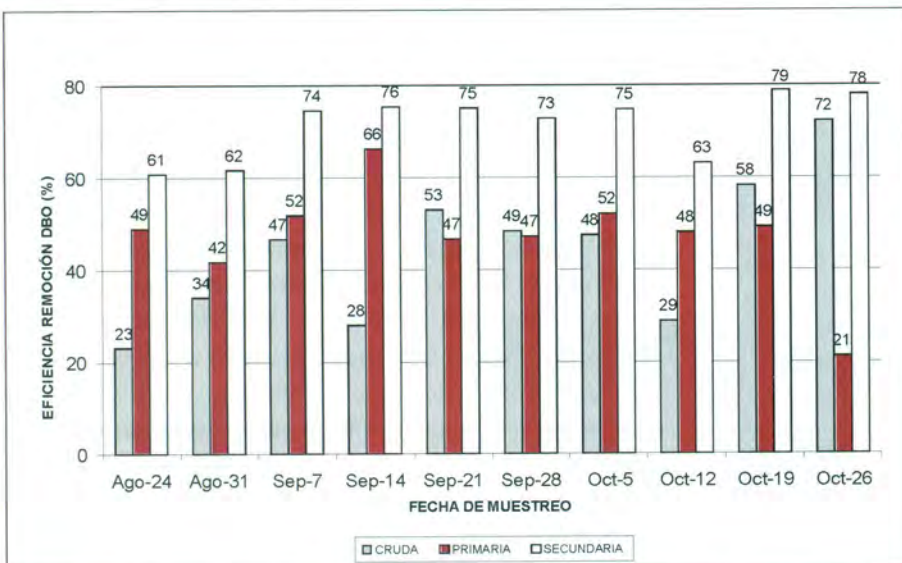


Figura 4. Eficiencia de remoción de DBO del sistema de tratamiento.

Tabla 4
Características de operación de la laguna secundaria.

Fecha de muestreo 2005	Q _{afluente} (m ³ /d)	DBO (mg/L)	COS (kg DBO/ha d)	COV (g DBO/m ³ d)	Tiempo de retención (d)
Ago-24	3.724	153	156	8	20
Ago-31	3.724	120	122	6	20
Sep-7	3.724	123	125	6	20
Sep-14	3.724	169	172	9	20
Sep-21	3.361	135	124	6	22
Sep-28	3.361	129	118	6	22
Oct-5	3.724	117	119	6	20
Oct-12	3.724	108	110	6	20
Oct-19	4.104	93	104	5	18
Oct-26	3.724	53	54	3	20
Promedio	3.689	120	120	6	20
Desv. estándar	210	32	31	2	1

ria, 120 kg DBO/ha·d, no excede la carga típica de diseño de lagunas facultativas para temperaturas de 17 a 20 °C, 200 kg DBO/ha·d según el modelo de Mara o 300 kg DBO/ha·d según el modelo de MacGarry y Pescod, contrariando el estado anaerobio observado. Además, la laguna secundaria exhibe un tiempo de retención de 20 días, y una carga orgánica volumétrica de 6 g DBO/m³ d, aceptables para lagunas facultativas. Se puede presumir que la causa de esta contradicción de operación se debe a pérdida excesiva en el volumen útil de la laguna por acumulación de lodos o sedimentos, o a concentraciones tóxicas de sulfuros, valores superiores de 8 a 10 mg/L-S.⁽⁶⁾, que no permiten el desarrollo de una zona fótica ni el apropiado crecimiento de la población algal.

En la tabla 8 y en la figura 8 se muestran los valores de pH observados en el sistema. Los valores de pH varían entre 6,55 y 8,04 para el agua cruda, con un promedio observado de 7,67; valores típicos de agua residual municipal. El pH del efluente primario oscila entre 6,47 y 7,27, intervalo de pH menor que el del agua cruda, debido probablemente al predominio de la primera etapa de digestión anaerobia o de fermentación ácida. El pH del efluente secundario varía entre 6,90 y 7,84, valores mayores que los del efluente primario, debido posiblemente a la presencia de la segunda etapa de la oxidación anaerobia, con el consecuente consumo de ácidos volátiles producidos en la primera etapa de digestión. Los valores de pH se mantienen en todos los casos dentro del intervalo exigido para vertimientos de aguas residuales.

Los valores observados de AUV₂₅₄ y AEUV se presentan en las tablas 6 y 7, y en las figuras 6 y 7. En dichas tablas y figuras se observa que la AUV₂₅₄ varía entre 0,58 y 1,59 cm⁻¹, valores su-

Tabla 5

DBO observada en el sistema de tratamiento

Fecha de muestreo 2005	Agua cruda	DBO (mg/L)	
		Efluente primario	Efluente secundario
Ago-24	199	153	78
Ago-31	182	120	70
Sep-7	231	123	59
Sep-14	234	169	57
Sep-21	287	135	72
Sep-28	250	129	68
Oct-5	223	117	56
Oct-12	152	108	56
Oct-19	221	93	47
Oct-26	191	53	42
Promedio	217	120	61
Desv. estándar	38	32	11
Intervalo	152 - 287	53 - 169	42 - 78

Tabla 6

AUV₂₅₄ observada en el sistema de tratamiento

Fecha de muestreo 2005	Agua cruda	AUV ₂₅₄ (cm ⁻¹)	
		Efluente primario	Efluente secundario
Ago-24	1,055	0,708	0,691
Ago-31	1,593	1,093	0,732
Sep-7	1,509	0,983	0,707
Sep-14	1,453	1,069	0,699
Sep-21	1,579	1,024	0,857
Sep-28	1,350	0,724	0,615
Oct-5	1,387	0,942	0,663
Oct-12	1,295	0,836	0,754
Oct-19	1,256	0,834	0,583
Oct-26	0,966	0,645	0,621
Promedio	1,344	0,886	0,692
Desv. estándar	0,209	0,160	0,079
Intervalo	0,966-1,593	0,645-1,093	0,583-0,857

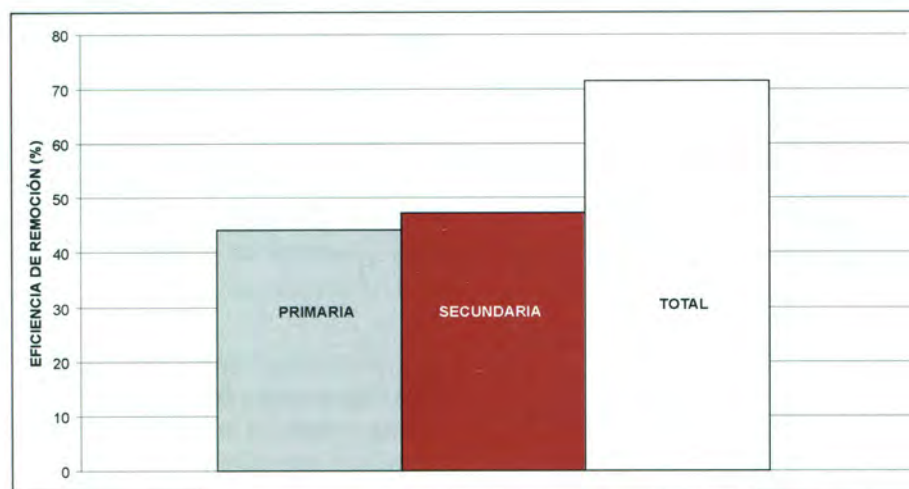


Figura 5. Eficiencias promedio de remoción de DBO del sistema de tratamiento.

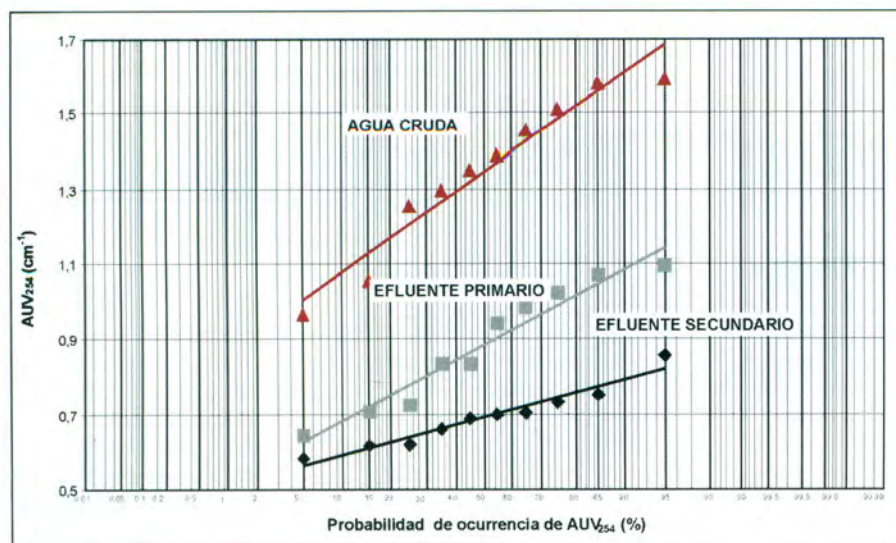


Figura 6. AUV₂₅₄ del sistema de tratamiento.

periores en un factor de 15 a 40 veces el valor de AUV₂₅₄ de 0,04 cm⁻¹ para aguas de buena calidad⁽¹⁾. Como se observa en las figuras 6 y 7, existe una correlación directa entre los valores de AUV₂₅₄ y AEUV para el agua cruda, el efluente primario y el efluente secundario.

En la figura 9 se presenta la correlación observada entre los valores de DBO y AUV₂₅₄ para los años 2004⁽²⁾ y 2005⁽¹⁾, representada por la ecuación 4.

$$DBO = 172,59 AUV_{254} - 49,8 \quad (4)$$

En la figura 10 se presenta la correlación observada entre los valores de DBO y AEUV₂₅₄ para los años 2004⁽²⁾ y 2005⁽¹⁾, representada por la ecuación 5.

$$DBO = -11899AEUV_{254} + 238,02 \quad (5)$$

Donde:

AUV₂₅₄ = Absorbancia de Luz Ultravioleta a 254 nm, cm⁻¹.

AEUV₂₅₄ = Absorbancia Específica de Luz Ultravioleta a 254 nm, L/cm-mg DBO.

DBO = Demanda Bioquímica de Oxígeno, mg O₂/L.

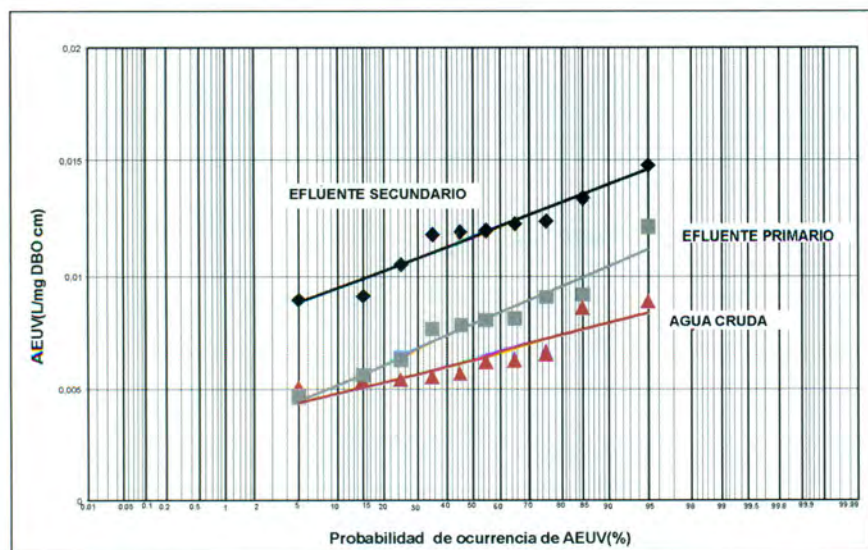


Figura 7. AEUV del sistema de tratamiento.

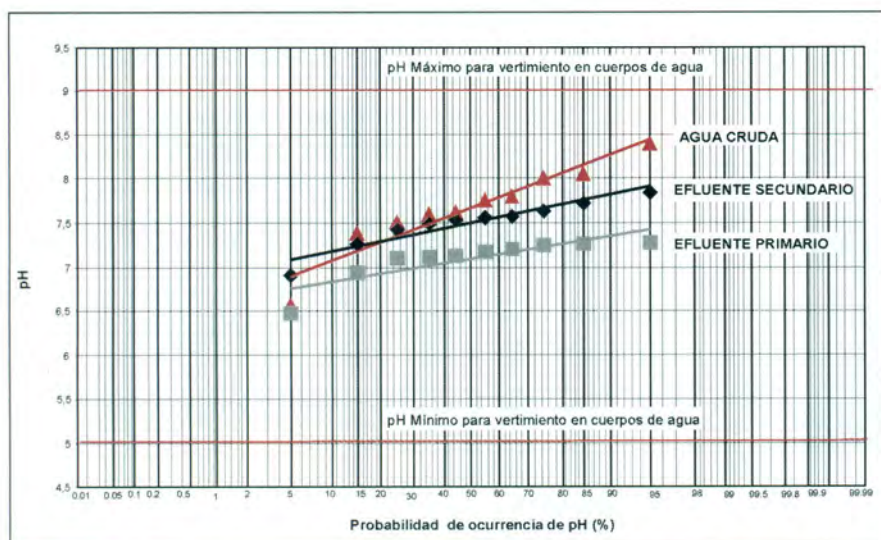


Figura 8. pH del sistema de tratamiento.

Las ecuaciones 4 y 5 indican que para un efluente secundario con DBO < 65 mg/L la AUV₂₅₄ es menor de 0,665 cm⁻¹ y la AEUV es mayor de 0,0145 L/cm·mg DBO. Para un efluente secundario con DBO < 45 mg/L la AUV₂₅₄ es menor de 0,549 cm⁻¹ y la AEUV es mayor de 0,0162 L/cm·mg DBO.

CONCLUSIONES

- El nuevo aporte de información⁽¹⁾, agregado a la analizada en el período febrero - mayo de 2004 ⁽¹⁾, permite establecer una correlación lineal entre la AUV₂₅₄ y la DBO.

- Para un efluente secundario con DBO < 65 mg/L se obtiene una AUV₂₅₄ menor de 0,665 cm⁻¹ y una AEUV mayor de 0,0145 L/cm·mg DBO.

- Para un efluente secundario con DBO < 45 mg/L se obtiene una AUV₂₅₄ menor de 0,549 cm⁻¹ y una AEUV mayor de 0,0162 L/cm·mg DBO.

- Se confirma el estado anaerobio de la laguna secundaria, a pesar de que su carga orgánica superficial, su carga orgánica volumétrica y su tiempo de retención son típicos de lagunas facultativas. La laguna secundaria es

Tabla 7

AEUV observada en el sistema de tratamiento

Fecha de muestreo 2005	AEUV (L/mg DBO cm)		
	Agua cruda	Efluente primario	Efluente secundario
Ago-24	0,0053	0,0046	0,0089
Ago-31	0,0088	0,0091	0,0105
Sep-7	0,0065	0,0080	0,0120
Sep-14	0,0062	0,0063	0,0123
Sep-21	0,0055	0,0076	0,0119
Sep-28	0,0054	0,0056	0,0090
Oct-5	0,0062	0,0080	0,0118
Oct-12	0,0085	0,0077	0,0134
Oct-19	0,0057	0,0090	0,0124
Oct-26	0,0051	0,0122	0,0148
Promedio	0,0063	0,0078	0,0117
Desv. estándar	0,0013	0,0021	0,0018
Intervalo	0,0051-0,0088	0,0046-0,0122	0,0089-0,0148

Tabla 8

pH observado en el sistema de tratamiento

Fecha de muestreo 2005	pH		
	Agua cruda	Efluente primario	Efluente secundario
Ago-24	7,62	6,93	7,56
Ago-31	8,05	7,17	7,54
Sep-7	7,80	7,11	7,58
Sep-14	8,40	7,20	7,84
Sep-21	7,76	7,27	7,42
Sep-28	8,01	7,24	7,73
Oct-5	7,50	7,25	7,64
Oct-12	7,60	7,10	7,26
Oct-19	7,37	7,13	7,49
Oct-26	6,55	6,47	6,90
Promedio	7,67	7,09	7,50
Desv. estándar	0,49	0,24	0,26
Intervalo	6,55 - 8,40	6,47 - 7,27	6,90 - 7,84

anaerobia debido probablemente a la presencia de concentraciones tóxicas de sulfuro, las cuales impiden el crecimiento de algas y, por ende, la producción de oxígeno en ella.

- La remoción promedio de DBO en la laguna primaria y en la secundaria es de 44 y 47%, respectivamente; valores que pueden considerarse aceptables para sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales frías de baja concentración.

- La eficiencia global de remoción de DBO del sistema de tratamiento es del 71%.

- La calidad del efluente secundario cumple con los parámetros de pH y temperatura para vertimientos sobre cuerpos de agua, estipulados en el Decreto 1594 de 1984.

- El 66% del tiempo, la DBO del efluente final es menor que 65 mg/L valor aceptado por la Usepa para este tipo de sistema de tratamiento.

REFERENCIAS

1. Mesa Ramírez, Fabio Leonardo (2005). "Uso de AUV₂₅₄ como sustituto de la DBO para evaluar lagunas de estabilización". Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, diciembre.
2. Ayala P., Gloria Andrea & Gelvis L., Jonathan Alexander (2004). "Remoción de materia orgánica en un sistema de tratamiento de lagunas de estabilización". Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, mayo.
3. APHA, AWWA, WEF (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed.
4. Romero Rojas, Jairo Alberto (2005). *Lagunas de estabilización de aguas residuales*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
5. Romero Rojas, Jairo Alberto (2002). *Calidad del agua*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, noviembre.
6. Romero Rojas, Jairo Alberto (2005). *Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, junio.

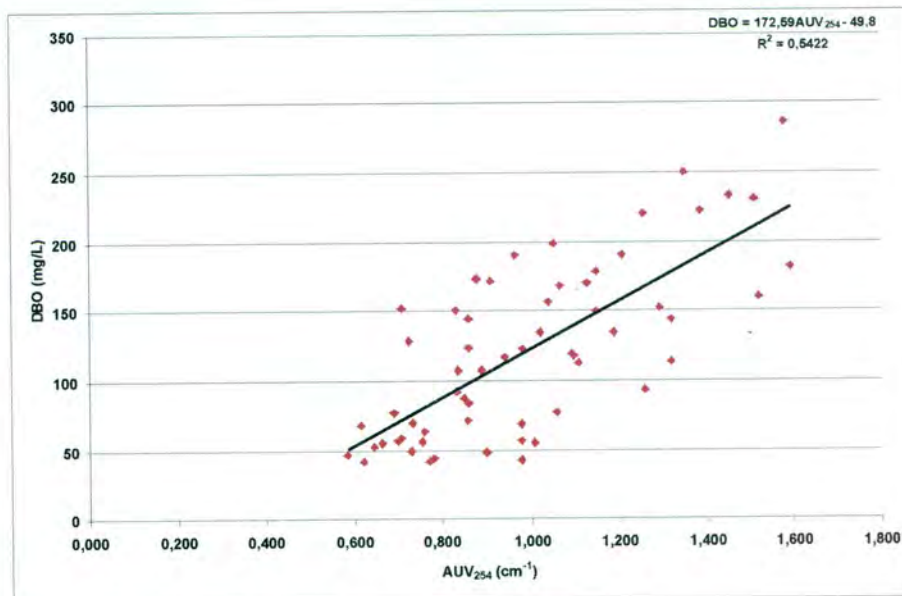


Figura 9. Correlación entre DBO y AUV₂₅₄ (2004-2005).

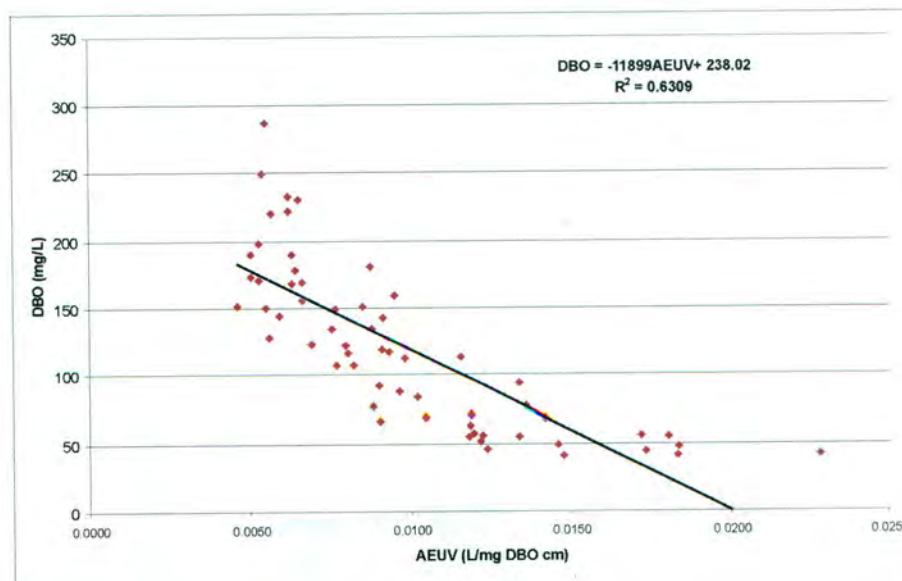


Figura 10. Correlación entre DBO y AEUV (2004-2005).

Tabla 9
Temperatura observada en el sistema de tratamiento

Fecha de muestreo	Temperatura		
	Agua cruda	Efluente primario	Efluente secundario
Ago-24	17	17	17
Ago-31	19	19	19
Sep-7	19	19	19
Sep-14	19	18	17
Sep-21	19	20	18
Sep-28	19	20	19
Oct-5	19	20	19
Oct-12	19	20	18
Oct-19	19	18	18
Oct-26	19	19	18
Promedio	19	19	18
Desv. Estándar	1	1	1
Intervalo	17 - 19	17 - 20	17 - 19

Tabla 10
Intervalos de DBO, AUV₂₅₄ y AEUV en el sistema de tratamiento

Muestra	DBO (mg/L)	AUV ₂₅₄ (cm ⁻¹)	AEUV (L/mg DBO cm)
A. Cruda	152 - 287	0,966 - 1,593	0,0051 - 0,0088
E. Primario	53 - 169	0,645 - 1,093	0,0046 - 0,0122
E. Secundario	42 - 78	0,583 - 0,857	0,0089 - 0,0148
Global	42 - 287	0,583 - 1,593	0,0051 - 0,0148

Tabla 11
DBO, AUV₂₅₄ y AEUV del sistema de tratamiento (2004-2005)

DBO (mg/L)	AUV ₂₅₄ (cm ⁻¹)	AEUV L/mg DBO cm	DBO (mg/L)	AUV ₂₅₄ (cm ⁻¹)	AEUV L/mg DBO cm
199	1,055	0,0053	191	0,966	0,0051
153	0,708	0,0046	53	0,645	0,0122
78	0,691	0,0089	42	0,621	0,0148
182	1,593	0,0088	160	1,52	0,0095
120	1,093	0,0091	94	1,26	0,0134
70	0,732	0,0105	43	0,98	0,0228
231	1,509	0,0065	135	1,19	0,0088
123	0,983	0,0080	114	1,32	0,0116
59	0,707	0,0120	78	1,06	0,0136
234	1,453	0,0062	191	1,21	0,0063
169	1,069	0,0063	144	1,32	0,0092
57	0,699	0,0123	56	1,01	0,0180
287	1,579	0,0055	157	1,04	0,0066
135	1,024	0,0076	118	1,1	0,0093
72	0,857	0,0119	57	0,98	0,0172
250	1,350	0,0054	170	1,13	0,0066
129	0,724	0,0056	150	1,15	0,0077
68	0,615	0,0090	49	0,9	0,0184
223	1,387	0,0062	179	1,15	0,0064
117	0,942	0,0080	113	1,11	0,0098
56	0,663	0,0118	69	0,98	0,0142
152	1,295	0,0085	145	0,86	0,0059
108	0,836	0,0077	124	0,86	0,0069
56	0,754	0,0134	64	0,76	0,0119
221	1,256	0,0057	151	0,83	0,0055
93	0,834	0,0090	88	0,85	0,0097
47	0,583	0,0124	50	0,73	0,0146
45	0,78	0,0173	172	0,91	0,0053
174	0,88	0,0051	84	0,86	0,0102
108	0,89	0,0082	42	0,77	0,0183

Análisis de volatilidades del mercado de energía eléctrica colombiano

Rafael Campo*, Roberto Ríos**, Iván Forero**, Paula Ríos**, Héctor Hernández** y Fernando Ortiz**

En este artículo se efectúa un análisis estadístico del mercado de energía eléctrica colombiano. Los modelos Garch (1,1) son adecuados para representar las volatilidades diarias y mensuales de los precios de bolsa y de contratos, con excepción de las volatilidades para los precios diarios de bolsa de antes de mayo de 2001, para las cuales no fue posible encontrar un modelo adecuado. Las pruebas efectuadas en todos los casos mostraron la bondad de estos modelos. La kurtosis de los modelos para los precios de bolsa diarios y mensuales está por encima de 3, lo cual es un indicativo de que los retornos se encuentran a más de tres desviaciones estándar de su valor medio. La kurtosis para los modelos de precios de contratos a largo plazo es igual a 3, indicando la existencia de un proceso de Wiener, es decir, una distribución normal.

Los modelos de volatilidades obtenidos pueden usarse para predecir las volatilidades, lo cual es importante para la valoración de instrumentos derivados (contratos a futuro y opciones, por ejemplo) y tienen una gran relevancia para el Sistema Electrónico de Contratos (SEC).

Palabras claves: volatilidad, precios de bolsa, precios de contratos, varianza, kurtosis, autocorrelaciones, Garch.

A statistical analysis is made of the Colombian electric power market Garch (1,1) models are fit to the daily and monthly volatilities of spot and contract prices, with the exception of daily spot prices before May 2001, for which it was not possible to fit an appropriate model. Goodness of fit tests are performed in all cases. The kurtosis of models for daily and monthly spot prices is

above 3, an indication of market returns more than three standard deviations away from mean values. The kurtosis of models for long term contract prices is equal to 3, indicating the existence of Wiener processes, i.e., normal distributions.

It is pointed out that models of volatilities so obtained can be used for forecasting them, which is important to value derivatives (futures and options, for example), highly relevant to the soon to be functional SEC (Electronic Contract System), a central exchange for the Colombian power market.

INTRODUCCIÓN^[1]

La volatilidad en mercados de valores se define como la desviación estándar de los retornos en un período dado de

tiempo. A veces se le denomina el “factor de miedo” de los mercados, que típicamente se mueven para obtener el máximo beneficio o por el temor a pérdidas de los participantes. La volatilidad tiene incidencia directa sobre el valor de los instrumentos de cubrimiento del riesgo, como por ejemplo las opciones (una volatilidad alta implica valores altos de las opciones). Generalmente pasa de períodos en los cuales esta volatilidad es elevada, a períodos de valores muy inferiores, tal como se aprecia en las figuras 1 a 4 de volatilidades diarias y mensuales de valores de bolsa y de contratos del mercado de energía eléctrica colombiano. El período analizado excluye datos desde el comienzo de la operación del

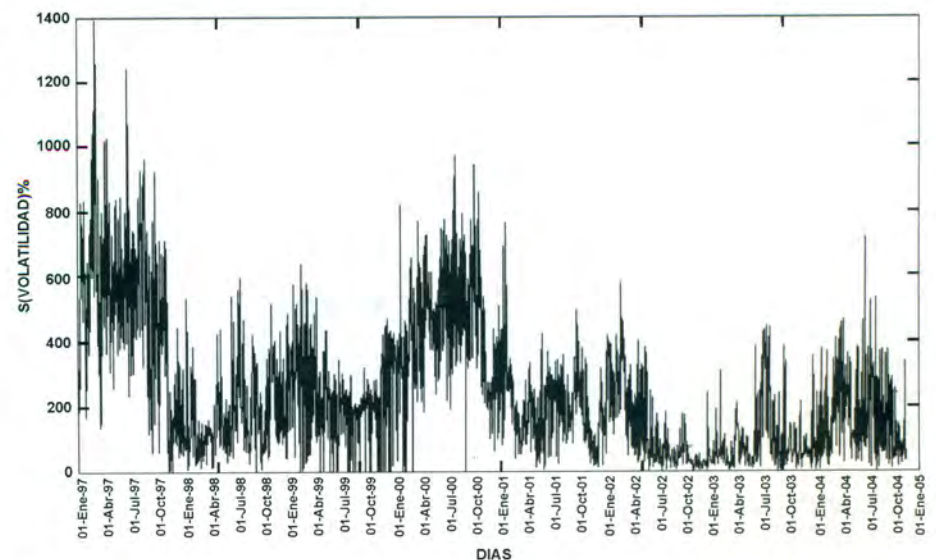


Figura 1. Volatilidades diarias de precios de bolsa.

* Consultor independiente.

** Escuela Colombiana de Ingeniería.

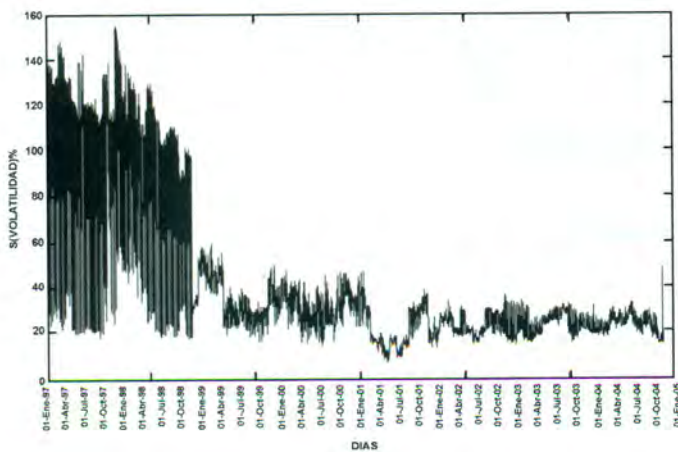


Figura 2. Volatilidades diarias de precios de contratos.

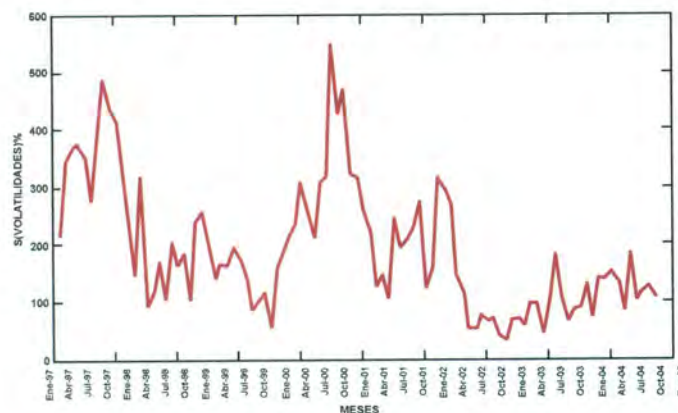


Figura 3. Volatilidades mensuales de precios de bolsa.

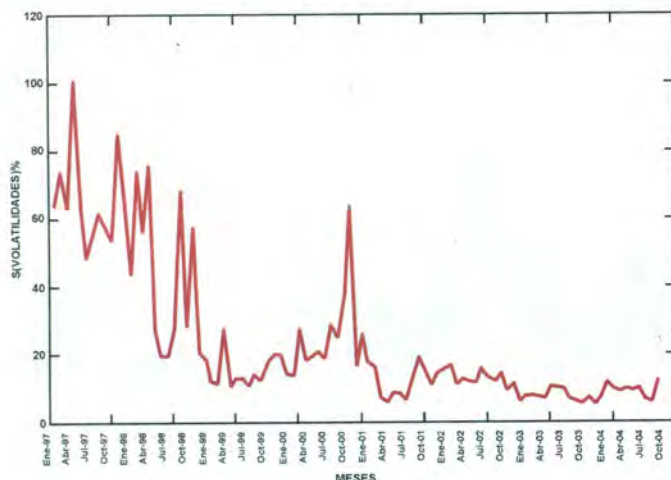


Figura 4. Volatilidades mensuales de precios de contratos.

mercado de energía eléctrica colombiano hasta diciembre de 1996, por presentar inconsistencias.

Cabe anotar que los precios utilizados en este artículo para el análisis de volatilidades son precios constantes a enero de 2005, lo cual se considera esencial en el presente análisis, para asegurar así la consistencia en los estimativos obtenidos para los parámetros estadísticos.

DATOS

En las figuras 1 a 4 se incluyen a continuación los valores de las volatilidades diarias y mensuales, calculadas en este trabajo con base en los precios de bolsa y de contratos en el mercado de energía eléctrica colombiano.

Un análisis visual de las anteriores figuras permite concluir que las volatilidades mensuales son inferiores a las diarias, como era de esperarse. Adicionalmente, las volatilidades antes de mayo de 2001 son superiores a las observadas después de esta fecha. Esto se debe a inmadurez del mercado en el período inicial de su funcionamiento y a la presencia de un fenómeno del Niño de considerable intensidad en el lapso 1997 - 1998. A partir de mayo de 2001 y hasta la fecha presente, las volatilidades han sido relativamente bajas. A más de los argumentos anteriores, debe añadirse el sobreequipamiento, causado principalmente por la fuerte recesión económica experimentada en Colombia a finales de la década pasada y el uso del gas natural, que han ejercido una presión hacia abajo sobre los precios.

MODELOS^{[1], [3]}

Sea S_t el precio del mercado en el instante t .

Los retornos se calculan como sigue:

$$u_t = \ln \left(\frac{S_t}{S_{t-1}} \right) \tag{1}$$

La desviación estándar se estima en la forma usual:

$$s = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{t=1}^n (u_{n-t} - u^*)^2} \tag{2}$$

en donde:

$$u^* \text{ es la media muestral } = \left(\frac{1}{n} \right) \left(\sum_{t=1}^n u_{n-t} \right), \tag{3}$$

s = estimativo de la desviación estándar.

n = número de observaciones.

Modelo del promedio condicional

Si los retornos son estacionarios, se les sustrae un estimativo de su media promedio (que llamamos m). De lo contrario, se les ajusta un modelo Arima $(p, d, q)^1$, del siguiente tipo:

$$D_d u_t = C + \sum_{i=1}^p \varphi_i u_{t-i} + \varepsilon_t + \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} \quad (4)$$

En donde d es el número de diferencias que es necesario tomar a la serie original para producir estacionalidad, φ son los coeficientes autorregresivos, θ_j los coeficientes de promedio móvil y las ε_t son ruido blanco, esto es, variables independientes de idéntica distribución (usualmente se presume que es normal), con media cero. C es el promedio de las u_t . Es bien sabido que para estacionalidad se requiere que los valores propios del polinomio característico autorregresivo deben estar, dentro del círculo unitario y para invertibilidad los valores propios del polinomio de promedio móvil deben estar igualmente, dentro del círculo de radio uno. Esto coloca restricciones sobre los valores de los coeficientes φ_i y θ_j . Para los detalles se remite al lector a cualquier libro sobre modelos de Box-Jenkins de series cronológicas.

Modelo de la varianza condicional

Sea:

$$\text{Var}(u_t) = E_{t-1}(\varepsilon_t)^2 = \sigma_t^2 \quad (5)$$

la varianza condicional de los retornos. Un modelo Garch(1,1)² para esta varianza es el siguiente:

$$\sigma_t^2 = \alpha_0 + \alpha_1 u_{t-1}^2 + \beta_1 \sigma_{t-1}^2 \quad (6)$$

$$\alpha_0 = \gamma V \quad (7)$$

$$\gamma + \alpha_1 + \beta_1 = 1 \quad (8)$$

Varianza a largo plazo y kurtosis

Con base en los parámetros del Garch (1,1), se estiman la varianza V (y la volatilidad, \sqrt{V}) a largo plazo y la kurtosis de la serie histórica, como sigue:

1. Arima (p, d, q) : modelo de serie de tiempo ("Autoregressive Integrated Moving Average") utilizado ampliamente en la modelación para la predicción de series de tiempo de Box y Jenkins [3]. Involucra p términos autorregresivos y q términos de promedios móviles.

2. Garch (p, q) : ("Generalized Autoregressive Condicional Heteroscedasticity") calcula la varianza sobre las p más recientes observaciones sobre u^2 y el más reciente estimado q de la varianza. Se utilizó el modelo Garch (1,1) por ser el que mejor se ajusta a los datos.

$$V = \alpha_0 / (1 - \alpha_1 - \beta_1) \quad (9)$$

$$K = 3 + (6\alpha_1^2 / (1 - 3\alpha_1^2 - 2\alpha_1\beta_1 - \beta_1^2)) \quad (10)$$

La kurtosis de una variable aleatoria se define como el cuarto momento dividido por el cuadrado del segundo momento. Es un indicador de cuánto peso tienen las colas de la distribución de la variable, es decir, qué tanta probabilidad existe de que se observen valores por fuera de tres desviaciones estándares, probabilidad que sería muy pequeña si la variable tuviera distribución normal. Para un proceso Garch (1,1) puede demostrarse que la kurtosis es finita si: $0 \leq \alpha_1 \leq 1/\sqrt{3}$. Adicionalmente, una kurtosis igual a 3 indica un proceso de Wiener (distribución normal), en tanto que una kurtosis superior a 3 indica que, con probabilidad superior a la esperada por una distribución normal, ocurren eventos más allá de tres desviaciones estándares. Este fenómeno de "colas pesadas" de distribuciones ocurre con frecuencia en mercados de valores y se ilustra en la figura 5, donde la curva continua corresponde a una distribución normal, y la curva discontinua a una distribución con "colas pesadas".

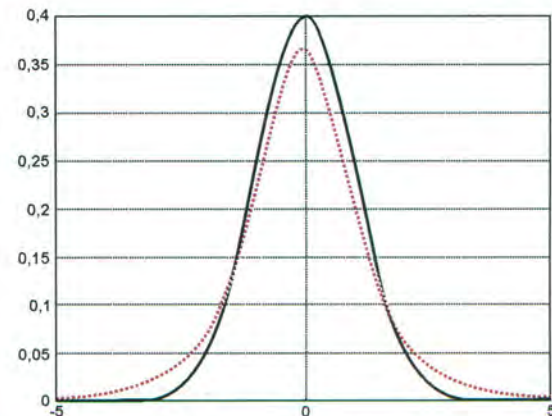


Figura 5. Distribución de "colas pesadas".

A continuación se presentan los modelos obtenidos para cada uno de los casos analizados. Los modelos se probaron en todos los casos mediante un análisis del correlograma de los residuos del modelo Garch (1,1) y la prueba de Ljung-Box aplicada a los mismos residuos.

RESULTADOS [2]

En esta sección se presentan los modelos obtenidos para precios diarios y mensuales de bolsa y de contratos. El "primer tramo" se refiere a valores entre enero de 1997 y abril

de 2001, y el “segundo tramo” a valores entre mayo de 2001 y enero de 2005.

Precios diarios de bolsa

Primer tramo

El análisis del primer tramo condujo a un modelo en el que la suma de los parámetros $(\gamma, \alpha_1, \beta_1)$ es superior a uno, con lo cual el modelo Garch no es aceptable.

Promedios condicionados

Parámetro	Valor
m	$2,604 * 10^{-6}$
d	1
p	0
q	1
AR(1)	0
MA(1)	-0,9192

Varianzas condicionadas

Parámetro	Valor
α_0	$7,042 * 10^{-7}$
α_1	0,1328
β_1	0,8672

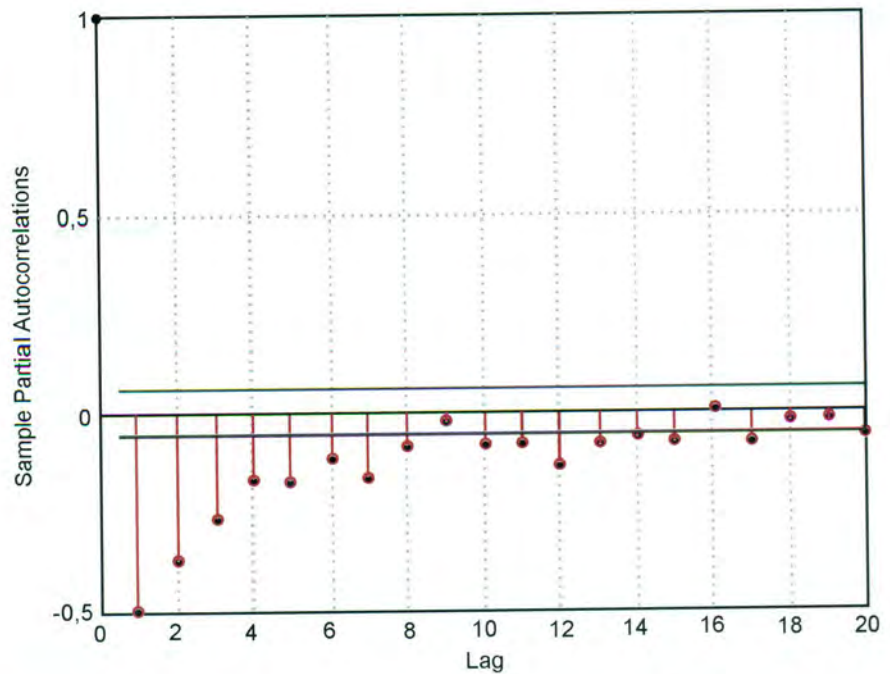


Figura 7. Autocorrelaciones parciales de primeras diferencias de retornos. Precios diarios de bolsa. Segundo tramo.

Segundo tramo

El modelo Garch que se obtiene para el segundo tramo sí es aceptable. Este modelo pasa las pruebas de hipótesis (las autocorrelaciones de los residuos

están dentro de las bandas de confianza, es decir, son nulas y el resultado de la prueba de Ljung-Box es aceptable). A continuación se presentan los resultados para el segundo tramo.

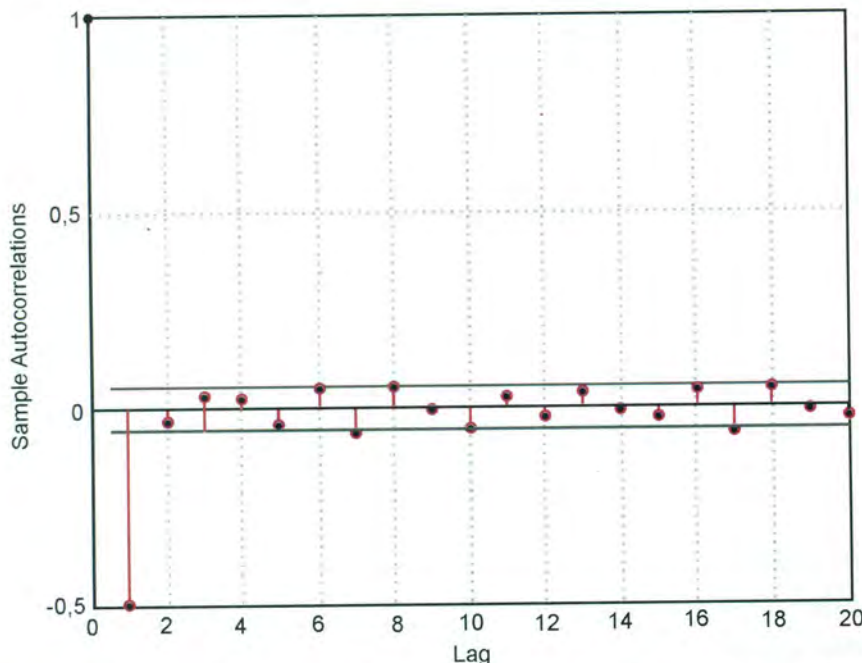


Figura 6. Autocorrelaciones de primeras diferencias de retornos. Precios diarios de bolsa. Segundo tramo.

Promedios condicionados

Parámetro	Valor
m	$9,030 * 10^{-7}$
d	1
p	0
q	1
AR(1)	0
MA(1)	-0,9251

Varianzas condicionadas

Parámetro	Valor
α_0	$4,4321 * 10^{-7}$
α_1	0,0658
β_1	0,8925

Pruebas de hipótesis

La siguiente es la función de autocorrelación de los residuos del modelo de varianzas condicionadas, divididas por su desviación estándar:

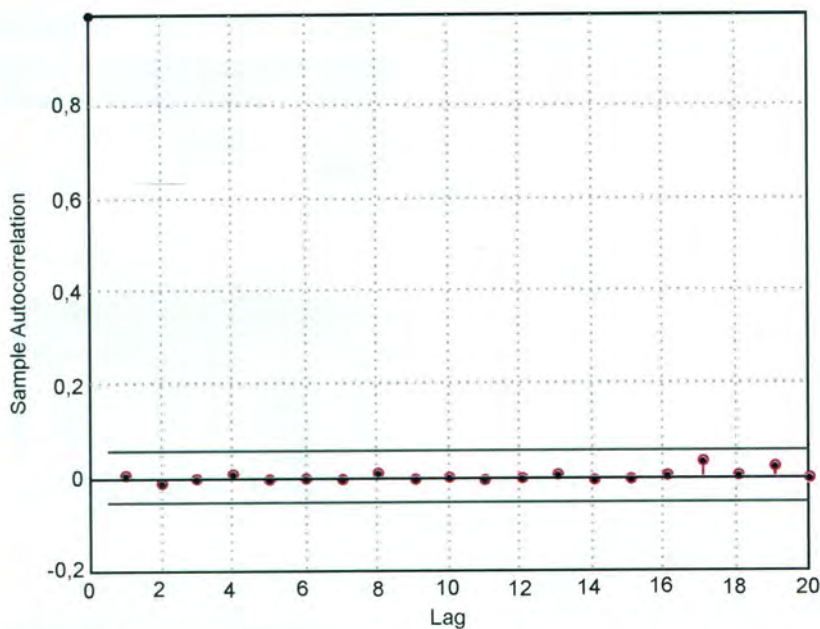


Figura 8. Autocorrelación de los residuos del modelo de varianzas condicionadas divididas por su desviación estándar.

El resultado de la prueba de Ljung-Box es aceptable:

H	Valor p	Estad.	Valor crítico
0	1	0,762	26,30

Volatilidad a largo plazo y kurtosis

A continuación se incluyen los valores de la volatilidad a largo plazo (en porcentaje) y de la kurtosis.

Parámetro	Valor
Volatilidad	0,32%
Kurtosis	3,35

La kurtosis indica la existencia de “colas pesadas”, es decir, que es muy posible observar retornos por fuera de tres desviaciones estándar.

Precios diarios de contratos

Primer tramo

El análisis hecho para precios diarios de bolsa se repite para precios diarios

de contratos. A continuación se incluyen los resultados para el primer tramo:

Promedios condicionados

Parámetro	Valor
m	$-1,2832 \cdot 10^{-7}$
d	1
p	0
q	1
AR(1)	0
MA(1)	-0,8209

Varianzas condicionadas

Parámetro	Valor
α_0	$3,138 \cdot 10^{-8}$
α_1	0,4565
β_1	0,4969

Volatilidad a largo plazo y kurtosis

Parámetro	Valor
Volatilidad	0,08%
Kurtosis	N/A

Según los resultados mostrados anteriormente, el modelo Garch es aceptable para este tramo.

Segundo tramo

Promedios condicionados

Parámetro	Valor
m	$4,060 \cdot 10^{-7}$
d	1
p	0
q	1
AR(1)	0
MA(1)	-0,9358

Varianzas condicionadas

Parámetro	Valor
α_0	$1,083 \cdot 10^{-8}$
α_1	0,0629
β_1	0,765

Volatilidad a largo plazo y kurtosis

Parámetro	Valor
Volatilidad	0,03%
Kurtosis	3,077

La kurtosis es ligeramente superior a 3, lo que indica la posible existencia de “colas pesadas”, es decir, que es factible observar retornos por fuera de tres desviaciones estándar. En este caso, el modelo Garch también resulta aceptable.

Retornos de precios mensuales de bolsa

A continuación se ajustan los modelos apropiados a la media y varianza condicionales para los precios mensuales de bolsa y de contratos. A diferencia de lo que ocurrió con los precios diarios, no se considera necesario dividir el análisis en dos tramos, ya que se obtienen modelos satisfactorios con un solo tramo. Adicionalmente, no es necesario tomar diferencias a las series de retornos para obtener estacionalidad, ni ajustar un modelo Arma.

La kurtosis obtenida para los retornos mensuales de bolsa indica la exis-

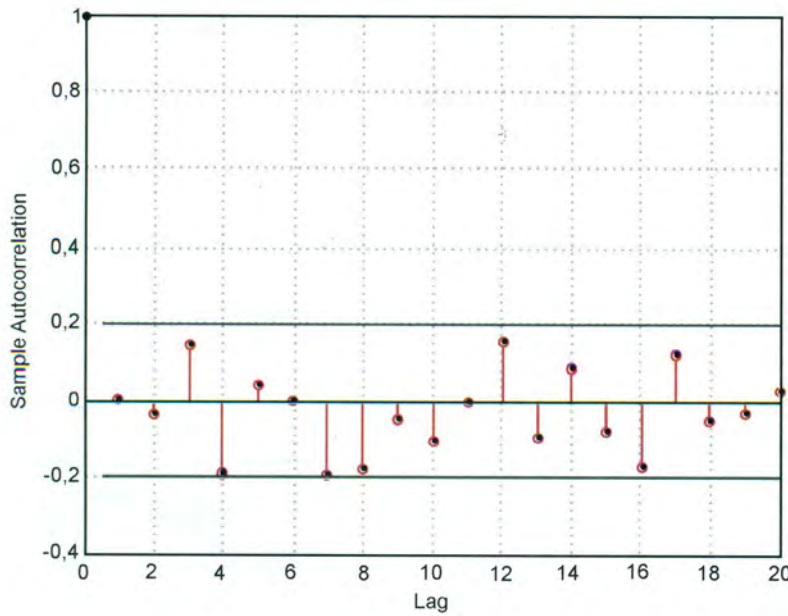


Figura 9. Autocorrelaciones precios mensuales de bolsa.

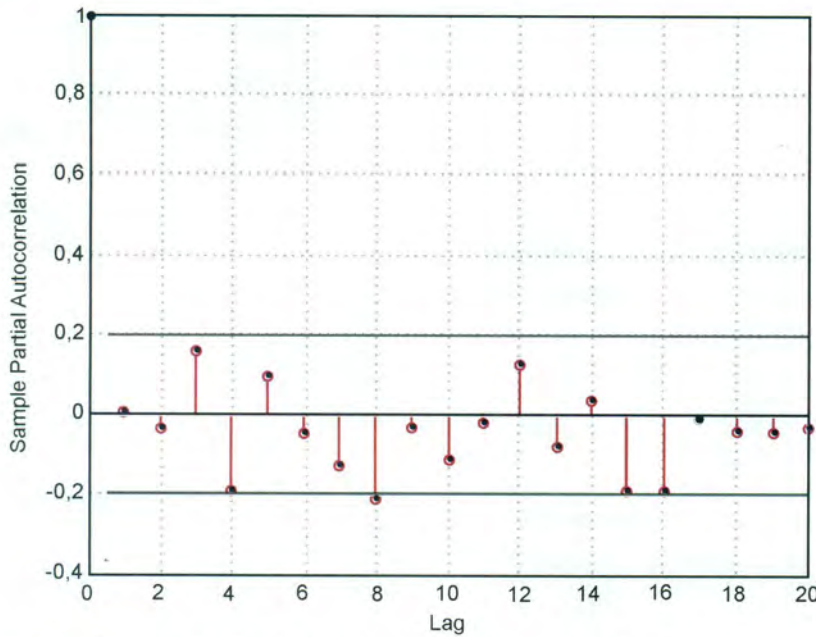


Figura 10. Autocorrelación parcial precios mensuales de bolsa.



tencia de retornos por fuera de tres desviaciones estándares, en tanto que permite concluir que los retornos de contratos siguen un proceso de Wiener.

Promedios condicionados

Parámetro	Valor
m	0,0005573
d	0
p	0
q	0
AR(1)	0
MA(1)	0

Varianzas condicionadas

Parámetro	Valor
α_0	$5,4968 \cdot 10^{-6}$
α_1	0,1777
β_1	0,7458

Volatilidad a largo plazo y kurtosis

Parámetro	Valor
Volatilidad	0,85%
Kurtosis	5,25

La kurtosis indica la existencia de “colas pesadas”, esto es, que es muy posible observar retornos por fuera de tres desviaciones estándar.

Retornos de precios mensuales de contratos

Promedios condicionados

Parámetro	Valor
m	0,0003217
d	0
p	0
q	0
AR(1)	0
MA(1)	0

Varianzas condicionadas

Parámetro	Valor
α_0	$1,261 \cdot 10^{-5}$
a_1	0,0000
β_1	0,00137

Volatilidad a largo plazo y kurtosis

Parámetro	Valor
Volatilidad	0,36%
Kurtosis	3,00

La kurtosis es igual a 3, lo que revela la presencia de un proceso de Wiener (es decir, distribución normal).

CONCLUSIONES

- Es posible ajustar modelos Garch (1,1) adecuados a las volatilidades de los precios diarios y mensuales de bolsa y de contratos, con excepción de precios diarios de bolsa para el período anterior a mayo de 2001.

- Para poder ajustar modelos Garch (1,1) a precios diarios de bolsa (para después de mayo de 2001) y de contratos se requiere volver estacionaria la serie histórica de los retornos correspondientes, mediante diferenciación. No es necesario tomar diferencias para los precios mensuales.

- La kurtosis de los modelos obtenidos de precios de bolsa (diarios y mensuales) es superior a 3, lo que indica que existen retornos alejados del promedio más de tres desviaciones estándares.

- Para los modelos de precios de contratos se obtienen kurtosis iguales a 3, lo que indica la existencia de procesos de Wiener, es decir, distribución normal. No se esperan entonces retornos alejados del promedio más de tres desviaciones estándares.

- Los modelos obtenidos para las volatilidades pueden utilizarse para predecirlas, por ejemplo. Como se indicó en la introducción, las volatilidades son importantes en el establecimiento del precio de instrumentos derivados (contratos a futuro y opciones). Se considera, en consecuencia, este trabajo relevante para el Sistema Electrónico de Contratos SEC).

REFERENCIAS

- [1] Hull, John. *Options, futures and other derivatives*, 5th ed. Prentice Hall.
- [2] Documentación del Garch Tool Box de MatLab (v. 7.2).
- [3] Box, E.P., Jenkins, G.M. & Reinsel, G. (1994). *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, 3rd ed. Prentice Hall.
- [4] Mantegna, R. & Eugene Stanley, H. (2001). *Introduction to Econophysics*. Cambridge University Press.

RECONOCIMIENTO

El presente trabajo forma parte del proyecto de investigación "Opciones de cubrimiento del riesgo por subida fuerte en los precios del mercado en bolsa de energía y su relación con el cargo por capacidad", financiado por Colciencias, Interconexión Eléctrica S.A. y la Escuela Colombiana de Ingeniería. Los conceptos emitidos no comprometen a ninguna de estas instituciones y son responsabilidad exclusiva de los autores

Como se indicó en la introducción, las volatilidades son importantes en el establecimiento del precio de instrumentos derivados (contratos a futuro y opciones).



Determinación de contrastes de conductividad del subsuelo mediante el uso de campos electromagnéticos producidos por señales transitorias

Sandra Esperanza Sánchez* y Jorge Enrique Clavijo R.**

En este artículo se estudia la posibilidad de determinar contrastes de conductividad del subsuelo con base en el voltaje transitorio inducido en la superficie cuando la corriente que circula a través de un circuito emisor se interrumpe abruptamente (prospección por transitorios). Para tal fin, se resuelven numéricamente las ecuaciones de Maxwell mediante el uso de los potenciales de Shelkunoff y se encuentra el voltaje inducido en la configuración de *loop* coincidente, que consiste en utilizar como circuito receptor el mismo circuito emisor. El problema se resuelve para los modelos de dos y tres estratos haciendo énfasis en la posibilidad de detección de yacimientos minerales, aguas subterráneas y contaminación por lixiviados. Se encuentra que esta técnica de prospección funciona muy bien en la detección de estratos muy conductivos encajados en medios de conductividad menor (yacimientos minerales y lixiviados), pero que es poco sensible en la detección de estratos poco conductivos encajados en medios de alta conductividad (aguas subterráneas e hidrocarburos).

Palabras claves: prospección, campos electromagnéticos, voltajes transitorios, contrastes de conductividad.

In this paper we find the transient electromagnetic response of a stratified medium in the coincident loop configuration and discuss the effect of several contrasts of conductivity in the two and three layers models. This method was applied in detection of ores and contamination of underground water.

INTRODUCCIÓN

En estudios ambientales y de minería es fundamental determinar la estructura del subsuelo, es decir, conocer el material, ubicación y espesor de los diferentes estratos que lo componen. Los materiales que conforman la corteza terrestre, tales como arcillas, areniscas y yacimientos minerales, se pueden caracterizar muy bien a través de su conductividad eléctrica (Palacky, 1988); por consiguiente, una manera de establecer la estructura del subsuelo es determinar el perfil de conductividad del mismo. En virtud de que la conductividad es una propiedad electromagnética de los materiales, lo más natural es utilizar técnicas de prospección que se basen en principios electromagnéticos. En geofísica existen dos

formas distintas de interactuar electromagnéticamente con el subsuelo: los métodos conductivos y los métodos inductivos (Orellana, 1974). En los conductivos se inyecta corriente al subsuelo y se miden diferencias de potencial eléctrico en la superficie, mientras que en los inductivos se utili-

zan campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo que inducen corrientes en el subsuelo (Sánchez, 2001), corrientes que a su vez crean campos que pueden detectarse en la superficie. Una de las ventajas de estos

Los materiales que conforman la corteza terrestre, tales como arcillas, areniscas y yacimientos minerales, se pueden caracterizar muy bien a través de su conductividad eléctrica (Palacky, 1988).

últimos es que no es necesario el contacto físico entre el suelo y el instrumento de medida; esto hace más eficiente el trabajo de campo, ya que el tiempo de muestreo es más corto y puede hacerlo una sola persona; además, se pueden utilizar en zonas de difícil acceso donde no es posible enterrar electrodos. Aunque en el ámbito mundial los dos tipos de prospección se usan ampliamente, en Colombia los métodos electromagnéticos inductivos no se han desarrollado debido a la falta de un análisis teórico que permita la

* Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ciencias Básicas de la Escuela Colombiana de Ingeniería ssanchez@escuelaing.edu.co.

** Departamento de Ciencias Básicas de la Escuela Colombiana de Ingeniería. eclavijo@escuelaing.edu.co.

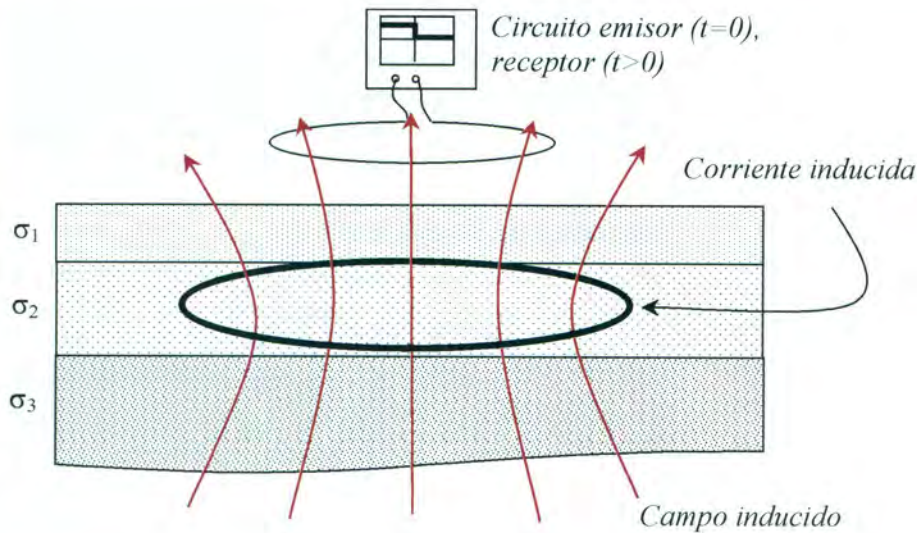


Figura 1. Esquema de la inducción de corrientes en métodos por transitorios. El circuito emisor se apaga en $t = 0$, generando corrientes que crean campos inducidos (líneas rojas).

creación del *software* requerido para la correcta interpretación de los resultados y a la difícil consecución e implementación de los equipos necesarios para la prospección. Con el interés de llenar el vacío existente en nuestro medio en este tipo de prospección, en el presente artículo se realiza un estudio teórico completo de un tipo particular de método inductivo donde los campos electromagnéticos indispensables para la prospección se generan mediante la interrupción abrupta de la corriente en un circuito emisor (prospección por transitorios). En la primera parte se realiza una breve descripción de los métodos transitorios y se presentan los fundamentos teóricos necesarios para el desarrollo del trabajo, en la segunda parte se presenta el método numérico utilizado para la solución del problema y en la tercera parte se muestran los resultados y los análisis para diferentes casos de interés en prospección minera y geofísica ambiental, haciendo hincapié en la posibilidad de detección de aguas subterráneas, yacimientos minerales y contaminación por lixiviados.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Descripción del problema

El principio físico en que se basan los métodos inductivos por transitorios es la creación de una corriente en el subsuelo cuando las fuentes de campos eléctricos o magnéticos se apagan instantáneamente (Vanyan, 1967). En la figura 1 se tiene un circuito por el que circula una corriente constante que crea un campo magnético (primario) independiente del tiempo en todo el espacio. En $t = 0$ la fuente que mantiene la corriente en el circuito se apaga instantáneamente y el

campo magnético primario en todo el espacio cambia bruscamente; debido a la ley de inducción de Faraday, un campo magnético que cambia en el tiempo debe crear campos eléctricos que, en un medio conductivo, generan corrientes que se oponen al cambio del campo magnético, corrientes que a su vez crean campos magnéticos secundarios, dependientes del tiempo que pueden inducir corrientes en circuitos que se encuentren en la superficie. En la figura 1 se muestra una configuración donde el circuito que crea el campo magnético es un bucle extenso de forma circular por donde fluye una corriente I constante para $t < 0$; en el instante $t = 0$ se interrumpe la corriente y el circuito pasa de ser el emisor de campos electromagnéticos a convertirse en

el circuito donde se mide la *fem* inducida por la variación de los campos magnéticos secundarios creados por las corrientes inducidas en el subsuelo. Esta configuración se conoce con el nombre de configuración de *loop* coincidente (Geo Instruments, 1996).

Análisis teórico

A partir de las ecuaciones de Maxwell se puede demostrar (Panofsky, 1955) que la propagación del campo eléctrico \mathbf{e} y del campo magnético \mathbf{h} en un medio de conductividad eléctrica σ , permeabilidad magnética μ y permitividad eléctrica ϵ obedece las ecuaciones:

$$\begin{aligned}\nabla^2 \mathbf{e} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{e}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} &= 0 \\ \nabla^2 \mathbf{h} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{h}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} &= 0,\end{aligned}\quad (1)$$

las ecuaciones (1) abarcan dos tipos de propagación: el primer tipo está presente en el término que contiene la segunda derivada con respecto al tiempo y describe la propagación *ondulatoria* de los campos, que ocurre a la velocidad de la luz en el medio; el segundo tipo está presente en el término que contiene la primera derivada con respecto al tiempo y describe la *difusión* de los campos en un medio conductivo. En la mayor parte de los métodos inductivos los campos cambian lentamente en el tiempo y esto permite no tener en cuenta las segundas variaciones de los campos y reducir las ecuaciones (1) a un conjunto de ecuaciones de difusión para los campos \mathbf{e} y \mathbf{h} :

$$\begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{e} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} &= 0 \\ \nabla^2 \mathbf{h} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Esta aproximación se denomina cuasiestática (Orellana, 1974) y es equivalente a despreciar, en las ecuaciones de Maxwell, las corrientes de desplazamiento con respecto a las corrientes de conducción. Cabe señalar que en esta aproximación los campos cambian lo suficientemente lento como para pensar que la propagación ondulatoria ocurre a velocidad infinita; por consiguiente, la única velocidad de propagación que se considera en estos métodos es la de difusión que, como es sabido, está dada por:

$$v_{dif} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\sigma}}. \quad (3)$$

Debido a la ley de Ohm, las corrientes inducidas en el medio también se difunden con esta velocidad. Como puede apreciarse en la ecuación (3), la velocidad de difusión tanto de los campos como de las corrientes depende de la conductividad del medio y es justamente esta dependencia lo que permite determinar el perfil de conductividad, debido a que la respuesta que se mide en superficie es el voltaje transitorio inducido en el receptor en función del tiempo; los voltajes correspondientes a tiempos tempranos están asociados a la respuesta de los estratos superficiales del subsuelo, mientras que los voltajes correspondientes a tiempos tardíos están relacionados con la respuesta de los estratos más profundos. Para la configuración de *loop* coincidente, la difusión de las corrientes inducidas se ilustra en la figura 2. Ade-

más de la difusión hacia abajo, se presenta una difusión hacia fuera con la misma velocidad de difusión. En la literatura especializada, estos bucles de corriente se conocen como “anillos de humo electromagnéticos” debido a la analogía con el fenómeno de difusión en gases (Nabighian, 1981).

Potenciales de Schelkunoff

En lugar de resolver directamente las ecuaciones (2) para el caso general, en geofísica se ha encontrado conveniente (Hohmann y Stanley, 1988) expresar los campos electromagnéticos en términos de los potenciales de Schelkunoff. El origen de estos potenciales radica en escribir los campos eléctrico y magnético como debidos a superposiciones de campos producidos por fuentes de tipo puramente eléctrico y fuentes de tipo puramente magnético (Sánchez, 2003). Los campos eléctrico y magnético pueden obtenerse en el dominio de la frecuencia a partir de los potenciales vectoriales de Schelkunoff **A** y **F** así:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \frac{\nabla(\nabla \cdot \mathbf{A})}{\sigma} - i\omega\mu\mathbf{A} - \nabla \times \mathbf{F} \\ \mathbf{H} &= \frac{\nabla(\nabla \cdot \mathbf{F})}{i\omega\mu} - \sigma\mathbf{F} + \nabla \times \mathbf{A}, \end{aligned} \quad (4)$$

donde los potenciales **A** y **F** satisfacen ecuaciones de Helmholtz inhomogéneas:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{A} - i\omega\mu\sigma\mathbf{A} &= -i\omega\mathbf{P}^s \\ \nabla^2 \mathbf{F} - i\omega\mu\sigma\mathbf{F} &= -i\omega\mu_0\mathbf{M}^s, \end{aligned} \quad (5)$$

P^s y **M^s** son, en su orden, la polarización eléctrica y magnética de la fuente. Justamente **P^s** y **M^s** dan el criterio para

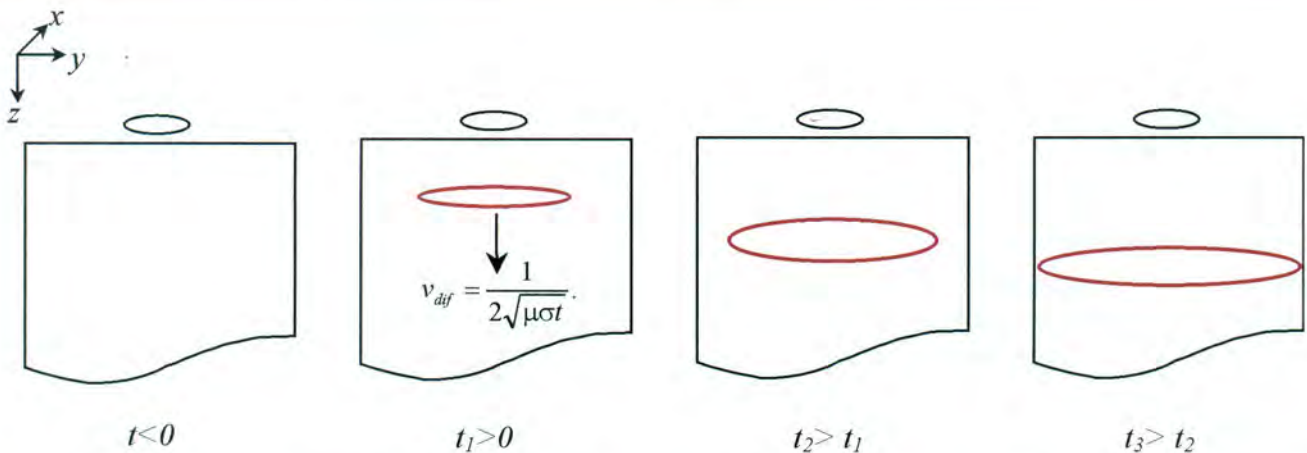


Figura 2. Difusión de las corrientes inducidas en el medio conductor. El bucle negro representa el circuito emisor-receptor y el rojo representa las corrientes inducidas.

considerar una fuente como de tipo puramente eléctrico o puramente magnético; en nuestro caso, debido a que se tiene una fuente magnética, el único potencial de interés es F ya que $\mathbf{P}^s = \mathbf{0}$, y por consiguiente:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= -\nabla \times \mathbf{F} \\ \mathbf{H} &= -\frac{1}{i\omega\mu} \nabla \times \mathbf{E}, \end{aligned} \quad (6)$$

Debido a la forma de la fuente utilizada, basta tener en cuenta únicamente el denominado modo transversal magnético en el cual el potencial \mathbf{F} sólo posee componente z , es decir, $\mathbf{F} = F\mathbf{u}_z$. En razón de que el subsuelo se considera estratificado, es necesario encontrar la solución para el potencial F en cada uno de los estratos; ya que el problema tiene simetría cilíndrica, es conveniente expresar el potencial F como una expansión de Fourier bidimensional. Para el estrato j -ésimo esta expansión está dada por:

$$F_j(\mathbf{r}) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \int_{-\infty}^{\infty} dk_y \tilde{F}_j(k_x, k_y, z) e^{i(k_x x + k_y y)} \quad (7)$$

Remplazando la expansión (7) en la ecuación (5) y teniendo en cuenta que no hay fuentes en los estratos (solución homogénea), se obtiene:

$$\tilde{F}_j(k_x, k_y, z) = F_j^+(k_x, k_y) e^{-u_j z} + F_j^-(k_x, k_y) e^{u_j z} \quad (8)$$

$$\text{Con } u_j^2 = k_x^2 + k_y^2 - k_j^2 \text{ y } k_j = \pm \sqrt{\frac{\mu\sigma_j\omega}{2}} (1+i).$$

El primer término de la ecuación (8) corresponde a potenciales que decaen hacia abajo, mientras que el segundo término corresponde a potenciales que decaen hacia arriba. Para cada estrato es necesario tener en cuenta las dos contribuciones, excepto en el estrato inferior, donde solamente se pueden admitir soluciones que decaigan en $z = +\infty$. En el aire libre, además de la solución homogénea, es necesario tener en cuenta la solución particular que proviene de los campos creados por la fuente. En este caso, la fuente es un bucle extenso de forma circular, que puede verse como compuesto de infinitos dipolos infinitesimales, donde la contribución al potencial de cada dipolo está dada por:

$$F_p = \frac{i\omega\mu_0 m}{2u_0},$$

donde m es el momento de dipolo. La respuesta de todo el bucle se obtiene como superposición de las respuestas de cada dipolo (principio de superposición).

Campo magnético y voltaje inducido

Una vez obtenido el potencial F , el campo magnético se obtiene directamente a partir de las ecuaciones (6). Debido a la simetría del problema es conveniente realizar una transformación de coordenadas cartesianas a coordenadas cilíndricas, de modo que para cada estrato la componente z del campo magnético, en el dominio de la frecuencia, queda:

$$\begin{aligned} H_j(\rho, z) &= \frac{I_0 a}{2i\omega} \\ &\int_0^{\infty} [F_j^+ e^{-u_j z} + F_j^- e^{u_j z}] k_\rho J_0(k_\rho \rho) J_1(k_\rho a) dk_\rho, \end{aligned} \quad (9)$$

donde J_0 y J_1 son las funciones de Bessel de primera especie de órdenes cero y uno, respectivamente. En cada estrato, las incógnitas F_j^- y F_j^+ se obtienen a partir de las condiciones de frontera en la superficie que separa cada estrato:

$$H_0(z, \rho)|_{z=0} = H_1(z, \rho)|_{z=0}$$

$$H_1(z, \rho)|_{z=d_1} = H_2(z, \rho)|_{z=d_2}$$

$$H_{N-1}(z, \rho)|_{z=d_{N-1}} = H_N(z, \rho)|_{z=d_N}$$

$$\frac{\partial H_0(z, \rho)}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial H_1(z, \rho)}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (10)$$

$$\frac{\partial H_1(z, \rho)}{\partial z} \Big|_{z=d_1} = \frac{\partial H_2(z, \rho)}{\partial z} \Big|_{z=d_2}$$

$$\frac{\partial H_{N-1}(z, \rho)}{\partial z} \Big|_{z=d_{N-1}} = \frac{\partial H_N(z, \rho)}{\partial z} \Big|_{z=d_N}$$

A causa de que las medidas se toman en superficie, la única constante que interesa calcular explícitamente es F_0^- . En este artículo se trabaja con modelos de dos y tres estratos; para el caso de dos estratos, el coeficiente es:

$$F_0^- = \frac{(u_1 - u_2)(u_1 + k_\rho) - (u_1 + u_2)(u_1 - k_\rho) e^{2u_1 d}}{(u_2 - u_1)(u_1 - k_\rho) + (u_1 + u_2)(u_1 + k_\rho) e^{2u_1 d}} \quad (11)$$

Para el caso de tres estratos, el coeficiente toma una forma menos sencilla pero puede calcularse analíticamente de un modo directo (Sánchez, 2003). Para el caso de dos estratos, el voltaje medido en superficie es:

$$v(t) = -\frac{dh}{dt} = 2\pi\mu_0 I_0 a^2 \times \quad (12)$$

$$L^{-1} \left\{ \int_0^{\infty} \frac{(u_1 - u_2 + (u_1 + u_2)e^{2u_1 d}) k_p J_1^2(k_p a)}{(u_2 - u_1)(u_1 - k_p) + (u_1 + u_2)(u_1 + k_p) e^{2u_1 d}} dk_p \right\}$$

Donde L^{-1} es la transformada inversa de Laplace, necesaria para pasar de los campos en el dominio de la frecuencia a los campos en el dominio del tiempo (Morse, 1953). En la ecuación (12) ni la integral ni la transformada inversa de Laplace tienen solución analítica, por lo que es necesario utilizar un método numérico para calcular simultáneamente las dos. La integral se calculó entre los ceros de la función de Bessel J_1 mediante el método de Simpson, mientras que la transformada inversa de Laplace se calculó utilizando el método de Stehfest. Esta técnica se ha usado en problemas de elasticidad (Awrejcewicz, 2003) y en el presente artículo se implementó para este problema electrodinámico.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

El programa desarrollado por nosotros se aplicó en problemas de interés en prospección minera y geofísica ambiental. A continuación se presentan y se analizan los resultados para tres casos simples que muestran los alcances y los límites de esta técnica de prospección.

¿Cómo detectar un yacimiento mineral debajo de un estrato aislante?

Este problema se puede modelar como un estrato de baja conductividad encima de un semiespacio de conductividad

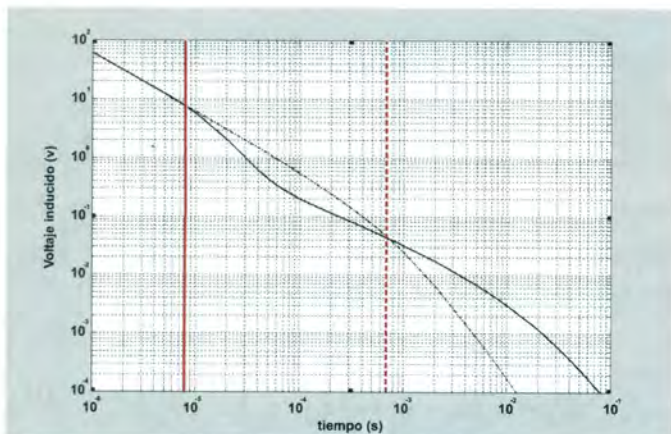


Figura 3. Voltaje transitorio inducido por un subsuelo compuesto de un estrato de 10 m sobre un semiespacio de conductividad 30 veces mayor (línea negra continua). A modo de comparación, se muestra la respuesta de un medio homogéneo con conductividad igual a la del estrato superior (línea negra punteada).

mucho mayor. En la figura (3) (línea negra continua) se muestra el voltaje inducido para un contraste de conductividad de 30 y un espesor del estrato de 10 m. A modo de comparación se ha graficado el voltaje para el caso de un semiespacio homogéneo, con una conductividad igual a la del primer estrato (línea negra punteada). Puede verse que para tiempos tempranos (antes de la línea roja continua) las dos curvas coinciden, lo que indica que para estos tiempos el voltaje transitorio inducido se debe únicamente a la respuesta del estrato superior. Esto se debe a que los anillos de humo electromagnéticos (figura 2), para tiempos tempranos, se están propagando únicamente en el estrato superior y por consiguiente es el único estrato que puede contribuir al voltaje inducido. Para tiempos intermedios (entre las dos líneas rojas) se aprecia una separación de las dos curvas negras, lo que indica que el semiespacio conductivo debajo del estrato ha comenzado a responder. Para tiempos tardíos, más allá de la línea roja punteada, la forma de las dos curvas negras es similar (poseen la misma pendiente), lo cual señala que para estos tiempos solamente está respondiendo el semiespacio conductivo. La zona de transición entre las dos líneas rojas está indicando un cambio de conductividad en el subsuelo: antes de esta zona, la curva es idéntica a la respuesta de un medio de conductividad igual a la del primer estrato, y después las curvas tienen la misma forma pero la línea continua presenta valores más altos, lo que demuestra que el semiespacio posee conductividad más alta que el estrato. Este comportamiento se verificó en todos los casos estudiados; para tiempos tempranos y tardíos la curva de voltaje transitorio contra tiempo (en escala logarítmica) presenta la misma pendiente que la curva correspondiente a un medio conductivo homogéneo, pero se diferencian en el aumento o disminución del voltaje con respecto al obtenido para el medio homogéneo: voltajes más altos corresponden a un medio más conductivo y voltajes más bajos corresponden a un medio menos conductivo.

¿Cómo detectar contaminación por lixiviados en los rellenos sanitarios?

Los lixiviados son líquidos contaminantes muy conductivos encajados en medios de conductividad menor, razón por la cual este problema se puede modelar como un estrato de conductividad alta rodeado de medios de conductividad mucho más baja. En la figura 4 se muestra el voltaje transitorio inducido para el caso de un estrato conductivo encajado en un medio de conductividad veinte veces menor. Pueden apreciarse dos zonas de transición que corresponden a las interfaces que delimitan el estrato conductivo. La primera zona de transición corresponde a un cambio de un estrato poco conductivo a uno de conductividad mayor, mien-

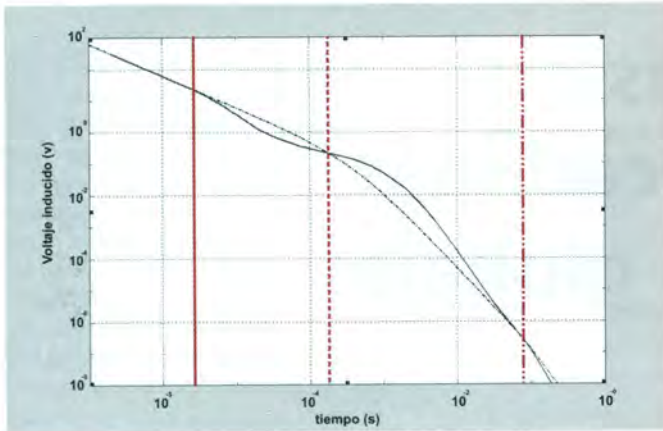


Figura 4. Voltaje transitorio inducido por un subsuelo compuesto de un estrato de conductividad alta encajado en un medio de baja conductividad (línea negra continua). Se tomó un contraste de conductividad de 20. A modo de comparación se muestra la respuesta de un medio homogéneo con conductividad igual a la del medio de conductividad baja (línea negra punteada).

tras que la segunda zona de transición corresponde a un cambio de un medio de conductividad alta a uno de conductividad mucho menor. Como puede apreciarse en la figura, estos cambios son de gran magnitud y permiten detectar de una manera clara la presencia del estrato conductivo.

¿Cómo detectar aguas subterráneas?

Las aguas subterráneas poseen conductividades menores que las de los medios encajantes; por consiguiente, el problema se puede modelar como un estrato aislante, rodeado de un medio conductivo. En este caso, el contraste de conductividad entre el medio encajante y el estrato es de 50. En la figura 5 se muestra el voltaje transitorio inducido para esta situación. En esta figura puede apreciarse un efecto similar al visto en la figura 4, con dos zonas de transición que delimitan el estrato de baja conductividad; sin embargo, la resolución es mucho menor que en el caso de un estrato conductivo, debido a que la velocidad de propagación de los anillos de humo electromagnéticos aumenta cuando la conductividad disminuye; en particular si el estrato es completamente aislante la velocidad de propagación es infinita (ecuación 3) y el tiempo de respuesta del estrato es cero, por lo que resulta imposible detectarlo en un diagrama de voltaje transitorio contra tiempo.

CONCLUSIÓN

A partir de la solución numérica de las ecuaciones de Maxwell, se ha encontrado el voltaje transitorio inducido por el subsuelo, cuando la corriente que circula en un bucle de forma circular se interrumpe abruptamente. Con base en las respuestas obtenidas para los casos estudiados en la

parte de resultado y análisis, se encuentra que este método es eficiente para detectar estratos de alta conductividad rodeados de medios de baja conductividad, razón por la que se puede aplicar en el estudio de contaminación de aguas y propagación de lixiviados, así como en estudios de minería. Sin embargo, la técnica no es buena para detectar estratos aislantes o de baja conductividad encajados en medios de conductividad alta, debido al escaso tiempo de respuesta que presentan los estratos poco conductivos; por tanto, esta técnica de prospección no es apropiada, por ejemplo, para la detección de hidrocarburos, ya que la alta conductividad de los medios encajantes apantalla en gran medida su respuesta.

BIBLIOGRAFÍA

- Awrejcewicz, J. & Pyryev, Y. (2003). *Numerical analysis of displacements in an elastic half-space subjected to impulse type perturbations. Numerical Methods in Continuum Mechanics*.
 Geo Instruments (1996). *Sirotem 3 Operator's Manual*, Versión 22, Nov.
 Hohmann, G.W. & Stanley, H.W. (1988). *Electromagnetic Theory for Geophysical Applications. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, vol. 1. Nabighian, M.N. (ed.). Tulsa: Society of Exploration Geophysicists.
 Morse, P.M. & Feshbach, H. (1953). *Methods of theoretical physics*. Nueva York: McGraw-Hill.
 Nabighian, M.N. (1981). *Quasi-static transient response of a conducting half space and approximate representation: Geophysics*, vol. 44, pp. 1700-1705.
 Orellana, E. (1974). *Prospección geoelectrica*. Barcelona: Paraninfo.
 Palacky, G.J. (1988). *Resistivity Characteristics of Geologic Targets. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, vol. 1. Nabighian, M.N. (ed.). Tulsa: Society of Exploration Geophysicists.
 Panofsky, W.K. & Phillips, M. (1955). *Classical Electricity and Magnetism*. Reading: Addison Wesley.
 Sánchez, S. (2003). *Determinación de la distribución vertical de conductividad del subsuelo mediante inversión de campos electromagnéticos producidos por señales transitorias*. Trabajo de tesis de maestría en geofísica. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias.
 Sánchez, S. & Briceno, L.A. (2001). *Métodos electromagnéticos inductivos: teoría, método y aplicación. Geofísica Colombiana*, N° 5, pp. 40-45.
 Vanyan, L.L. (1967). *Electromagnetic Depth Soundings*. Nueva York: Consultants Bureau

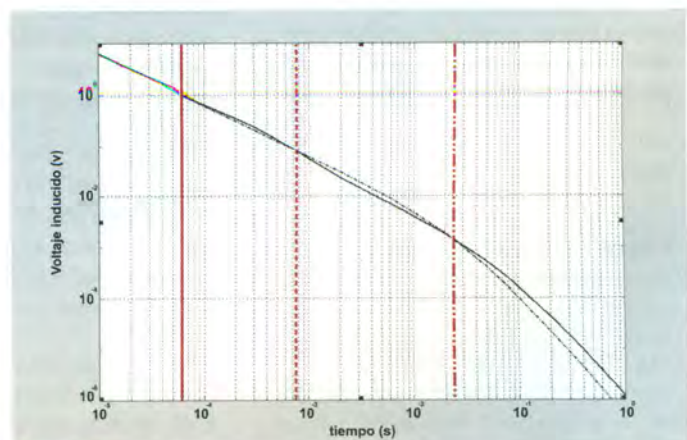


Figura 5. Voltaje transitorio inducido por un subsuelo compuesto de un estrato de conductividad baja encajado en un medio de alta conductividad (línea negra continua). Se tomó un contraste de conductividad de 50. A modo de comparación, se muestra la respuesta de un medio homogéneo con conductividad igual a la del medio de conductividad alta (línea negra punteada).

Costos para la decisión de localización en cadenas de abastecimiento globales

Martha Helena Carrillo Ramírez

En un contexto geoeconómico con economías en vías de globalización acelerada en el cual se destacan los procesos de integración como CEE, TLC y Mercosur, la exigencia de calidad, homogeneidad de productos y confiabilidad en el suministro es muy alta, por lo que sólo es posible que permanezca en el mercado aquella empresa que esté en función de optimizar sus flujos logísticos y de ese modo logre alcanzar un nivel de competitividad mundial mediante la generación del máximo valor agregado a los menores costos posibles. Existe entonces consenso en el sentido de que las empresas deben concentrar esfuerzos en diseñar cadenas de abastecimiento integrales y con un eficiente sistema de flujo de producto, apoyado en unos procesos óptimos en los que se incurra en el más bajo costo. Para esto, el primer paso es detectar dichos costos y proceder a su clasificación, de manera que permita la toma de decisiones relacionadas con ellos, entre las que se destacan la determinación de los mejores puntos de ubicación de las instalaciones que sirven de soporte al sistema logístico, como bodegas, plantas, centros de distribución o incluso punto de entrega del producto al consumidor final.

Ingeniera industrial, especialista en sistemas gerenciales de ingeniería y en integración al sistema internacional de la Pontificia Universidad Javeriana, máster en logística integral de la Universidad Pontificia de Comillas. Profesora asistente del Departamento de Procesos Productivos de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana. mcarrill@javeriana.edu.co.

El proceso de definición de las localizaciones adecuadas para las instalaciones en cadenas de abastecimiento de tipo global es complejo, necesario para todo tipo de organización industrial o de servicios y muy sensible a los costos relacionados con él. Los costos en este tipo de análisis presentan diferentes y muy variadas características, pero se convierten en variables ineludibles cuando se trata de definir la ubicación de una instalación, pues determinan en forma definitiva las condiciones de decisión.

Existen múltiples maneras de aproximarse a su clasificación con el fin de plantear un modelo de toma de decisiones, una de las cuales se presenta en este artículo como propuesta para su manejo, partiendo de las formas tradicionales de hacerlo, ya sea para modelos de tipo exacto, de simulación o heurísticos.

Específicamente, se pretende identificar los elementos que conforman los costos del sistema cadena de abastecimiento global y la explicitación de dichos elementos de una manera cuantitativa, de modo que permitan manejar una base de análisis de costos del sistema para la toma de decisiones mediante diferentes modelos, como por ejemplo de optimización o simulación y así aportar a la competitividad de las empresas actuales. Para realizar este análisis, se determinan los costos probables en cada una de las actividades o etapas del proceso que se esté considerando, ya sea transporte, manejo o transformación, partiendo de los procesos genéricos

reconocidos de una cadena global, como por ejemplo en el caso de manejo, cargues y descargues en cada punto de control de la carga en su trayecto desde el origen en un país exportador a su destino en el país importador.

Palabras claves: costos en localización, localización de instalaciones, cadenas globales.

In a geo-economic context with economies in process of an accelerated globalization, in which the integration processes such as CEE, TLC and Mercosur stand out, the demand for

quality, homogeneity of products and reliability in the supply is very high, and it is only possible for a company that is permanently in function of optimizing its logistic flows to remain in the market and that way manage to reach a level of worldwide competitiveness through the generation of the

Las empresas deben concentrar esfuerzos en diseñar cadenas de abastecimiento integrales y con un eficiente sistema de flujo de producto, apoyado en unos procesos óptimos en los que se incurra en el más bajo costo.

maximum aggregate value at the lowest possible prices. Therefore, a consensus exists in the sense that the companies should concentrate efforts in designing integral supply chains and with an efficient product flow system, supported in some optimum processes in which the lowest cost is incurred. For this, the first step is to detect said costs and proceed to classify them, in such a way that this will permit making decisions related with them, among which, the determination of the best location points of the installations which serve as support to the logistic system,

such as warehouses, plants, distribution centers, or even delivering point of the product to the final consumer, stand out in an important way.

The process of defining the adequate locations for the installations in global supply chains is complex; necessary for every type of industrial or service organization and very sensitive to the costs related with said process. The costs in this type of analysis have different and very varied characteristics; however, they become inevitable variables when trying to define where to locate an installation, since they definitely determine the conditions for the decision.

There are multiple ways of approaching their classification in order to manage to propose a decision making model, one of which is presented in this article as a proposal for its handling, starting as of the traditional ways of doing it, either for exact type, simulation or heuristic models. Specifically, the intention is to identify the elements that make up the costs of the global supply chain system and the explicitness of said elements in a quantitative way, so that they will permit handling a cost analysis base of the system for decision making through different models, such as, for example, those of optimization or simulation and in that way contribute to the competitiveness of the present companies. In order to carry out this analysis, the probable costs to be incurred are determined in each one of the activities or stages of the process which is being considered, whether it is transportation, handling or transformation, starting as of the generic processes, already acknowledged of a global chain, as would be in the case of handling, loading and unloading at each control point of the load in its journey from the origin in an exporting country, to its destination in the importing country.

Key words: costs in location, location of installations, global chains.

ANTECEDENTES

Se entiende por instalación cualquier sitio físico en el cual se realiza la producción, distribución, almacenaje o cualquier otro servicio relacionado y que se constituye en parte de un sistema productivo en la medida en que opera en la red física de la cadena de abastecimiento, entendida ésta como la

red global usada para entregar productos y servicios, desde las materias primas hasta el producto final a través de flujos de producto e información (Apics, 2006).

La solución adecuada al problema de localización de instalaciones contribuye a la eficiencia total de las operaciones, pues permite aportar a la minimización de costos y de tiempos de operación; en la práctica, varios tipos de factores afectan la decisión de localización, y su importancia relativa dentro de ella depende del problema de localización en particular, por ejemplo, de si éste tiene características globales o locales, o de si pertenece a una cadena de servicios o de manufactura. Factores como la proximidad a las materias primas traducida a costos de transporte, impuestos, seguros, costos de almacenamiento o de proximidad a los clientes, pueden ser determinantes según el caso (Sule, 2001).

Para el planteamiento de los problemas de localización de instalaciones la mayoría de los autores consideran, debido a su relevancia en el total de costos, los costos de transporte tanto de las materias primas como de los productos terminados a sus diferentes destinos, los costos de manipulación de los materiales en sus localizaciones y los costos de administrar dichas localizaciones en el lugar determinado. Cada uno de ellos puede involucrar una amplia gama de factores que se deben definir según cada estudio. Por ejemplo, los costos de administración podrían incluir tanto la nómina de personal como los seguros o los gastos en insumos eléctricos.

Los costos de manipulación podrían incluir daños por manipulación y costos de movilización interna. Los costos de transporte a su vez llevarían implícitos costos como combustible, carga - descarga y control de ruta.

Adicionalmente, es importante también tener en cuenta la clase de costos que se analiza. Los costos fijos son aquellos que en total permanecen constantes dentro de la escala relevante a medida que cambia el nivel de la base de costos. Los costos variables se definen como costos que en total varían en proporción directa a los cambios en la base de costos. Las bases de costos



La solución adecuada al problema de localización de instalaciones contribuye a la eficiencia total de las operaciones, pues permite aportar a la minimización de costos y de tiempos de operación.

son factores que modifican el costo, que lo causan, luego cualquier alteración en ellas seguramente

originará cambios en los costos variables de la actividad específica, incrementos o disminuciones (Hansen, Mowen, 1999).

Otra categorización, cada vez más propia de nuestros días, es la diferenciación entre costos propios o tercerizados. Se refiere a si se ha decidido incurrir directamente en ellos o transferir a un tercero su generación, con posterior reconocimiento de ese servicio mediante el pago adecuado. En términos de cadenas de abastecimiento, esto se define como *Third Part Logistics* (3PL), entendido como un agente en el canal logístico que ingresa temporalmente o a largo plazo con el

fin de colaborar en la optimización de flujos del proceso (Carranza, 2004).

ESTADO DEL ARTE

Existen diferentes métodos cuantitativos para resolver el problema de la ubicación de instalaciones múltiples, los cuales básicamente están divididos en tres grupos: exactos, de simulación y heurísticos (Ballou, 2004).

Los métodos exactos

Fundamentalmente, utilizan soluciones del tipo de programación lineal entera mixta para ofrecer un acercamiento a la solución del problema y buscan usar variables matemáticas para describir en la mejor forma posible un problema de localización. Pretenden entonces encontrar el mejor número, tamaño y ubicación de las instalaciones.

Se analizan en este tipo de métodos los siguientes costos, en el caso local (García, Caro, Díaz, Sánchez, Carrillo, 2003):

- a) Costos relacionados con el transporte.
- b) Costos relacionados con el manejo.
- c) Costos relacionados con la transformación y el almacenaje.

Métodos de simulación

Estos métodos permiten describir el problema con una mayor precisión que los exactos, aunque probablemente la solución hallada será de categoría subóptima, contrario a la solución óptima de un problema aproximado que ofrecen los métodos exactos.

La simulación pretende encontrar la mejor red mediante la aplicación repetida del modelo, dadas diferentes opciones de almacenamiento y otros patrones de asignación. Existen tres principales aportes de este tipo de método: el primero de ellos consiste en que, conservando las instalaciones y procesos definidos en las empresas, sea posible observar ahorros en costos mediante la reubicación de los mismos; el segundo es que la simulación puede descubrir valores en el sistema que hasta ahora no se habían detectado mediante el análisis integral del sistema, y por último es posible utilizar este método como herramienta de decisión al momento de incluir nuevos procesos e instalaciones en el sistema.

Es importante tener en cuenta que dependiendo de las políticas de funcionamiento en cada empresa, es posible que estos costos puedan considerarse fijos o variables.

Los principales costos involucrados son:

- a) Costos de transporte: entendidos como el flete para desplazar el producto de la fábrica al almacén.
- b) Costos de entrega: los costos de desplazar el producto del almacén al cliente.

Métodos heurísticos

Se refieren a aquellos que utilizan los principios básicos de reducción del tiempo promedio de búsqueda de una solución. Aunque no aseguran una solución óptima, tienen ventajas en los tiempos de procesamiento, buena representación de la realidad y calidad de solución satisfactoria.

Un gran aporte lo hicieron Kuehn y Hamburger, quienes definieron los costos involucrados en el problema así:

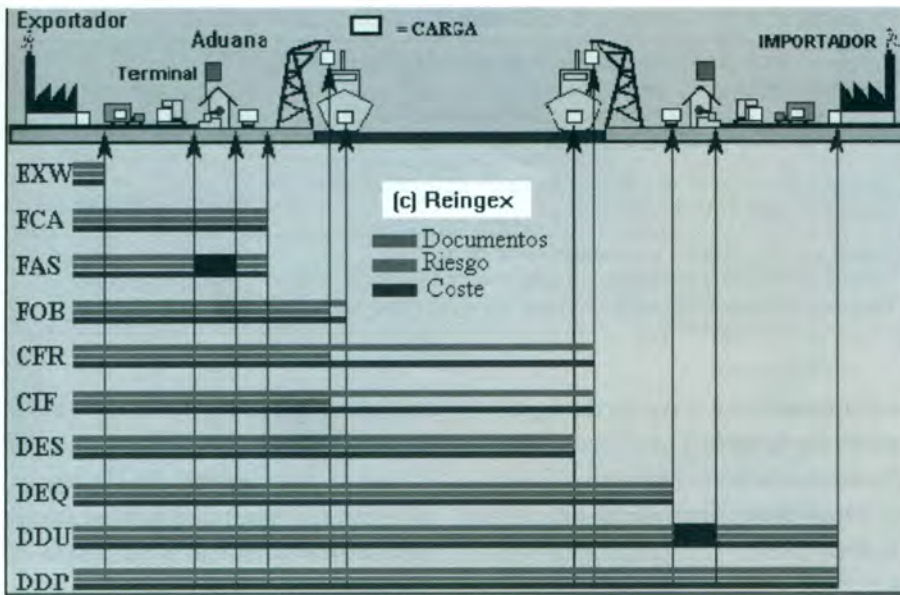
- a) Costos de producción y adquisiciones.
- b) Costos de almacenamiento y manejo de almacén.
- c) Costos fijos de almacén.
- d) Costos de manejar el inventario.
- e) Costos de procesamiento de pedidos de inventarios y de pedidos de clientes.
- f) Costos de transporte de entrada y salida del almacén.

ANÁLISIS DE COSTOS

A continuación se presenta un análisis detallado de cada uno de los principales costos relacionados con cadenas de abastecimiento globales y que se han clasificado en transporte, manejo y transformación, según la propuesta de análisis básica utilizada en los métodos exactos (Geoffrion, Graves, Lee, 1978). Es importante tener en cuenta que dependiendo de las políticas de funcionamiento en cada empresa, es posible que estos costos puedan considerarse fijos o variables. De hecho, las tendencias actuales se dirigen a tratar de lograr que la mayor parte de los costos varíen en función de la producción, con el objeto de darle flexibilidad al proceso frente a cambios del entorno.

Con el propósito de realizar el planteamiento de las ecuaciones correspondientes a cada tipo de costos, se requiere definir los siguientes subíndices: (i) índice de representación del producto producido en la cadena analizada; (j) índice de representación de la planta de producción; (k) índice de la instalación que hay que localizar; (l) índice de la demanda generada para dicho producto.

En cuanto a los costos en sí mismos, a cada uno se le asignará un nombre, de tal manera que se facilite su reconocimiento como variable en el análisis cuantitativo.



Fuente: <http://www.camaracuba.cu>.

Costo de sistema de transporte global (CG_{ijkl})

Existen una serie de actividades que determinan estos costos, y en gran parte están definidas por los términos Incoterms, International Commerce Terms (Cabello, 2000). Éstas son principalmente procesos de *packing*, transporte a puerto de origen, embarque, trámites de aduana y de puerto de salida, transporte físico, trámites de aduana de llegada y de puerto, inspección física, aduanera y documental.

Este costo, entonces, implicará todos los costos del traslado a través de diferentes localidades del producto identificado con el subíndice (i), que ha sido producido en un punto de producción reconocido con el subíndice (j) y ubicado posteriormente en cualquiera de los tipos de instalaciones denominado (k), buscando satisfacer la demanda de la cadena analizada, que ha sido identificado como (l).

Los costos variables involucrados serían (Ministerio de Comercio Exterior, República de Colombia, 2000) (CVG_{ijkl}).

• Costo de trámites de aduana nacionales e internacionales: se refiere a

los costos relacionados con el control cuantitativo y cualitativo de los productos de importación y exportación, y el cobro de los derechos e impuestos de los productos comercializados internacionalmente como fuente de ingresos fiscales del país (ad).

A continuación se presenta una tabla de los principales documentos de control que deben presentarse ante las aduanas (Perilla, 2005).

Certificado de origen
Certificado sanitario
Carta de porte y conocimiento de embarque
Póliza o certificado de seguro
Copia del crédito documentario
Licencia de exportación
Factura consular
Factura de aduana (países Commonwealth)

• Otros costos, como seguros nacionales e internacionales: los principales factores relacionados con el tema y que conllevan variaciones en su monto son el tipo y naturaleza de la carga, el modo de transporte, el método de preparación de la carga, el manipuleo y estiba, la ruta y el viaje, y la siniestra-

lidad del cliente. La prima corresponde al pago que recibe la compañía de seguros, cuyo valor total corresponde a las porciones geográficas: país exportador, tránsito internacional, país importador. La aseguradora establece el precio de acuerdo con el valor asegurado y los riesgos que hay que cubrir (sg).

• Costos de transporte: el pago por el servicio de transporte de mercancías se denomina flete, cuyo valor total lo constituye la suma de fletes correspondientes a cada porción del trayecto. Los dos medios de transporte principales en el campo internacional son marítimo y aéreo (t).

• Costos de derechos portuarios: se cobran al buque o a la carga o a ambos, por la utilización de las instalaciones portuarias; incluyen los derechos de mantenimiento y atraque, y en general se toman como base el volumen, el peso de carga y la capacidad del buque. Los principales derechos portuarios considerados son cargue/descargue, estiba/desestiba, derechos de muellaje, tasa de productividad portuaria, derechos de pilotaje, amarre y desamarre, impuestos portuarios y acceso a las instalaciones portuarias (dp).

• Costos bancarios: estos costos están íntimamente relacionados con el contrato de pagos internacionales que rige la transacción, dentro del contrato de compraventa internacional. Generalmente este monto se determina como un porcentaje fijo sobre el monto de la transacción o un porcentaje del valor de la carta de crédito (bn).

$$CVG_{ijkl} = ad_{ijkl} + sg_{ijkl} + t_{ijkl} + dp_{ijkl} + bn_{ijkl} \quad (1)$$

Los costos fijos involucrados serían (Fk3):

• Costos de personal: las principales funciones relacionadas con el personal responsable del transporte global comprenden la búsqueda y la ob-

tención de la información sobre la disponibilidad y la calidad de los servicios que se van a contratar, su costo, la elaboración y obtención de documentos necesarios, la selección de los servicios más adecuados, el estudio de la ruta crítica y la gestión del embarque desde su arribo al local del importador. Este costo se calcula al multiplicar el valor hora - hombre por el número de horas trabajadas (p).

- Costos de infraestructura del proceso: cualquiera de los procesos de transporte global que sea asumido por la empresa implicará infraestructura y, por tanto, los correspondientes costos de depreciación de la misma. Esta infraestructura puede estar representada básicamente en edificios o maquinaria (ip).

- Gastos de administración (gag): corresponden de manera indirecta dentro de la empresa a los que se asignen al transporte de la mercancía.

- Imprevistos (ipg): generalmente calculados con un 10% del valor de los costos fijos.

$$F_k = p_k + ip_k + gag_k + ipg_k \quad (2)$$

Costo de manejo

La rama de la ingeniería dedicada específicamente a las actividades relacionadas con este costo se denomina *Materials Handling*, por su expresión en inglés, e involucra todos los aspectos relacionados con el movimiento de un producto entre dos puntos que se encuentran a corta distancia, de modo que se garantice el mantenimiento del estado de calidad del producto y se realice al menor costo posible, optimizando recursos (Johnson, 2000). También es posible incluir dentro de este rubro los costos relacionados con adecuaciones finales, como por ejemplo marcado o unitarización.

En general, este costo tiene lugar en tres zonas geográficas: el país exportador, el país importador y el trán-

sito internacional a través de terceros países. En la tabla 1 se muestra un resumen donde se incluyen los principales momentos generadores de costos (Ruibal, 1999).

Sin proceso de adecuación final

(Y_{ijkl})

En cuanto a los costos variables, se plantea la siguiente ecuación (SV_{ijkl}).

- Mano de obra (mo): personal requerido para el proceso de carga y descarga de mercancía, incluidas sus prestaciones de acuerdo con el Código Sustantivo del Trabajo. Se pagará de acuerdo con la cantidad de unidades de producto (i) manipuladas.

$$SV_{ijkl} = mo_{ijkl} \quad (3)$$

Los siguientes son los costos fijos ($R_k 1$):

- Depreciación de maquinaria (dm): este es uno de los principales costos, pues muchas veces implica desembolsos importantes. Un ejemplo son los tres grandes grupos de maquinaria de movimiento de material que pueden usarse en el interior de la empresa: transportadores, grúas o carros, cada uno presenta ventajas y desventajas y pueden llegar a implicar fuertes desembolsos. En el primer grupo están las bandas transportadoras, en el segundo los grandes montacargas y en el último las carretillas.

- Depreciación de edificio (de): con frecuencia, los desplazamientos impli-

can inversiones en adecuaciones de edificio; un tobogán o una grúa aérea exigen ciertas condiciones de espacio y diseño del interior del lugar, por lo que existen costos asociados con las mismas.

$$R_k 1 = dm_k + de_k \quad (4)$$

Con proceso de adecuación final

(P_{ijkl})

En cuanto a un tránsito global, los principales costos de este tipo estarán relacionados con tres actividades específicas que se resumen en la tabla 2 (Ruibal, 1999).

En cuanto a los costos variables, se plantea la siguiente ecuación (ST_{ijkl}).

- Mano de obra (mo): personal encargado del procesamiento de los productos, con sus respectivas prestaciones sociales.

- Materiales e insumos (in): requeridos para embalaje, marcado o unitarización.

$$ST_{ijkl} = mo_{ijkl} + in_{ijkl} \quad (5)$$

En cuanto a los costos fijos ($R_k 2$).

- Depreciación de maquinaria (dr): este es uno de los principales costos, pues muchas veces implica desembolsos importantes. Un ejemplo son los tres grandes grupos de maquinaria de movimiento de material que pueden usarse en el interior de la empresa: transportadores, grúas o carros, cada uno presenta ventajas y desventajas y

Tabla 1

Carga y descarga del vehículo hasta una bodega intermedia al sitio de embarque internacional Descarga en el lugar de embarque internacional Carga en el vehículo de transporte internacional	País exportador
Carga y descarga en el tránsito internacional, cuando no es posible hacer la ruta directa	Tránsito Internacional
Descarga del vehículo que transporta la carga Carga y descarga del vehículo hasta una bodega intermedia Carga y descarga del vehículo hasta donde el importador	País importador

pueden llegar a implicar fuertes desembolsos. En el primer grupo están las bandas transportadoras, en el segundo los grandes montacargas y en el último las carretillas.

• Depreciación de edificio (dc): con frecuencia, los desplazamientos implican inversiones en adecuaciones de edificio; un tobogán o una grúa aérea exigen ciertas condiciones de espacio y diseño del interior del lugar, por lo que existen costos asociados con las mismas.

$$R_k = dr_k + dc_k \tag{6}$$

Costo de transformación y almacenaje (O_{ijkl})

En cuanto al proceso de transformación, se entiende que existen costos directamente relacionados con el costo de venta de lo que se está produciendo. Por lo general son identificables como tales los costos de materia prima, mano de obra directa y los denominados gastos de fabricación variables. Estos últimos pueden implicar partidas como materiales indirectos, mano de obra indirecta, servicios públicos, impuestos sobre nóminas, etc.

Por otro lado, en el caso de cadenas de abastecimiento globales, se producen bodegajes en diferentes partes del proceso. Esto depende de la regularidad del suministro, seguridad, o su uso como inventarios estacionales y estratégicos. En el caso de países muy extensos, como Estados Unidos, o sin litoral, como Bolivia, es muy importante este rubro; generalmente existen zonas denominadas puertos secos donde se realizan almacenamientos temporales (Cabello, 2000).

A continuación se detallan los costos fijos de operación (H_k) (García, Caro, Díaz, Sánchez, Carrillo, 2004).

• Nómina operativa (no): personal requerido para la operación de bodegaje como tal.

• Mantenimiento (man): se refiere al costo del mantenimiento del edificio, equipos y maquinaria necesarios para la operación.

• Seguros e impuestos (se): costo de aseguramiento de bienes que lo requieren e impuestos respectivos.

• Gastos generales de funcionamiento (g): gastos relacionados con el normal funcionamiento de la empresa, por ejemplo servicios públicos.

• Administración (na): se refiere a la nómina de administración con sus prestaciones.

• Depreciación (dc): incluye la depreciación del edificio, la maquinaria y el equipo .

$$H_k = no_k + man_k + se_k + g_k + na_k + dc_k \tag{7}$$

En cuanto a los variables, están determinados por aquellas actividades que se relacionan directamente con la transformación del producto, generando los siguientes costos (CP_{ijkl}):

• Mano de obra directa (md): corresponde al personal empleado que colabora directamente en la transformación de la materia prima en producto o que proporciona un servicio al cliente .

• Materiales (ml): es la materia prima rastreable al bien o servicio que se está produciendo.

• Gastos de fabricación variables (im): corresponde a los gastos variables que hacen parte del proceso pero no pertenecen al grupo de materia prima ni mano de obra.

$$CP_{ijkl} = md_{ijkl} + ml_{ijkl} + im_{ijkl} \tag{8}$$

Costos del sistema (CTS_{ijkl})

Reuniendo todos los elementos de costo, se obtiene la ecuación global que aparece a continuación:



Tabla 2

Actividad	Descripción	Factores de costos
Embalaje	Preparación para su envío a larga distancia	Oferta de materiales de embalaje, productividad de la operación, relación precio-cantidad, relación costo - daño, unitarización, mano de obra.
Marcado	Identificación del producto para su correcto manejo	Tipo de materiales para el marcado, costo de la maquinaria usada, costos de la mano de obra empleada.
Unitarización	Operación de juntar piezas en unidades de manejo	Tipo de estiba o paleta, equipo mecánico de transporte, costo de materiales de protección como cintilla y lámina plástica, arriendo del contenedor, mano de obra, material de relleno.

$$CTS_{ijkl} = CVG_{ijkl} + SV_{ijkl} + ST_{ijkl} + CP_{ijkl} + F_k \cdot 3 + R_k \cdot 1 + R_k \cdot 2 + H_k \quad (9)$$

Esta ecuación es, entonces, una guía para el análisis de costos en ubicaciones globales y una base inicial para el posterior planteamiento de modelos cuantitativos de toma de decisiones sobre el tema.

Un ejemplo sencillo podría considerarse suponiendo una empresa T, cuyos costos de transporte para el producto (i), desde la planta (j) hasta la instalación (k), se han calculado en US\$17 por unidad de producción, los costos de manejo fijos en US\$3.000, los costos de manejo variables en US\$5 por unidad y los costos de almacenaje en US\$3 por unidad, con una demanda del producto (i) correspondiendo a (l). La ecuación final quedaría planteada así:

$$CTS_{ijkl} = US\$171 + US\$3.000 + US\$51 + US\$31$$

BIBLIOGRAFÍA


- Apics (2006). The Association for Operations Management. <http://www.apics.org/default.htm>.
- Ballou, R.H. (2004). *Business Logistics Management*, 5th ed. Estados Unidos: Pearson, Prentice Hall.
- Cabello, Miguel (2000). *Las aduanas y el comercio internacional*. España: Esic.
- Cámara de Comercio Internacional de Cuba (2005). www.camaracuba.cu.
- Carranza, O. & Sabria, F. (2004) *Logística. Mejores prácticas en Latinoamérica*. México: Thomson Learning.
- García, R., Caro, M., Díaz, H., Sánchez, L. & Carrillo, M. (2003). Localización óptima multipropósito de instalaciones bajo incertidumbre. Informe de Investigación. Universidad Javeriana.
- García, R., Caro, M., Díaz, H., Sánchez, L. & Carrillo, M. (2004). Metodología marco de referencia para localización de instalaciones. *Ingeniería y Universidad*, vol. 5, pp.139-159.
- Geoffrion, A.M., Graves & Lee, S.J. (1978). Strategic distribution system planning: A status report, Chapter 7. In: Hax, A.C. (ed.). *Studies in Operations Management*. Amsterdam: North-Holland, pp. 179-204.

- Hansen, D. & Mowen, M. (1999). *Administración de costos. Contabilidad y control*, 4^a ed. México: International Thomson Editores.
- Johnson, J., Wood, D., Wardlow, D. & Murphy, P. (1999). *Contemporary Logistics*. USA: Simon and Schuster Company.
- Ministerio de Comercio Exterior, República de Colombia (2000). *Transporte. Factor de competitividad*. Colombia: Ministerio de Comercio Exterior.
- Perilla, Rogelio (2005). *Manual para importadores y exportadores*. Bogotá: Guadalupe.
- Ruibal, A. (1999). *Gestión logística de la distribución física internacional*. Colombia: Grupo Editorial Norma.
- Sule, D. (2001). *Instalaciones de manufactura. Ubicación, planeación y diseño*. México: Thomson Learning.

Referencias

- Ballou, R.H. (1973). Potential Error in the Center of Gravity Approach to Facility Location. *Transportation Journal*, 44-49.
- Cohen, M.A. & Kleindorfer, P.R. (1993). Creating value through operations: The legacy of Elwood S. Buffa. In: Sarin, R.K. (ed.), *The Management of Productivity and Technology in Manufacturing*. Nueva York: Plenum Press, pp. 153-188.
- García, I. (2005). A simulation model for strategic planning. In: *Institute of Transportation Engineers ITE Journal*. USA.
- Heragu, S.S. (1992). Recent models and techniques for the layout problem. *European Journal of Operational Research*, 57, N° 2, pp. 136-144.
- Heragu, S.S. & Alfa, A.S. (1992). Experimental analysis of simulated annealing based algorithms for the facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, 57, N° 2, pp. 190-202.
- Heragu, S.S. (1997). *Facilities Design*. Boston: PWS Publishing Company.
- Ministerio de Transporte, República de Colombia (2005). *Caracterización del transporte en Colombia y proyectos de infraestructura*. Colombia: Ministerio de Transporte.
- Ministerio de Transporte, República de Colombia (2003). *Actualización de costos de transporte de carga*. Colombia, Ministerio de Transporte, Dirección General de Transporte y Tránsito Automotor.
- Sunderesh, H. (1997). *Facility Design*. PWS Publishing Company.
- Vidal, C.J. & Goetschalckx, M. (1996). The role and limitations of quantitative techniques in the strategic design of global logistics systems. School of Industrial and Systems Engineering in Research Report. Atlanta: Georgia Institute and Technology.
- Vidal, C.J. & Goetschalckx, M. (1997). Strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models. *European Journal of Operational Research*





Implicaciones y retos de la nueva normatividad de la calidad del aire en Bogotá y en Colombia

Recientemente se llevó a cabo, en el Aula Máxima de la Escuela, un foro cuyo tema de discusión giró en torno a las implicaciones y retos de la nueva normatividad de la calidad del aire en Bogotá y en Colombia.

Durante el encuentro intervinieron expertos nacionales en el tema, quienes con sus opiniones, llenas de claridad y precisión, enriquecieron ampliamente el debate y dieron luces a los asistentes sobre el gran esfuerzo que significa la promulgación de estas normas, destacando la inconveniencia de los límites fijados por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, pero planteando también las soluciones más viables a corto plazo que pueden adoptarse para minimizar el impacto de los contaminantes sobre la salud humana.

PONENTES

Gustavo Aristizábal

Médico neumólogo, miembro del Comité de Prevención y Atención en Enfermedad Respiratoria Aguda (ERA), de la Secretaría Distrital de Salud

Luis Jorge Hernández

Médico neumólogo, miembro del Comité de Prevención y Atención en Enfermedad Respiratoria Aguda (ERA), de la Secretaría Distrital de Salud

Eduardo Behrentz

Ingeniero civil, director del Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental de la Universidad de los Andes

Héctor Guzmán

Abogado, docente universitario

Robinson Rodríguez

Ingeniero químico, docente de la Universidad El Bosque

Sylian Rodríguez Lattuada (moderadora)

Ingeniera civil y especialista en Saneamiento Ambiental de la Escuela Colombiana de Ingeniería; máster y Ph.D en Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cincinnati (Estados Unidos). Profesora asistente e investigadora del Centro de Estudios Ambientales de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

EDUARDO BEHRENTZ

Considero que la norma es interesante y valiosa, representa una mejora significativa respecto a las normas derogadas – en especial el Decreto 948 de 1995–, responde a una necesidad nacional, es un buen complemento de la legislación existente y resuelve varias inconsistencias.

Adicionalmente, establece límites de calidad del aire que representan metas racionales, al tiempo que fija límites para la determinación de estados de prevención, alerta y emergencia de calidad de aire, comparables con estándares internacionales.

Algunos comentarios

En cuanto a la inclusión de contaminantes no convencionales no es clara su justificación, dado nuestro nivel de desarrollo en estos temas.

Así mismo, la regulación se hace desde la óptica de la calidad del aire y no en términos de las fuentes de emisión reconocidas para estas especies, mientras que el lenguaje empleado sugiere que el no cumplimiento de los valores establecidos para las especies no convencionales puede acarrear sanciones.

Exceso en el alcance

La norma incluye límites de calidad del aire; reglas para la definición de los niveles de prevención, alerta y emergencia; definición de los programas de reducción de la contaminación, y un listado de contaminantes no convencionales.

Área fuente

En lo que respecta a este término, resulta imperioso hacer las siguientes observaciones:

ROBINSSON RODRÍGUEZ

Las normas en cuestión son una herramienta que la nación demanda desde ya hace varios años y llenan algunos vacíos e incongruencias que han existido desde la promulgación del Decreto 948 de 1995.



La promulgación de la norma es una excelente noticia para el país, puesto que representa un avance para la legislación ambiental del país.

El decreto define un valor límite para PM_{10} (inexistente en Colombia hasta la fecha de publicación de la presente norma), establece las concentraciones y tiempos de exposición para la declaratoria de los controversiales niveles de prevención, alerta y emergencia en cualquier zona del país y aclaran

• La combinación de palabras hace pensar que este término se refiere a una zona geográfica en la cual se presentan emisiones.

• El término en inglés *area-source* se utiliza exclusivamente en aquellos casos en los que es difícil diferenciar entre múltiples fuentes fijas.

• El uso del término *área fuente* en la norma está asociado con fenómenos importantes de contaminación.

• Por consiguiente, se propone usar el término *zona de no cumplimiento*, que en mi opinión se ajusta más a lo que se quiere decir.

Valores establecidos

En cuanto a los valores usados en las tablas, éstos parecen ser una amalgama de cifras recolectadas de la legislación internacional, sin que sea claro el criterio que se utilizó para la selección de los límites, a pesar de un extenso y cuidadoso análisis por parte del Ideam y el MAVDT.

El criterio que se utilizó para la selección de los límites, a pesar de un extenso y cuidadoso análisis por parte del Ideam y el MAVDT.

Ideas finales

La norma podría haber sido mejor en algunos de sus componentes. Por ejemplo, se establecen metas de calidad del aire para PM_{10} que se tornan más restrictivas en forma progresiva, pero lo mismo no se hace para los demás contaminantes criterio. En un tema diferente, la norma no establece una metodología para demarcar los límites geográficos de las zonas de alta contaminación, lo que podría prestarse para vacíos jurídicos y técnicos.

En resumen, no se trata de una norma perfecta, pero su promulgación es una buena noticia para el país, dado que ésta representa un avance para la legislación ambiental colombiana.

que si en un mismo sitio se miden PST y PM_{10} , prevalecerá el valor de PM_{10} para la declaración de los niveles de prevención, alerta y emergencia.

Resolución 601 de 2006

El artículo 4 de la Resolución 601 establece los niveles máximos permisivos

Contaminante	Unidad	Tiempo de exposición	Res. 601/06	EPA	Dec. 02/82	Res. Dama 1208/03
PST	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anual	100	–	100	–
		24 horas	300 (375)	–	400	–
PM ₁₀	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anual	70	50	–	55
		24 horas	150 (300)	150	–	155
SO ₂	$(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	Anual	80	79	100	70
		24 horas	250 (500)	341	400	325
		3 horas	750	–	1.500	1.350
NO ₂	$(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	Anual	100	100	100	100
		24 horas	150	–	–	180
		1 hora	200 (400)	–	–	320
O ₃	$(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	8 horas	80	157	–	110
		1 hora	120 (350)	235	170	155
CO	$(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	8 horas	10.000 (40.000)	10.000	15.000	11.000
		1 hora	40.000	40.000	50.000	40.000

(1) Límite para declarar el primer nivel (nivel de prevención).

bles de calidad del aire para los contaminantes criterio. Sin embargo, se observa que algunos límites son más estrictos que los establecidos por la EPA, como es el caso de los óxidos de azufre (SO₂) y ozono (O₃).

La norma para material particulado (PM₁₀), aunque es más laxa que la establecida por la EPA, se ajusta a la realidad del país, pese a que sigue siendo una meta dura de cumplir para la ciudad de Bogotá.

De acuerdo con el párrafo segundo de este mismo artículo, en Bogotá se debería pensar en establecer el monitoreo continuo de PM_{2,5} y acoger la norma propuesta en el decreto.

En el artículo 5 se plantean los niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales y umbrales para las principales sustancias generadoras de olores ofensivos.

Con base en el párrafo de este artículo y las actividades enmarcadas en el anexo 2, las autoridades ambientales deberán comenzar a realizar el monitoreo de las sustancias contaminantes, con el fin de medir las concentraciones de éstas.

Así mismo en el artículo 6 se habla sobre los procedimientos de medición de calidad del aire, y se menciona que dentro de los seis meses posteriores a la publicación de la norma se elaborará el “Protocolo de monitoreo y seguimiento de la calidad del aire”, el cual será de obligatorio cumplimiento.

Es de imperiosa necesidad y relevancia que las autoridades ambientales participen activamente en la elaboración y estructuración de dicho protocolo.

A lo largo del artículo 9 se trata todo lo relacionado con la elaboración de los programas de reducción de la contaminación, y concretamente en el párrafo de entrega la responsabilidad a las autoridades para que se elaboren y desarrollen estos programas en forma detallada y de acuerdo con las necesidades imperantes, ya que en la actualidad Bogotá carece de ellos.

Posteriormente, en el artículo 10, se establecen los niveles de prevención, alerta y emergencia, indicando la concentración y tiempo de exposición en el que se deben declarar. Se resuelve, además, cualquier confusión que pudiera existir sobre la posibilidad de declarar un nivel de prevención, alerta o emergencia en Bogotá, por causa del sobrepaso de los niveles de PST en la ciudad.

Tener tiempos de exposición de una hora, e incluso de ocho horas, hace pensar en implementar medidas tecnológicas (cambio en las comunicaciones) en la red de monitoreo de calidad del aire, para operar en tiempo real, al igual que en programar a los operadores de la central en turnos para que ésta funcione las 24 horas del día, y así garantizar un cubrimiento hora por hora del comportamiento de la calidad del aire, tanto para declarar una medida como para levantarla después de superar un episodio de este tipo.

Hay que tener en cuenta que es posible que se llegue a un nivel de prevención en una estación, lo que haría declarar inicialmente el nivel de prevención y emprender una serie de acciones por parte de las autoridades para controlar

“el episodio”, para que una hora después se advierta que se ha perdido el esfuerzo de implementación de estas acciones, debido a que sin hacer nada el nivel ha descendido.

Decreto 979 de 2006

El artículo 3 del Decreto 979, que modifica el artículo 93 del Decreto 948 de 1995, fija las medidas para atención de episodios, pero no define ninguna medida cuando debe declararse el ni-

La norma para material particulado (PM₁₀), aunque es más laxa que la establecida por la EPA, se ajusta a la realidad del país, pese a que sigue siendo una meta dura de cumplir para la ciudad de Bogotá.



vel por superar el límite establecido para NO_2 .

Los ministerios de Ambiente, Protección Social, Transporte, del Interior y Justicia, establecerán en los siguientes seis meses las reglas, acciones y mecanismos de coordinación para la atención de episodios de contaminación, con el apoyo del Sistema Nacional de Prevención de Desastres y Atención de Emergencias.

El artículo 4 habla sobre los planes de contingencia por contaminación atmosférica, de donde se deduce que hay que estructurar los planes de contingencia para Bogotá. Aunque el Dama realizó un proyecto para su diseño en 2001, las condiciones actuales

son muy diferentes a las de ese año, por lo cual es necesario actualizar dichos procedimientos o rehacerlos con el fin de estar preparados para la atención de algún episodio.

Por otra parte, en el artículo 5 se modifica lo referente a “áreas fuente” de contaminación, establecidas inicialmente en el Decreto 948 de 1995. Existe una **discrepancia conceptual debido a que no se distingue claramente qué es un área contaminada y qué un área fuente.**

En un área contaminada se pueden registrar altos niveles de contaminación sin tener fuentes emisoras, y las acciones y programas de reducción para solucionar el problema no deben implementarse en esta área, necesariamente. Teniendo en cuenta lo anterior, las autoridades ambientales deberían establecer las áreas fuente de acuerdo con los inventarios de emisión y con ayuda directa de modelación de la calidad del aire para delimitar dichas áreas en la mejor forma posible.

En el párrafo cuarto se menciona que se permitirá la instalación de nuevas fuentes en un área fuente cuando “se demuestre que utilizan tecnologías más avanzadas en los procesos de producción, combustibles limpios y sistemas de control de emisiones atmosféricas, de manera que se garanti-

ce la mínima emisión posible”. No obstante, no existe claridad en lo anterior por las siguientes razones:

- La mínima emisión posible puede ser cualquier cantidad.
- Utilizar tecnologías más avanzadas se puede interpretar como que si se posee una caldera de 1950 y se cambia por una de 1960, se estaría cumpliendo con lo solicitado.

Con base en lo anterior se estima que las autoridades ambientales deben hacer un desarrollo en este sentido, para definir muy claramente cuándo se podría permitir o no la instalación de una nueva fuente en un área fuente.

Es necesario destinar recursos (personal y dinero) para el monitoreo de contaminantes no convencionales, la estructuración de los programas de reducción de la contaminación y los planes de contingencia en las áreas fuente que se identifiquen, ya que como se menciona en el párrafo quinto, se dispone de un plazo no mayor de seis meses para desarrollar esta tarea (fecha límite: 3 de octubre de 2006).

Es importante reiterar que el Dama y la Alcaldía Mayor ya tomaron acciones al respecto mediante la Resolución 174 de 2006, y declararon como áreas fuente las localidades de Puente Aranda, Kennedy y Fontibón.

GUSTAVO ARISTIZÁBAL

Hoy en día se calcula que por cada aumento de diez microgramos por metro cúbico en el PM_{10} se está generando un incremento porcentual en la mortalidad del 0,06 y 2, según estudios realizados en América, Europa, Australia y Asia.

Igualmente, un aumento del $\text{PM}_{2,5}$ causa 3% de mortalidad en el mundo, 5% por enfermedad de tráquea, bronquios y pulmones, y 1% de incremento de mortalidad por IRA en niños menores de cinco años. Estas cifras parecen bajas, pero en realidad tienen un significado muy grande, ya



Igualmente, un aumento del $\text{PM}_{2,5}$ causa 3% de mortalidad en el mundo, 5% por enfermedad de tráquea, bronquios y pulmones, y 1% de incremento de mortalidad por IRA en niños menores de cinco años.

que producen 800 mil muertes prematuras, 6 millones 400 mil años de vida perdidos, y esto en tan sólo en 65% de países en desarrollo.

De conformidad con estas perspectivas, un aumento del 10% en el PM_{10} en Bogotá ocasionaría un incremento de la mortalidad por enfermedades respiratorias y por causas cardiovasculares en todos los grupos de edad, al igual que un aumento de al menos mil consultas en las salas de enfermedades respiratorias agudas, un alza de las complicaciones y hospitalizaciones en menores de cinco años y una aceleración del 50% en complicaciones en niños con asma, que corresponden al 18% de la población escolar.

Los datos que proporciona la red de monitoreo muestran que las horas críticas en Bogotá son las comprendidas entre las ocho y las once de la mañana. Y son tan críticas que casi podría afirmarse que no se debería hacer ejercicio ni actividad física exterior en esas horas.

Otro aspecto que vale la pena destacar es que el único día de mejora en las cifras es el viernes santo, que es el verdadero día sin carro, porque el que está instituido es el día del taxi, esa es la realidad.

Quiero terminar mi intervención citando a una de las personas que más han trabajado en el tema de la correla-

ción de las enfermedades respiratorias agudas y la contaminación: Joel Schwartz del Harvard School of Public Health. Ella dice que “en la actualidad fuertes evidencias sobre la asociación entre contaminantes del aire y aumento signifi-

Los datos que proporciona la red de monitoreo muestran que las horas críticas en Bogotá son las comprendidas entre las ocho y las once de la mañana. Y son tan críticas que casi podría afirmarse que no se deberían hacer ejercicio ni actividad física exterior en esas horas.

cativo de morbilidad y mortalidad en niños, efectos en los recién nacidos de madres expuestas durante el embarazo y exacerbaciones de enfermedades respiratorias de base. La contaminación originada en el tráfico automotor, en particular en vehículos de carga, parece cumplir un papel especial en la incidencia del asma; esto, que era algo que anteriormente se negaba, hoy está comprobado, pues no sólo exacerba cuadros de asma o cuadros bronquiales recurrentes, sino además genera nuevos casos de asma. Otro aspecto que hay que tener claro es que estos riesgos se pueden

minimizar con estrategias menos costosas, incluso que lo que valdría el manejo del asma bronquial, sin hablar de las demás enfermedades. Lo que se gasta en el mundo en el manejo de niños o adultos con asma bronquial daría para que se generaran intervenciones útiles que podrían mejorar la situación de contaminación del aire y, consecuentemente, de nuestra solución de salud”

LUIS JORGE HERNÁNDEZ

Deseo mencionar algunos interrogantes que giran alrededor del tema de contaminación de aire y salud.

Primero, quiero decir que el material particulado no es un solo elemento, sino un conjunto de sustancias que se reúnen en esa categoría que se llama material particulado. ¿Cuál es el riesgo de este material? Que tiene tres efectos: el efecto por su tamaño, que puede penetrar el bronquiolo; su efecto por composición química, y su efecto por que puede transportar virus o bacterias.

La mayor parte de las enfermedades respiratorias en Bogotá son de tipo viral. Por este motivo cuando se pregunta cuántas enfermedades de esta

clase produce la contaminación del aire, hay varias formas de responder ese interrogante. La polución transporta virus y bacterias y hace que las personas se enfermen, pero también causa la inflamación sistémica.

Contaminación de aire vs. salud

Hay varios tipos de exposición y de respuesta. Aquí vamos a hablar de dos clases de asociación. Hay una que es dosis/respuesta y otra que es tiempo/respuesta. Si estamos expuestos a grandes niveles de contaminación del aire y tenemos efectos dañinos en nuestra salud, es un efecto dosis/respuesta, el que más se conoce. El problema de los calentadores de gas dañados y de las intoxicaciones por monóxido de car-

bono, esto es, de las personas que se quedan dormidas dentro del carro cuando el motor está prendido, se puede calificar de exposiciones agudas.

En Bogotá, estamos expuestos a contaminación aguda cuando hay picos de contaminación, es decir, cuando se pasa el promedio diario, establecido en 150 microgramos por metro cúbico en las últimas 24 horas. Pero sucede que también hay exposición crónica, que es la exposición en el tiempo, o sea, cuando

La polución transporta virus y bacterias y hace que las personas se enfermen, pero también causa la inflamación sistémica.

estamos expuestos a bajas concentraciones, más bajas que esos umbrales permisibles pero que afectan la salud. En Bogotá, todos estamos expuestos a ambos tipos de contaminación. La más estudiada es la aguda, pero no hay que olvidar la crónica.

La contaminación del aire se asocia a problemas extramurales, y en el imaginario se cree que los centros de las ciudades son los más contaminados, pero los nuevos modelos señalan que la contaminación a la cual cada uno está expuesto es una sumatoria de exposiciones, que va desde contaminación personal, de su casa, de su trabajo, en el vehículo, hasta la contaminación extramural.

Otro aspecto epidemiológico que hay que tener en cuenta es el llamado período de latencia, que es el tiempo transcurrido entre la exposición y el efecto en salud. ¿Cuál es el período de latencia en contaminación del aire? Puede ir desde minutos, horas, días, hasta años, y los efectos en la salud pueden hacerse evidentes a los minutos de estar expuesto a grandes contaminaciones, o durar horas, días o meses, que son los efectos de rezago. Si un niño está expuesto a contaminación hoy, puede tener efectos en la salud hasta siete días después, como resultado de su exposición previa. Eso obliga a que se trabaje tanto en exposición aguda como en exposición crónica en los diseños epidemiológicos.

En lo referente a costos, en el estudio Solarte, realizado en 1998, se decía que si lográbamos disminuir en diez microgramos por metro cúbico el PM_{10} , el sistema de salud se ahorraría casi \$1.162 millones en gastos de atención.

Antes el tema calidad del aire era privativo de los ingenieros, pero ahora se ha venido trabajando más coordinada e intersectorialmente entre los ingenieros y el equipo de salud; con todo, subsisten algunas diferencias. Una primera diferencia es que el nivel de prevención, alerta y emergencia no aplica necesariamente en salud, ya que en ese sector se pueden tener niveles de alerta mucho más bajos. La segunda diferencia está relacionada con el nivel permisible, que



La norma promedio anual para material particulado PM_{10} en los países de América Latina y el Caribe, según la Organización Panamericana de la Salud (OPS), oscila entre 50 y 55, por lo que uno podría preguntarse si los pulmones de un colombiano son distintos de los de un mexicano o los de un argentino.

para Colombia se estableció en 70 microgramos por metro cúbico, cuando el nivel internacional es de 50.

La norma promedio anual para material particulado PM_{10} en los países de América Latina y el Caribe, según la Organización Panamericana de la Salud (OPS), oscila entre 50 y 55, por lo que uno podría preguntarse si los pulmones de un colombiano son distintos de los de un mexicano o los de un argentino. Ahí tenemos una primera controversia.

Un conferencista mencionaba que hay que fijarse una meta progresiva, pero esto genera muchas inquietudes. Existen

las metas del milenio que, por ejemplo, establecieron bajar en dos tercios la mortalidad de todos los países entre 1990 y 2015; pero no se determinó la progresividad. ¿Cuál es el peligro de la progresividad? Que no se deja como una metodología mediante la cual se aumenten los límites paulatinamente, y lo más seguro es que cuando llegue la fecha límite,

ésta se corra. Es un mecanismo que ha utilizado el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial en forma recurrente. Ese es el interés real y esa es la alerta que a nosotros nos ha originado desde la parte de salud.

Lo segundo es que cuando nos dicen que la norma permisible es 70, brinda una especie de seguridad. Eso tiene implicaciones no sólo legales

sino también en el imaginario de la salud pública, en el sentido de que si estamos en 65, por ejemplo, parece que nos encontraríamos bien, cuando en verdad eso implica una exposición crónica; ya mencionaba cómo el efecto de la contaminación, con un tiempo de latencia muy grave, puede ir desde una simple irritación ocular o dolor de cabeza hasta daños mayores como aborto, bajo peso al nacer, cáncer o infertilidad, a largo plazo.

Entre los estudios de costeo también está el estudio de Larsen, que se hizo para el Ministerio de Ambiente, donde se determinó el costo anual promedio de la contaminación, estimado en \$1.500 millones; decía que 65% de este costo está asociado a mortalidad y 35% a morbilidad, con un modelo que se estableció.

La EPA fija un nivel estándar primario y un nivel estándar secundario. El primario es el que afecta a las personas en salud, y el secundario es el que afecta la visibilidad, los edificios y fija PM_{10} y $PM_{2,5}$; ahí están el promedio diario de

exposición aguda y el promedio anual de exposición crónica, basados en evidencia cierta. En algunos estudios se dice que por encima de esos niveles se acentúan los efectos nocivos en la salud, no se inician, como se lo informamos al Ministerio de Ambiente en su momento; en realidad, se acentúan los efectos adversos en enfermedad respiratoria, sobre todo en niños, y en enfermedad respiratoria cardiovascular, en tercera edad. Lo que hay que dejar en claro es que la norma, tal como está, es un peligro para la salud pública, y esto se debe en parte a que el Ministerio de Ambiente ha sido permisivo.

Calidad del aire

Para demostrar si la calidad del aire es buena o mala, hay que analizar el material particulado. Existen varias formas de mostrar el material particulado, entre éstas la medición de microgramos por metro cúbico, o la medición del índice de calidad del aire. Este último se manejaba en una época en Bogotá, pero no se volvió a utilizar; era un índice que podía ser para cada contaminante o compuesto de varios contaminantes. Aquí en Bogotá

existe un agravante, a diferencia de Estados Unidos y de Europa, y es la altura. Al estar al 2.600 metros hay menor presión de oxígeno y se agravan los problemas respiratorios; así mismo, la enfermedad respiratoria aguda en Bogotá es multicausal y jerarquizada, es decir, la contaminación es un factor de riesgo, es un detonante, pero eso está unido a un cuadro de nutrición, la no lactancia, las condiciones de vacuna-

ción, la enfermedad previa, entre otros factores. Cuando se trabaja en contaminación del aire se deben considerar todos esos factores, ya que no se trata de analizar la contaminación como algo aislado. La mayoría de nosotros ve la contaminación como un factor extramural, pero hay que ver la intramural también, o sea, la que ocurre dentro de la vivienda, el jardín infantil, la escuela, el trabajo, el vehículo...

Contaminación intramural

En el estudio Solarte se mostró que en 36,4% de los hogares de Bogotá —más de tres de cada diez hogares— había exposición dentro del domicilio: humo de cigarrillo, hábitos de cocción con biomasa, cercanía a fuentes de emisión y a sitios de quema, así como exposición a fuentes de área. Esto es contaminación intramural.

En los diseños epidemiológicos que se vienen bajando hay tres generaciones de estudio, pero sólo mencionaremos la última. Actualmente se tiende a utilizar series de tiempo comunitario, es decir, monitoreos a lo largo del tiempo para ver como variable dependiente los efectos en salud, y como variable independiente la contaminación del aire intra y extramural en una misma comunidad, pero analizando las demás variables, o sea, las variables socioeconómicas, bio-



lógicas y de acceso a los servicios de salud.

En Bogotá hemos empezado un monitoreo de calidad en salud. Todavía no es un sistema de vigilancia, tan sólo es una fase inicial. Con todo, ya hay varios diseños de estudio, los desenlaces, las series de tiempo, los cortes prospectivos, los cortes transversales... Por lo menos es un buen comienzo.

Interacción entre los contaminantes

Los contaminantes no están sueltos. Aunque vemos PM_{10} aislado, éste tiene un efecto sinérgico con otros contaminantes (con dióxido de azufre, con ozono) por lo que se potencia y puede sumarse o multiplicarse, ese es un factor que poco se ha estudiado en nuestro medio, que es la modificación del efecto del sinergismo extramural o la combinación de contaminantes. Por ejemplo, en los países que tienen estaciones la gente mantiene las ventanas cerradas y usa la calefacción. Aquí en Bogotá las ventanas de las viviendas permanecen abiertas, por lo general, razón por la cual se comparte mucho el aire extramural con el aire intramural, hay una gran correlación entre los dos.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), se considera que puede haber sinergismo entre PM_{10} y PM

En Bogotá hemos empezado un monitoreo de calidad en salud. Todavía no es un sistema de vigilancia, tan sólo es una fase inicial. Con todo, ya hay varios diseños de estudio, los desenlaces, las series de tiempo, los cortes prospectivos, los cortes transversales... Por lo menos es un buen comienzo.

intramural, lo que desembocaría en un aumento en el número de enfermedades respiratorias.

¿Hacia dónde va la investigación entre la relación de contaminación del aire y salud, qué se ha estudiado y qué dudas hay? En este momento se analizan los efectos de los contaminantes aislados frente a las mezclas, los efectos de interacción entre varios componentes, la intervención de una gran cantidad de variables, la inconveniencia de extrapolar resultados experimentales directamente al ser humano, la aplicación de metodología inadecuada al desconocer los valores normales de la población que no se conocen, la necesidad de efectuar estudios interdisciplinarios —a veces son investigaciones costosas y a largo plazo— y de tener en cuenta escenarios de exposición y el material particulado fino.

En cuanto a la red de monitoreo en Bogotá, el punto de medición del Dama en Puente Aranda tiene un área de influencia de 4 km y mide una tendencia poblacional que es muy útil, pero que no refleja necesariamente lo que están respirando las personas.

Se ha determinado también que cuando se presentan picos de contaminación, hay picos de mayor consulta de enfermedad, por lo menos en lo que tenemos hasta ahora y lo que estamos monitoreando. La idea es establecer correlaciones con esto e implementar sistemas de alertas comunitarias con información hacia padres y cuidadores para evitar, por ejemplo, actividad al aire libre, e incentivar el cierre de las ventanas; pese a que estas soluciones son sólo momentáneas, sirven para que la autoridad ambiental tome otras medidas, por ejemplo, en lo referente a calidad de combustibles, al igual que en mitigar y disminuir fuentes de emisión. Ya empezamos a hacer presión desde el sector de la salud con miras a que la comunidad envíe comunicados al Dama o al IDU en los que informe sobre las vías que se encuentran en mal estado, pues esto no es únicamente problema de movilidad sino también de contaminación. En ese proceso de sensibilización estamos trabajando con el Dama, la Secretaría de Salud, y universidades como la Nacional, los Andes y La Salle.

HÉCTOR GUZMÁN

Voy a hablar un poco sobre el Decreto 979 y la Resolución 601, obviamente desde el punto de vista legal. Primero quiero explicar de dónde viene el concepto de legislación, sobre todo en materia de aire, para empezar a ubicarnos sobre la importancia que tiene esta norma para el país.

Antecedentes

Cuando hablamos de normatividad relacionada con la calidad del aire nos referimos a fuentes fijas, fuentes móviles, emisiones dispersas, calidad del aire y ruido, como un concepto general.

Como antecedentes están la Ley 23 de 1973, el Decreto 2811 de 1974, la Ley 9 de 1979, el Decreto 02 de 1982, la Ley 99 y el Decreto 948 de 1995. Traigo esto a colación para explicarles que pese a que son normas expedidas respecto a la temática, a la problemática ambiental que se comenzó a vivir a partir de los años ochenta, no tenían la característica principal de las normas,

que es la obligatoriedad. De ahí la importancia que puede cobrar la nueva norma de calidad del aire, la 975.

Situación actual

A mediados del año 2005 el Ministerio de Ambiente, en coordinación con seis corporaciones autónomas regionales y la Cámara de Comercio de Bogotá, comenzó a trabajar en el tema de expedir una regulación que fuera eficiente y que pusiera la casa en orden respecto a la temática de calidad del aire, ruido, fuentes fijas, fuentes móviles, entre otros aspectos.

Como resultado de ese estudio de investigación, realizado por el citado ministerio mediante su entidad adscrita, el Ideam, se expidieron el Decreto 979 y la Resolución 601 el 3 de abril del año en curso.

Por medio del Decreto 979 de 2006 se modificaron los artículos 7, 10, 93, 94 y 108 del Decreto 948, que tenía más de diez años de expedido. En materia ambiental esto es una eternidad, sobre



A mediados del año 2005 el Ministerio de Ambiente, en coordinación con seis corporaciones autónomas regionales y la Cámara de Comercio de Bogotá, comenzó a trabajar en el tema de expedir una regulación que fuera eficiente y que pusiera la casa en orden respecto a la temática de calidad del aire, ruido, fuentes fijas, fuentes móviles, entre otros aspectos.

todo si se considera que la problemática por contaminación, en este caso contaminación atmosférica, es algo cotidiano; dicen los técnicos que día tras día hay sinergia de contaminantes, los cuales se deben regular. El derecho tiene que ir detrás de la realidad social, pero en este caso se demoró bastante: casi veinte años el Decreto 02 de 1982

y casi diez años el Decreto 948. El artículo 7 habla de las clases de normas de calidad del aire o de los niveles periódicos de emisión; el artículo 10 trata de los niveles de prevención, alerta y emergencia; el artículo 93 habla de medidas para la atención de episodios; el 94, de los planes de contingencia de contaminación atmosférica, y el artículo 108 habla de clasificación de áreas y fuentes.

Artículo 7

Antes teníamos períodos de exposición anual, diario y horario, pero ahora se ampliaron los períodos de exposición en anual, diario, ocho horas, tres horas y una hora para ciertos contaminantes. En 1995 ya existía la problemática de material particulado, pero no era tan dramática como la que estamos viviendo en estos momentos. Por eso creo que se debe regular, porque como muy bien lo explicaron los doctores de la Secretaría de Salud, tiene una alta incidencia en la ocurrencia de casos de enfermedad respiratoria aguda, en particular en niños menores de cinco años.

Artículo 10

Anteriormente había dos opciones para reglamentar los niveles de prevención, alerta y emergencia: recurrencia y tiempos de exposición. Sin embargo, esto no era lo bastante claro. El año pasado la autoridad ambiental estuvo *ad portas* de expedir una medida de pico y placa ambiental, un estado de emergencia, pero por fortuna no se hizo en ese momento porque las reglas no eran claras y habría sido fácil para cualquier abogado, incluso para cualquier ciudadano, tumbar esta normativa. En la actualidad, se reglamentan los niveles por tiempo de exposición y concentración con el Decreto 979.

Artículo 948

Por medio de este artículo se establecían medidas generales para los niveles de exposición, de alerta y de emergencia. En la actualidad se estipulan medidas generales y específicas para cada contaminante. Para material particulado o dióxido de azufre, en el decreto 979 están las diferentes actividades que debe realizar la autoridad ambiental; obviamente no son las mismas en nivel de prevención que el nivel de alerta o emergencia, dada la gravedad o magnitud de cualquiera de los niveles.

Artículo 94

Antes había planes de contingencia generales y poco aplicables, no existía la obligatoriedad para elaborarlos, mientras que ahora se establecen y se elaboran los planes de contingencia con las autoridades competentes, esto es, hay colaboración entre las entidades territoriales, de tránsito y transporte, de salud y el sector empresarial.

Se debe destacar que en materia ambiental las primeras leyes y los primeros decretos solamente eran un manual de buenas prácticas, no sólo en Colombia sino también en el resto del mundo, por lo que la persona que incumplía estas normas no recibía ninguna sanción por este motivo. A partir de 1982 se dio la potestad de sancionar a quien no cumple determinada actividad o sobrepasa un parámetro específico. Eso existe en el derecho penal, en el civil y debe existir en el derecho laboral, porque si no la norma queda sin soporte.

Artículo 108

Antes, con el fin de realizar programas localizados de reducción de la contaminación atmosférica, el Ministerio de Ambiente trabajaba en coordinación con las autoridades ambientales regionales, pero en los últimos tiempos se ha presentado una problemática en materia de competencia. El Dama es la autoridad ambiental competente para la ciudad de Bogotá, en tanto que la Corporación

Se debe destacar que en materia ambiental las primeras leyes y los primeros decretos solamente eran un manual de buenas prácticas, no sólo en Colombia sino también en el resto del mundo.

Autónoma Regional (CAR) lo es para fuera de Bogotá; eso significa que la CAR no puede decretar un estado de prevención, alerta o emergencia, o clasificar un área fuente dentro del perímetro urbano de Bogotá. Estamos tratando de darles bastante significación semántica a las palabras, de ser claros en lo que queremos decir; obviamente existen vacíos y dudas respecto al nuevo decreto, que luego se deben arreglar.

Allí se diferencian las áreas fuente en cuatro clases: alta, media, moderada y marginal. Por ejemplo, el área de contaminación alta es aquella en que la concentración de contaminantes, dadas las condiciones naturales o de fondo y las de ventilación o dispersión, excede con una frecuencia igual o superior el 75% de los casos de la norma de calidad anual. En estas áreas deberán tomarse medidas de contingencia. El área media es 50%, el área moderada 25% y el área marginal un 10%.

Los contaminantes denominados críticos son material particulado, monóxido de nitrógeno, ozono, etc.; si uno sólo de ellos llega a un nivel de peligro se puede decretar el estado de prevención, alerta o emergencia. Por otra parte, la

clasificación de un área de contaminación no necesariamente implica la declaratoria de alguno de los niveles de prevención, alerta o emergencia de que trata el decreto. La autoridad ambiental se encuentra preparando unas medidas de contingencia para no llegar a este tipo de situación.

En Santiago de Chile y Ciudad de México, por ejemplo, que tienen una amplia experiencia en temas de contaminación atmosférica, se protege la salud de los ciudadanos. Nosotros en la actualidad estamos en mora de llegar a un estado de prevención, alerta o emergencia.

En el último literal se dice que la autoridad ambiental competente deberá estructurar, en un plazo no superior a seis meses, contados a partir de la vigencia del presente decreto, las medidas de contingencia y los programas de reducción de la contaminación para cada área fuente, teniendo en cuenta las diferentes fuentes de emisión y los contaminantes.

Vale la pena anotar que el Dama ya tomó medidas de contingencia: expidió un decreto distrital el 30 de mayo, que es la denominada medida de pico y placa ambiental, muy mediatizada, con base en el Decreto 979.

La principal conclusión de todo esto es que el decreto les dio herramientas a las autoridades ambientales competentes de menor jerarquía que el Ministerio de Ambiente, en este caso el Dama. Con base en dicho decreto, el Dama está tomando las medidas necesarias para proteger la salud de todos los habitantes del Distrito Capital.

Y es que la situación de Bogotá amerita atención. Once de las catorce estaciones analizadas presentan al menos un 60% de los datos por encima de la concentración normal para un año, y seis de ellas tienen los prome-

dios móviles anuales por encima de este valor, lo que representa un 100% de excedencia respecto a la norma anual, especialmente las estaciones ubicadas en la franja occidental de la ciudad.

Vale la pena destacar la cantidad de datos que se encuentran por encima de 50 microgramos por metro cúbico de aire e incluso por encima de 80 microgramos por metro cúbico, información que destaco tomando en cuenta que se ha demostrado la íntima relación que tiene la contaminación atmosférica con la problemática de salud por enferme-



La principal conclusión de todo esto es que el decreto les dio herramientas a las autoridades ambientales competentes de menor jerarquía que el Ministerio de Ambiente, en este caso el Dama.

dades respiratorias agudas.

No nosotros vivimos en un país de normas, tanto que en materia ambiental existen más de mil leyes, 65% de las cuales se han expedido en los últimos quince años. Colombia tiene más de cien tratados firmados en materia ambiental, una infinidad de permisos, etc. A nuestra Constitución la llaman la Constitución ecológica, nuestro Código de Recursos Naturales es el segundo del mundo después del sueco en cuestión de recursos naturales. A nuestras corporaciones regionales las fundaron en 1951. Pero ¿de qué nos ha servido todo esto si tenemos un entorno ambiental totalmente deteriorado? No es la ley, son los planes

que se pueden realizar como consecuencia de la ley.

Soy un convencido de que si se hacen planes o se efectúan actividades ilegales es factible lograr un mejor resultado que con el cumplimiento de la ley. El Decreto 979 fue fuertemente criticado por el sector salud y por los ambientalistas porque fijamos el límite en 70 microgramos por metro cúbico de aire y así, según ellos, no cuidamos la salud de los bogotanos; no obstante, ellos no entienden que no ganamos nada al fijarlo en 50 si no llevamos a cabo actividades y planes para llegar a esa meta. Soy un convencido, de que todo depende de los planes y programas que uno puede implementar para cumplir esta normatividad.

Igualmente, vale la pena anotar en este punto que se hizo un estudio costo-beneficio para la norma, porque en el aspecto ambiental también se consideró el impacto social que puede tener el cierre de una actividad. Sin embargo, cuando el concepto de salud pública va en contra de el de industria, obviamente prevalece el primero. Esta norma está demandada mediante una acción popular y el argumento principal es que no protege la salud pública de los habitantes del territorio nacional. Por su parte, las autoridades responsables de la norma aducen que sí se tomaron en cuenta la salud y el impacto económico que puede tener esta norma.

En cuanto al Decreto 174, del 30 de mayo de 2006, expedido por la autoridad ambiental competente, en este caso el Dama, como consecuencia del Decreto 979 y la Resolución 601. La Alcaldía Mayor, por intermedio del Dama, clasificó las localidades de Puente Aranda, Fontibón y Kennedy, comprendidas dentro del perímetro urba-

no de Bogotá, como áreas fuente de contaminación clase 1. Según los análisis que se hicieron en estas tres localidades, hay una excedencia diaria muy alta.

Preguntas

Después de haber escuchado las cifras expuestas por los médicos, ¿considera usted que el ajuste al PM_{10} debe ser gradual o quizás por el hecho de ser un país en vías de desarrollo nos condiciona a aceptar este PM_{10} tan alto?

Eduardo Behrentz

La norma se necesita y hay que tener una meta, pues sin la norma nunca llegaríamos a ninguna parte. Además, es posible llegar a esos niveles mediante la implementación de diversos planes y estrategias, como invertir en tecnologías limpias, en mejorar la calidad de los combustibles. Lo que ocurre es que en la práctica estamos infringiendo la norma por un margen tan alto, ya que de todas maneras vamos a violar la que pongamos. Estoy muy enterado de los efectos negativos que la contaminación tiene sobre la salud y esa es la razón por la cual trabajo arduamente en estos temas, pero en mi opinión lo que marca la diferencia son los planes y no necesariamente los límites o las metas de calidad del aire.

Luis Jorge Hernández

Lo fundamental es trabajar en la implementación de tecnologías que nos lleven a tener un aire menos contaminado, pero el imaginario para la comunidad es que se está rastreando con 69, que está bien, pero resulta que se está

Conclusión

Desde un punto de vista muy personal, quiero hacer hincapié en que se tienen que implementar unos programas para llegar a cumplir los parámetros establecidos, pues la norma por sí sola no es la solución al problema de la contaminación

haciendo a 30 o 40 micras por metro cúbico, que puede ser muy nocivo, pero mientras más alto esté, más nocivo va a ser. Allí es donde habría que llegar a un acuerdo de trabajar conjuntamente, con miras a encontrar lo más pronto posible unos niveles de salud y de contaminación que permitan una vida de menor riesgo para la población de Bogotá.

Pregunta

¿Para la expedición de la norma ambiental se tuvo en cuenta a la población más vulnerable, o a qué sector de la población va dirigida?

Gustavo Aristizábal

Según el pronunciamiento del comité distrital de ERA, no se tuvo en cuenta a la población vulnerable. La ministra saliente afirmó que puso el nivel en 70 microgramos por metro cúbico por criterios netamente económicos y no por razones de salud pública, ya que habló de la implicación económica que tiene el poner 50 como límite. La respuesta es que no se pensó en ningún momento en esta población vulnerable.

Pregunta

¿En cuánto tiempo la red de calidad del aire de Bogotá podría tomar datos presentes para que se puedan utilizar

en los nuevos estudios de prevención, alerta y emergencia?

Robinson Rodríguez

Eso depende un poco de la inversión que se haga. Si hay el dinero, en menos de un mes estaría funcionando en tiempo real en la parte técnica. En lo logístico, habría que contratar a varias



personas para que trabajen en diferentes turnos. Pero en realidad lo que hace que se demore este tipo de cambio es más que todo la falta de dinero.

Pregunta

¿Por qué razón los expertos en el tema no han apoyado públicamente las medidas propuestas por el alcalde de Bogotá sobre el control ambiental?

Héctor Guzmán

Yo las apoyé totalmente. Las medidas que está tomando esta administración son históricas para la ciudad de Bogotá, por cuanto se está enfrentando a una problemática ambiental de contaminación atmosférica de una magnitud igual o superior a la problemática de contaminación del río Bogotá.

Quienes trabajamos en estos temas estamos muy sensibilizados respecto a la enfermedad respiratoria aguda, pero no me atrevería a sostener categóricamente que la norma no tuvo en cuenta la salud de la población colombiana; con todo, discrepo un poco porque hasta el 3 de abril de 2006 no existía norma nacional sobre material particulado. Aquí hay que reconocer que se está haciendo un trabajo interesante, un trabajo arduo por parte de las autoridades ambientales. Otra cosa es que de pronto no se cumplan las expectativas, pero sí se pensó también en la población colombiana desde el punto de vista de la salud y obviamente en el costo económico que tendría esta norma.



Gustavo Aristizábal

Acerca del Decreto 174, que incluye básicamente el tema de pico y placa ambiental, otro componente es que la Alcaldía Mayor está haciendo lo que le corresponde. Uno se puede devolver en el tiempo y mirar administraciones pasadas, la mayor parte de las cuales no enfrentaron el problema ni tuvieron una política eficaz en temas de calidad del aire, por lo que la posición de

esta administración no tiene ningún antecedente.

A mí, técnicamente, me gustaría otra cosa; yo, por filosofía, estoy un poco en contra del pico y placa ambiental, pero si se miran las herramientas con las que contamos hoy en día, se advierte que básicamente no hay alternativa.

Luis Jorge Hernández

Sobre eso uno tiene la sensación de que hay una tensión entre el nivel nacional y el distrital, de que la nación dejó solo al alcalde con ese problema. ¿Qué pasó con la planta para mejorar la calidad del combustible y del ACPM, que es responsabilidad de Ecopetrol y del Ministerio de Ambiente? Ahí está la verdadera solución. Entonces, están dejando que el Distrito enfrente solo una situación grave, que incluso es de competencia nacional, de competencia del Estado.

El problema de la calidad del aire es un símbolo de desigualdad social y hay muchos intereses económicos en eso. Así las cosas, como sector salud a nosotros nos interesa preservar la salud de las personas y fijar nuestra posición.

Gustavo Aristizábal

Yo también quiero reiterar que la expedición del decreto estuvo presionada básicamente por el sector económico. Negar eso es muy difícil, y hay razones para ello, porque pretender lograr en el país, y específicamente en Bogotá, un nivel de material particulado y sus equivalentes por debajo de 50 implicaría una situación bastante complicada. Pero lo mínimo que se esperaría es que a la par del decreto que genera este límite de 70, viniera el compromiso de verdad, que es lo que todos han expresado. Yo les pregunto a los panelistas dónde hay un plan claro al respecto, un cronograma de trabajo para tener a corto plazo unos

combustibles mucho más dignos. ¿Ustedes conocen una propuesta seria de trabajo en la cual se estén buscando todo el contexto técnico y el recurso económico para dar respuesta a esto? Me gustaría conocerla.

Eduardo Behrentz

La respuesta es muy sencilla: Ecopetrol ha planeado una planta de hidrotreatmento desde hace veinte años y hoy en día no se ha visto ningún avance en ese sentido.

Pregunta

¿Qué estímulos o políticas tienen el Distrito Capital, el Dama o la Alcaldía Mayor para el uso de gas natural como combustible vehicular y de procesos industriales, conociendo su baja contaminación?

Robinson Rodríguez

Realmente los estímulos son evitar que la autoridad ambiental esté encima de ellos. Existe la Resolución 1208, mediante la cual se empezarán a regular los niveles de emisión a partir del 2010, lo que de algún modo es un estímulo para que el industrial utilice el gas natural. De la misma manera en las fuentes móviles, tanto en diésel como en gasolina, tienen que sacar un certificado de emisiones, mientras que si usted utiliza gas natural no tiene que pasar por ahí. Ese es el estímulo, en que no hay supervisión ni auditoría en esas fuentes.

Pregunta

Colombia firmó el Protocolo de Kioto. ¿El país está cumpliendo con este protocolo, en particular en lo referente a las plantas de generación eléctrica a base de carbón y gas?

Eduardo Behrentz

Sobre eso tengo una visión muy particular. Las emisiones de gas invernadero

ro en Colombia son menos del 0,05% del inventario global de emisiones de gas invernadero. Es decir, si nosotros no emitiéramos una sola molécula de CO₂ el problema mundial seguiría exactamente igual, nosotros ni aportamos ni podemos hacer nada para solucionar el problema.

Hay ciertos incentivos económicos en el Protocolo de Kyoto, como el mecanismo de desarrollo limpio y la venta de bonos de carbono, pero el potencial nuestro es muy pequeño. Por ejemplo, si en Colombia se implementaran mecanismos de desarrollo limpio y se vendieran bonos de carbono, el tamaño del negocio sería de unos quince millones de euros al año para todo el país. Por tal motivo no hablaría de gas es invernadero en Colombia.

Pregunta

¿Cree usted que la solución al problema de enfermedades por contaminación de aire es bajar el límite permitido de PM₁₀ a 70 microgramos por metro cúbico a un valor mucho menor, sabiendo que Colombia seguramente no puede cumplir?

Luis Jorge Hernández

La solución no está en eso, pero la norma ayuda a tener un límite permisible. Lo que se pide es que se acoja el límite internacional, que es lo mínimo en salud, pero la solución definitiva está en las fuentes de emisión. Cuando se habló de la venta del 20% de Ecopetrol, se dijo que era para reinversión, pero nadie mencionó que ese dinero podía destinarse a mejorar la calidad del combustible. Vale la pena recordar que el problema de salud y de contaminación del aire es un asunto de Estado.

Pregunta

¿En qué consiste el plan de contingencia que aplica para la actualidad distrital



y, en su criterio, qué debería contemplar en su reestructuración?

Robinson Rodríguez

Habría que empezar por mirar cómo están contemplados los planes de contingencia que hay en este momento y mirar qué de eso podríamos aprovechar para diseñar los siguientes. Evidentemente, sí se necesita tener estructurado un plan de contingencia antes de entrar a declarar un nivel de prevención, alerta o emergencia, porque si llegamos a un estado de éstos sin tener un plan de contingencia no sabríamos qué hacer, no se sabría por cuál camino tomar.

Creo que los planes de contingencia deberían dirigirse, en primer lugar a informar al público sobre el nivel en el que estamos y, en segundo término, cada uno de esos niveles debería ir estructurado con base en las necesidades reales de la ciudad; por ejemplo, en el Decreto 948 decía: "Nivel de prevención: restringir los vehículos con un modelo mayor a diez años". Esa medida impactaría de manera segregada, porque si el problema en Bogotá es PM₁₀, se tendrían que enfocar los esfuerzos a la restricción, de los vehículos que aportan esto, que serían los diésel. Realmente, para estructurar los planes de contingencia habría que hacerse un estudio muy claro de qué es lo que está afectando la ciudad y cuáles son las fuentes que se deberían restringir para lograr impactar rápidamente en un episodio.

Pregunta

Después de conocer las consecuencias sanitarias de las emisiones atmosféricas, ¿por qué se permitió la salida de este decreto, exponiendo a límites superiores de contaminación y no estableciendo reducción programática de las mismas, en donde el Estado establecía ayudas tecnológicas y financieras para lograr el fin?

Héctor Guzmán

Desde el punto de vista legal existe una figura que se llama el principio de rigor subsidiario, una figura específica del derecho ambiental, en el cual la normativa en el ámbito regional o distrital se puede hacer mucho más estricta, pero nunca mucho más laxa que la normativa nacional. En ese orden de ideas, y teniendo en cuenta la problemática de cada localidad, la autoridad competente de cada localidad puede bajar este límite, de 70 microgramos por metro cúbico de aire, fácilmente a 50. Se puede hacer en Sogamoso, en La Guajira, en Yumbo o en Bogotá. O sea, que hay una salida que está en manos de las corporaciones autónomas regionales y las entidades de los grandes centros urbanos.

Robinson Rodríguez

Deseo complementar diciendo que los niveles que se establecen en la norma fueron objeto de un estudio.

El Ideam fue contratado para estructurar esos niveles con una propuesta técnica económica, pero finalmente el que toma la decisión de fijar un estándar es el Ministerio de Medioambiente. Ellos hacen una propuesta técnica económica, pero finalmente el que toma la decisión de poner este número o el otro es el ministerio.



Ejemplo de disciplina, consagración y búsqueda permanente de la excelencia

Luis Felipe González Palacio

Por Cristina Salazar Perdomo

El ingeniero civil Luis Felipe González Palacio, egresado de la Escuela en el 2005, fue reconocido por su excelencia académica. Su brillante desempeño mereció el reconocimiento de la Sociedad Colombiana de Ingenieros, que le entregó el premio Lino de Pombo por haber obtenido el promedio más alto de su promoción. Sus méritos académicos también lo hicieron merecedor de una beca para realizar un doctorado en física en la Universidad de Nuevo México. Luis Felipe habló para la *Revista de la Escuela* sobre su trayectoria académica y sus proyecciones con respecto al país y a la institución.

LA ÉPOCA ESTUDIANTIL

¿Por qué escogió ingeniería?

Siempre me ha inquietado la relación entre las matemáticas y las ciencias físicas. Me ha parecido muy atractivo comprender cómo una ecuación puede modelar un problema.

¿Tenía otras opciones o siempre fue firme la decisión de estudiar ingeniería?

Cuando terminé el bachillerato, era lo que quería. Ahora voy a hacer el doctorado en física porque considero que uno no se debe dedicar a una sola área. Me interesan mucho las ciencias relacionadas con matemáticas pero la ingeniería siempre ha sido el centro.

Si bien ha habido muchos estudiantes brillantes en la Escuela, usted tuvo un promedio altamente destacado. Incluso obtuvo el premio Lino de Pombo,

entre muchos candidatos. ¿Qué significó para usted ese reconocimiento a su desempeño? Fue muy halagador, primero, que la Escuela me hubiera postulado, y segundo, haber sido seleccionado en una competencia nacional. A todos nos gusta que nos reconozcan los méritos, los esfuerzos y el trabajo que hacemos. En mi caso particular, éste fue un reconocimiento no sólo a los cinco años del pregrado sino a la labor de toda la vida.

Su promedio fue de 4,65. Uno se pregunta cómo hace un estudiante para obtener un resultado así...

Algo muy importante fue la formación que recibí en el Colegio San Carlos, de donde soy bachiller. Es extraordinario, me dio una formación muy sólida en todas las áreas, y obviamente en matemáticas y física, las áreas de mayor énfasis en toda la carrera.

Ingresé a la Escuela directamente al segundo semestre. Eso me ayudó mucho. Además, es definitivo el compromiso que asumí con mi propio proceso. Ahora estoy cosechando los resultados.

¿Cómo era su día a día en la vida de estudiante?

Era duro. Noches de rumba, muy pocas. Siempre, incluso desde antes de empezar el semestre, estaba estudiando, preparando los temas, mirando libros... no me dejaba colgar. Lo que hice fue mantener todo controlado.

Su promedio muestra un muy buen desempeño en todas las áreas; sin embargo, ¿hubo una más fuerte?

Bueno, cuando hablamos de ingeniería, de los cinco años de la carrera la mitad es matemáticas con física, el resto son ciencias aplicadas. Mi fuerte siempre ha estado en las ciencias básicas. En ingeniería, fundamentadas las ciencias básicas, todo lo demás sale bien.

¿Y en el área humanística?

También me fue bastante bien. Tuve buenos profesores y por eso considero que recibí una formación muy completa en todos los campos. No obstante, creo que todavía falta integrar más las áreas.

Y en su casa, ¿cuál fue el aporte de su familia?

He recibido una completa formación de mis papás. Mi mamá estuvo muy pendiente de mi proceso educativo. Siempre se inquietó porque yo recibiera educación bilingüe. A mi papá le habían cerrado puertas por no hablar inglés, entonces ella quiso que yo estudiara en un colegio bilingüe. Eso fue fundamental.

Fuera del área estrictamente académica, qué otras actividades realiza o qué le gusta hacer en su tiempo libre.

Me fascina la música, sobre todo el rock pesado. Eso es algo que muchas personas no saben. Creerán que escucho música clásica, pero la verdad es que me fascina el metal y colecciono discos viejos, de varios géneros. Me gusta navegar en internet. Trato de hacer deporte. Cuando tenía trece años, estuve jugando

Me fascina la música, sobre todo el rock pesado. Eso es algo que muchas personas no saben. Creerán que escucho música clásica, pero la verdad es que me fascina el metal y colecciono discos viejos, de varios géneros.

en las divisiones menores de Millonarios. He hecho de todo. En cuanto a la lectura, me interesa la literatura, leo casi todo lo que me llegue a las manos.

¿Prefiere algún autor en especial?

Me gustan Umberto Eco y Jorge Luis Borges. También los clásicos. Los leo cuando tengo tiempo.

¿Ha influido en usted algún científico?

Sí, claro. Feynman, Richard Feynman, el físico estadounidense. Él tiene una serie de libros muy famosos. Me impresiona la claridad de sus ideas. Fue muy polémico. Su trabajo es de los años cincuenta, sesenta y setenta, épocas en las que la comunidad

científica era más cerrada y él hacía afirmaciones que causaban mucha polémica en ese mundo.

Decía ahora que hay una imagen errada de que la persona que se desempeña muy bien académicamente, no participa en otros espacios sociales. ¿Qué hacía en las vacaciones o los fines de semana, cuando podía descansar un poco?

¿Qué hacía? Lo normal: asistir a reuniones familiares o salir con los amigos. La verdad es que cuando estaba estudiando me quedaba muy poco tiempo porque me dedicaba casi completamente a cumplir con mis deberes. En vacaciones iba a Medellín, porque mi familia es de allí.

¿Cómo eran sus relaciones con los compañeros?

Buenas, en general. A veces tenía roces porque, como decimos coloquialmente, lo toman a uno por tonto. Pero también tenía mi grupo de gente y trabajábamos muy bien. Todo era parte del proceso.

¿Hay un distanciamiento de los demás compañeros cuando se tiene un desempeño de ese nivel?

Sí, eso pasa. Siempre sucede. Me ocurrió muchas veces. Uno se distancia un poco. La gente lo mira distinto, con respeto, con... **es una situación complicada.**

¿Lo afectaba eso?

Creo que no. Esa parte la he sabido manejar. En la Escuela traté de ser líder, incluso fui representante ante el Comité de Carrera de Ingeniería Civil y gané con amplio margen de votación. Eso me dio motivos para ver que podía hacer otras cosas, no sólo estudiar. Incluso mostrar liderazgo, que en ingeniería es difícil. Es complicado encontrar

líderes —sobre todo en el país— que sean ingenieros.

Parte de asumir el éxito es saber afrontar los fracasos. ¿Usted ha tenido algún fracaso en su vida? Huuumm...

En otras palabras, ¿ha perdido alguna vez?

Claro, sí, sí.

¿Qué ha perdido?

La oportunidad de continuar mis estudios de ingeniería en Massachusetts Institute of Technology (MIT) porque, aunque fui admitido, no obtuve la beca. Fue algo agri dulce. Lo mismo me ocurrió con la Universidad de Cornell. Después del 11 de septiembre las condiciones para recibir estudiantes cambiaron. Las becas para estudiantes de transferencia, que era mi caso, estaban prácticamente en cero. Hoy día parece que ha mejorado la situación, pero a mí me tocó esa transición. Yo no sabía cómo eran las nuevas regulaciones. Me postulé, pasé los exámenes pero no obtuve la beca, por lo que no pude ingresar. ¿De dónde iba a sacar 45 mil dólares?

¿Cómo le hizo frente a esa situación?

Para mí fue duro porque había puesto todo mi empeño en lograrlo y mis papás también **estaban muy ilusionados con que yo terminara allá.** Fue difícil, pero igualmente yo tenía la responsabilidad de responder por la beca que me había otorgado el Consejo Directivo. En fin, no salió y acabé sin ningún problema en la Escuela.

Entonces usted considera que está preparado para afrontar reveses como éste...

A nadie le gusta perder pero sí, estoy preparado. He tenido que

vivir situaciones económicas complicadas. En una ocasión mis papás quedaron desempleados y tuve que trabajar desde joven para colaborar en la casa. Creo que esas situaciones difíciles son lo que más lo forma a uno.

LA BECA PARA EL DOCTORADO

¿Cómo obtuvo la beca para el doctorado?

Es una beca bastante especial, porque lleva de por medio tres años de contactos con profesores de la Universidad de Nuevo México, no es algo que uno consiga de la noche a la mañana. Allí se interesaron mucho en mi perfil. Al profesor Nitant Kenkre, que es una autoridad mundial en mecánica estadística, le llaman la atención los estudiantes de Latinoamérica porque considera que hay mucho talento desperdiciado aquí. Él es de la India. Conoce mucho el Tercer Mundo y sabe de las dificultades que afrontamos para investigar, tener acceso a buenas bibliotecas y a bases de datos. Me voy como *Fellow* del Consorcio de las Américas para Ciencia Interdisciplinaria, una institución muy importante, y como *Fellowship* para biología matemática en el Instituto Howard Hughes, además de la beca completa en la Universidad de Nuevo México y la oportunidad de establecer colaboraciones científicas con investigadores del Laboratorio Nacional de Los Álamos, que figura entre las instituciones de investigación más importantes del mundo.

¿Cuáles son sus propósitos específicos en la Universidad de Nuevo México?

Como lo decía al comienzo, me interesan muchas cosas. No estoy cerrado a un área específica. Ahora me inclino por la ciencia pura y la historia de la ciencia,

algo que en nuestro medio tiene muy poca madurez. Mi principal objetivo es formarme como investigador junto a gente que trabaje en la frontera de la ciencia, en este caso de la física teórica. No sé qué vaya a suceder después, porque son seis años de doctorado. Una posibilidad es volver al país, a la Escuela; otra es continuar con un posdoctorado... todavía no tengo muy claro qué va a pasar.

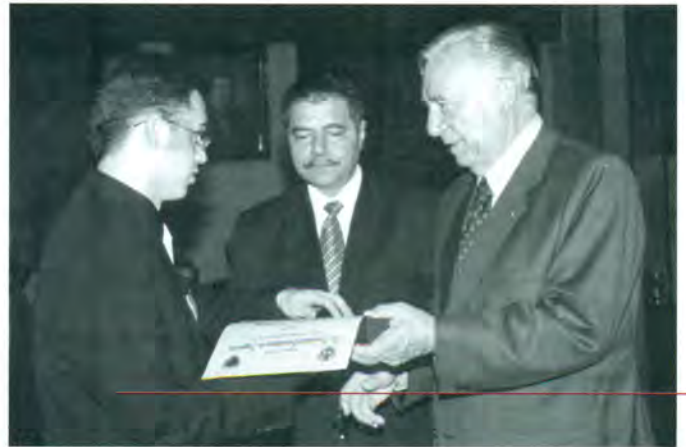
¿Qué piensa su familia de ese largo tiempo que va a estar fuera del país?

Hay un poco de tristeza pero también mucha alegría porque éste es un triunfo de la familia. He tenido el apoyo incondicional de mis papás, de mis tíos y de mi familia en general. Llevo tanto tiempo buscando una oportunidad como ésta que en cierta forma sabíamos que iba a llegar el momento, o sea que no es nada imprevisto.

Pensando en el compromiso con el país, ¿qué lo ata a Colombia para volver?

Me preocupa mucho la parte investigativa. Trabajé dos años con Colciencias, haciendo una investigación con la Escuela, la Javeriana y la Católica, y me di cuenta de que nos falta muchísimo todavía. Si vuelvo al país será a contribuir en esa parte, porque

Mi principal objetivo es formarme como investigador junto a gente que trabaje en la frontera de la ciencia, en este caso de la física teórica.



uno de los motores de desarrollo es la investigación. Quiero establecer un puente entre la Escuela y una universidad de Estados Unidos para hacer programas de intercambios sólidos. Es triste ver cómo las becas similares a la que yo logré se las dan a personas de ciertos países y de otros, como el nuestro, no va nadie. Van siempre de Brasil, de Chile, de Argentina, de México y nosotros casi nunca. Eso me preocupa.

¿Qué lo hizo merecedor de la beca? ¿Qué estaban buscando que lo encontraron en usted?

Ellos buscan básicamente gente inquieta, con excelencia académica, que hable inglés y haya demostrado un interés constante en estudiar. Siempre estuve en contacto con la universidad. Les mandaba mis notas. Incluso cuando obtuve el premio Lino de Pombo lo publicaron. Allí hay una relación humana muy fuerte.

Cuando llegue a la universidad procedente de un país latino, ¿a cuáles retos cree que se va a enfrentar?

Al doctorado de física entramos 34 personas y creo que sólo hay uno o dos latinos. Adicional a la

parte académica, va a ser un reto compaginar con gente de todo el mundo y entender las distintas culturas, comprender que hay otras formas de pensar.

¿Ha previsto que encontrará gente de niveles tanto inferiores como superiores al suyo?

Sí, claro. Es muy interesante que en los doctorados en ciencia de Estados Unidos algunas personas tienen pregrados de áreas diferentes como la música, la filosofía, la literatura, entre otras. La educación allá es tan abierta que permiten estudiar lo que uno quiera si demuestra que lo puede hacer.

¿Tiene alguna prevención o está abierto a la posibilidad de encontrar personas de diferentes razas, religiones y condiciones sociales?

Va a ser un reto grande conocer gente de todas partes. Hasta donde me ha sido posible, he procurado mantener una mentalidad abierta frente a todo tipo de creencias y tendencias. Estamos en un mundo globalizado donde encontramos de todo. Ese ha sido un pilar de mi formación.

¿En qué área le gustaría trabajar cuando termine el doctorado?

Me interesa muchísimo la parte matemática. Uno puede escoger

entre física experimental y teórica, y yo pienso hacer el doctorado en esta última. En la Universidad de Nuevo México hay laboratorios para hacer prácticamente lo que uno quiera y profesores que trabajan en todas las áreas. Precisamente eso es algo más que me parece interesante del enfoque que le dan a la

secundaria, pero en la educación superior se mira otro tipo de cosas. No es culpa sólo de los estudiantes. He conocido estudiantes extraordinarios. Por desgracia, muchos se van precisamente porque encuentran oportunidades que aquí no hay. El divorcio educativo es impresionante.



investigación allí: las personas no se dedican sólo a un área sino a muchas. Uno puede tener un título en ingeniería y trabajar en física, matemática aplicada, materiales, biología... Igualmente, puede desempeñarse luego en gran cantidad de áreas. Es una formación interdisciplinaria.

Como egresado, ¿qué cree que pasa con los estudiantes de la educación superior? ¿Por qué es noticia un estudiante que tiene un promedio de 4,6?

Hay un divorcio completo entre la educación media y la educación superior. Por ejemplo, en el bachillerato se trabaja con logros y competencias. Un estudiante que ha sido evaluado toda la vida con un sistema, llega a la universidad y encuentra otro. Él no sabe que es anticuado, sólo que es distinto. Mucha de la culpa la tienen las universidades porque no han sido capaces de actualizarse, de ir al ritmo que va el mundo y, más grave aún, el país. Se hacen esfuerzos en primaria y en

Esa formación altamente científica, que es a la que está apuntando y en la que muchos trabajan ya, ¿sí tiene un campo de acción en Colombia?

Creo que sí, pero hay que empezar de cero. He hablado con personas que han vuelto al país después de hacer un doctorado o una maestría y han tenido que empezar así porque no hay cultura investigativa ni en las universidades ni en Colombia. Estamos un poco atrasados, tenemos un rezago tecnológico muy fuerte que nos impide hacer muchas cosas. Por ejemplo, conseguir una línea de banda ancha en Colombia es uno de los trámites más caros en el mundo, por lo cual resulta muy complicado acceder a esos recursos básicos. Uno muchas veces termina haciendo labores para las que no fue formado. Luego de recibir una formación científica, hay que suplir cargos porque falta el recurso humano.

¿Es básico el dinero para hacer investigación?

Sí, es básico. No es lo único pero en el mundo, no sólo en Estados Unidos, muchos contratos de investigación e investigadores se mueven en función de la oferta económica. Es algo que no se puede dejar de lado. Hacer investigación de punta cuesta mucho dinero. Se necesitan equipos de última tecnología y laboratorios bien dotados. Un acelerador de partículas, por ejemplo, cuesta todos los millones de dólares del mundo. Aquí, obviamente, no lo tenemos. Repito que no es lo único. Ante todo se necesita una visión científica muy clara, saber hacia dónde se va y qué se quiere lograr, y contar con infraestructura y gente especializada en ciertos campos para que el proceso fluya. Publicaciones especializadas y una red de investigadores, como las que hay en otros países, son también imprescindibles.

ACERCA DE LA ESCUELA

¿Cómo califica la formación que recibió en la Escuela?

En general, no tengo nada negativo para decir. Como señalaba al principio, lo que le falta a la Escuela, y al país en general, son unos programas más sólidos en investigación. En la Escuela hay demasiado enfoque en docencia y nos falta en la parte investigativa. Uno quisiera, al final de la carrera, no ver tantas asignaturas sino dedicarse a algunos proyectos, pues uno se da cuenta de que las líneas de investigación no están maduras; entonces, como le decía de la gente que vuelve cuando acaba su doctorado, uno aquí tiene que empezar de cero porque muchas veces las líneas de investigación no existen.

¿Considera que tiene una formación integral?

Pienso que siempre he estado en ese camino. La Escuela ha hecho un esfuerzo grande por darle al estudiante una formación integral, pero ésta nace de él. Las instituciones ofrecen los medios y las oportunidades, pero el estudiante es el responsable de su propio proceso; él es quien tiene que interesarse por un área determinada o por una actividad. Por eso la Declaración de Principios de la Escuela es clara al hablar de "una comunidad de objetivos entre estudiantes y profesores".

¿Qué le gustaría hacer por el país, bien sea que regrese o se quede en el exterior?

Me gustaría mostrar una cara positiva del país. Que se sepa que los colombianos podemos investigar y hacer ciencia de primer nivel. Hay gente que lo ha demostrado. Nos falta divulgarlo más, explotar el talento que tenemos.

Todos estos cambios tecnológicos que se presentan día a día generan inquietudes sobre la respuesta que pueden dar países como Colombia. ¿Qué cree que se puede hacer?

Las instituciones ofrecen los medios y las oportunidades, pero el estudiante es el responsable de su propio proceso; él es quien tiene que interesarse por un área determinada o por una actividad.



Hay ejemplos de países como China, comunista y con mucha censura, que desde hace unos años han establecido una red de investigadores en el exterior. Ese tipo de modelos no es para copiarlo pero nos puede servir de ejemplo para ver qué podemos hacer, porque la fuga de talentos de Colombia es impresionante. El censo mostró que ni siquiera se sabía cuánta gente se había ido del país. Ese tipo de cosas son bien preocupantes porque si no hay el capital humano para efectuar los cambios, éstos no llegarán.

A propósito del ingreso de China al mercado latinoamericano, ¿qué cree que se debe temer? Obviamente, el tamaño de la población es intimidante. ¡Mil trescientos cincuenta millones de habitantes! Esa fuerza laboral unida, trabajando con un solo propósito, va a absorber al resto del mundo, sin lugar a dudas. Tal es el problema que países como Estados Unidos, la primera potencia, Alemania y Gran Bretaña, entre otros, están tomando correctivos serios para aminorar un poco el impacto de China. Veo también con admiración cómo se están dotando las universidades chinas. Están haciendo convenios bilaterales con las mejores

universidades del mundo para que sus científicos —porque tienen ya una base científica— se formen y vuelvan al país.

¿Entonces aprenderá a hablar mandarín?

Hoy en día, como están las cosas, ni con dos idiomas ni con tres... hay que hablar cuatro. Cada vez hay más competencia. Afortunadamente, en ciencia el idioma principal sigue siendo el inglés.

¿Ha pensado ocupar un cargo público o desempeñarse en otra área diferente de la ingeniería?

Me encantaría estar vinculado al sector educativo. Ser rector de la Escuela, por qué no, dentro de unos quince años. Trabajar en investigación con Colciencias y con las universidades. Se necesita mucha integración universitaria. En Bogotá, es triste que las universidades sean como feudos, como entes aislados, desconectados de la realidad. Quisiera contribuir a conectar más las universidades no sólo tecnológicamente sino conocer la gente y lo que hace.

Por lo que ha dicho, se prevé que mantendrá su contacto con la Escuela y con el país, en el campo académico.

Sí, mantengo contacto con algunas personas claves de la Escuela y de otras instituciones. Estoy formando mi red de contactos en el exterior, que es difícil porque Colombia tradicionalmente no es muy brillante en el campo científico. Estoy tratando de darme a conocer, y cuando esté allá con **más razón.**

¿Qué le gustaría hacer por la Escuela?

En primer lugar, mostrar, y creo que con el premio Lino de Pombo lo he hecho, que en la Escuela hay excelencia académica, que hay gente que se puede mostrar internacionalmente. Llevo la impronta de la Escuela. Por la institución quisiera establecer una red de contactos bien fuerte para que haya intercambios de estudiantes, profesores e

investigadores. Espero que en un futuro muy cercano haya maestrías en la Escuela para inyectarle investigación.

Hablando de la impronta, ¿qué lo hace diferente de los egresados de otras instituciones?

El trabajo duro. Aquí hay que trabajar duro. Uno lo sabe cuando habla con gente de otras partes.

¿En qué debe concentrarse la formación del estudiante que empieza su carrera ahora?

En ingeniería, el estudiante debe fortalecer hasta donde más pueda la parte de ciencias básicas, que es fundamental, y ahondar en la parte humanística. Debe abarcar un buen espectro de conocimiento y hacia el final de la carrera mirar qué le interesa más. Si volviera a empezar mi carrera ahora, me centraría en hacer investigación y publicar desde el pregrado.

Luis Felipe se encuentra ahora en la Universidad de Nuevo México iniciando sus estudios de doctorado. Su alto nivel académico con seguridad le seguirá brindando oportunidades y le dará grandes satisfacciones.



La transmisión de energía eléctrica en las décadas venideras

Tomado y adaptado de *Scientific American*, julio de 2006

En la edición anterior, mostramos el panorama de la transmisión de energía eléctrica mediante una superred de líneas de transmisión construidas con materiales superconductores, ya que la demanda de energía eléctrica producirá sobrecargas que los materiales conductores tradicionales no serán capaces de absorber; entonces será necesario desarrollar nuevos diseños de líneas de transmisión a base de materiales superconductores, cuya resistencia eléctrica es cero cuando se mantienen a bajas temperaturas. Veamos ahora cómo funcionará la nueva ingeniería de transmisión.

Los fundamentos científicos de esta tecnología vienen de un campo de la ciencia llamado la "física de frío", el cual estudia el comportamiento de ciertos metales cuando su temperatura se baja a niveles cercanos al cero absoluto ($-273\text{ }^{\circ}\text{K}$). En este estado, la materia adquiere propiedades que no aparecen a la temperatura habitual del ambiente. Uno de los fenómenos que se observan es la ausencia de resistencia eléctrica y, por tanto, la intensidad de la corriente que puede fluir por el material es literalmente infinita, la corriente va al infinito cuando R va a cero, y por esta razón el material recibe el nombre de superconductor. Sin embargo, lograr estas bajísimas temperaturas no es fácil, es necesario recurrir a hidrógeno y helio líquidos.

Después de varias décadas de investigación en la física de bajas temperaturas, se descubrió que la ausencia de resistencia también se observa a temperaturas mucho más altas, del orden de los $150\text{ }^{\circ}\text{K}$ y así, hoy se habla de superconducción a bajas temperaturas (desde fracciones de $1\text{ }^{\circ}\text{K}$ hasta 8 o $9\text{ }^{\circ}\text{K}$) y superconducción a altas temperaturas (del orden de los $150\text{ }^{\circ}\text{K}$). Es esta última la que ha dado pie a los nuevos paradigmas de diseño de líneas de transmisión con materiales superconductores.

La idea propuesta por Grant, Starr y Overbye consiste en bajar la temperatura del material que transportará la corriente eléctrica hasta lograr el efecto de la superconducción y así llevar millones de kilovatios/hora a lugares distantes, sin la presencia del problema del calentamiento por efecto Joule. ¿Cómo lograrlo?: será necesario disponer de hidrógeno líquido en toda la extensión de la red de transmisión para mantener la temperatura de superconducción. Esto suena bastante extraño y tal vez futurista, pero por otra parte, abre la posibilidad de usar la red de transmisión para bombear hidrógeno líquido de un lugar a otro y así ofrecer el transporte de la que será una fuente de energía de vital importancia en las próximas décadas: el hidrógeno.

El diseño propuesto consiste en una tubería cuya sección transversal se puede apreciar en la figura adjunta.

Con un diámetro exterior de 75 cm , aproximadamente, el cable transportador de energía lleva en su interior un cilindro coaxial de 40 cm de diámetro por el cual viaja el hidrógeno líquido, y el material de este cilindro interior es precisamente el material superconductor, que por su contacto permanente con el hidrógeno estará siempre a la temperatura de superconducción y podrá transmitir la energía eléctrica por su superficie al mismo tiempo que lleva el hidrógeno. Este cilindro interior deberá estar aislado térmicamente con una capa de material aislante y de espesor adecuado para garantizar la temperatura de superconducción.

El diseño propuesto es ya un proyecto piloto y abre fronteras insospechadas para el desarrollo de la ingeniería de transmisión de energía eléctrica en el siglo XXI. Nos encontramos a las puertas de una nueva ingeniería que necesitará de manera profunda el uso de los nuevos descubrimientos de la física de los materiales.

Se observó que con nitrógeno líquido como enfriador, era posible construir una "tubería eléctrica" capaz de transmitir cinco gigavatios y competir con líneas tradicionales de transmisión a distancias mayores de los 800 kilómetros .

En los años 2002 - 2004 se llevaron a cabo varios seminarios organizados por Thomas Overbye, en los cuales se reunieron varios expertos para diseñar un segmento piloto de cien metros de longitud de cable superconductor. Es importante desarrollar prototipos con prontitud, ya que el crecimiento de las redes existentes llegará a su capacidad de máxima carga en unos pocos años. La demanda de energía en el siglo XXI

crece rápidamente y plantea dos problemas fundamentales: de dónde extraerla y cómo distribuirla. Los combustibles fósiles seguirán siendo una alternativa por unos veinte años más. Debemos entonces apartarnos de esa dependencia de los combustibles fósiles, pero para la explotación en gran escala de los recursos energéticos que no provienen de los fósiles, incluidos la energía solar, el viento, la biomasa agrícola y las fuentes de energía nuclear, se va a necesitar una nueva red de distribución, capaz de llevar trillones de kilovatios hora cada año.

