

## CAMBIO CLIMATICO EN COLOMBIA

Oscar J. Mesa S.

Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos  
Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín

### RESUMEN

Los estudios más serios indican que el calentamiento global producido por el incremento de los gases de invernadero en la atmósfera y la deforestación de la selva tropical en la Amazonia y en otras regiones colombianas tendrán efectos negativos significativos sobre el clima colombiano, representados en menor precipitación, evapotranspiración y escorrentía y mayor temperatura. Es evidente la escasa e insuficiente investigación climática y meteorológica nacional sobre estos temas, que están en el centro de atención para la comunidad científica internacional, pero que requiere de la mirada regional y local que los extranjeros nunca harán por nosotros y de la perspectiva nacional en asuntos controversiales. Los efectos económicos, sociales y políticos de estas modificaciones antrópicas. En este trabajo se recorre rápidamente por los elementos más importantes de la problemática y se hacen algunas recomendaciones.

### 1. EFECTO INVERNADERO Y FENOMENO DEL NIÑO

Durante 1992 Colombia sufrió uno de los racionamientos de energía eléctrica más intensos de su historia. El déficit generalizado de lluvias sobre la mayor parte del país se reflejó en merma considerable de los caudales de los ríos que aportan a los embalses reguladores del sistema de generación hidroeléctrica. Esta sequía ha sido asociada con el fenómeno de El Niño (EN), que es como un calentamiento anómalo del Pacífico tropical frente a las costas de América del Sur. El Niño a su vez ha sido asociado a la Oscilación del Sur (OS), un desbalance de presiones atmosféricas entre el Pacífico ecuatorial central y el Pacífico occidental el llamado continente marítimo (Aceituno, 1988).

Desde la conquista española hay registros de eventos ENOS, y hay evidencias acerca de la ocurrencia de paleo-ENOS (Ortlieb y Macharé, 1992). Los últimos eventos ENOS se presentaron en 1951, 1953, 1957-58, 1963, 1965, 1969, 1972-73, 1976-77, 1982-83 y 1986-87, lo cual muestra un comportamiento recurrente con un período no fijo entre 3 y 7 años. El fenómeno ENOS tiene implicaciones climáticas a escala global (teleconexiones) tales como las sequías en el Nordeste de Brasil y en el Sahel en Africa, las inundaciones en Perú, Chile y el sur de Estados Unidos, los monzones de la India y China, los ciclones tropicales, etc. (Ver Philander, 1990;

Glantz et al., 1991; Poveda y Mesa, 1993). Las implicaciones económicas, ambientales, y sociales del ENOS a escala mundial son gigantescas y en Colombia el racionamiento energético lo puso de presente.

Los mecanismos físicos que explican los períodos secos en Colombia asociados a las fases cálidas de El Niño (negativas del Índice de Oscilación del Sur) han sido discutidas de manera global en literatura antes citada. En general el debilitamiento de los vientos alisios acompaña y refuerza el calentamiento del mar frente a la costa pacífica ecuatorial de Sur América, al disminuirse la llamada surgencia de aguas frías y ricas en nutrientes. Sobre el mar, los centros de alta convección están directamente determinados por los patrones de la temperatura superficial. Tanto el frente intertropical de convergencia y la zona de convergencia del Pacífico Sur tienden a estar sobre regiones del mar con aguas con temperaturas por encima de los 27 °C. Durante los eventos ENOS cálidos se produce por lo tanto un desplazamiento desde su posición normal más hacia el sur y hacia el occidente, siguiendo la mancha de alta temperatura en el Pacífico, disminuyéndose la convección sobre Colombia (Hastenrath, 1991).

En la discusión sobre el cambio climático global y el efecto invernadero hay posiciones muy serias (Ramanathan and Collins, 1991) que postulan que la presencia de termostatos naturales impedirá el calentamiento generalizado. Sobre el Pacífico Occidental, las altas nubes de gran convección actúan como reguladores al aumentar el albedo. De hecho, no hay observaciones de temperatura superficial del mar por encima de los 305°K. El efecto del aumento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera sería entonces una redistribución de la temperatura, produciendo eventos El Niño más frecuentes.

De hecho, en los últimos tres años hemos asistido a un evento cálido en el pacífico sin precedentes históricos por su duración. El impacto sobre nosotros ha sido claro, Las Empresas Públicas de Medellín (1993) señalan por ejemplo que los últimos 36 meses (de Diciembre de 1992 hacia atrás) han sido los más críticos en toda la historia de registros hidrológicos en las cuencas de Antioquia, en particular en el río Nare, afluente del embalse del Peñol.

## 2. EFECTO DE LA DEFORESTACION

La presión de la colonización por nuevas tierras, la demanda de maderas preciosas y la expansión de la ganadería han llevado a una creciente deforestación de las selvas tropicales. Según UNESCO (1991), la FAO en 1990 estima que la tasa anual de deforestación mundial es de 17.1 millones de hectáreas. Si la deforestación continúa a estas tasas en aproximadamente 60 años se acabaría la selva tropical. Varias fuentes estiman la deforestación anual en la Amazonia Brasileira entre  $3,0$  y  $4,5 \times 10^6$  ha por año (Brasil INPE, 1989). En Colombia se estima la deforestación en  $0,6 \times 10^6$  ha por año (Colombia DNP, 1992).

Cuáles son los efectos locales, regionales y globales sobre el clima del cambio de cobertura vegetal que ya ha ocurrido en las últimas décadas y que va a continuar extendiéndose? Las respuestas a estas preguntas no son fáciles ni directas. La variabilidad natural del clima dificulta la detección de los cambios atribuibles a la acción humana. Esto se ve agravado por lo corto de la longitud de los registros climáticos instrumentales. Pero no solamente hay dificultad a nivel de observación, también a nivel teórico; el clima es el prototipo del fenómeno físico impredecible y caótico. Sin embargo hay avances importantes para aportar en la respuesta a tales interrogantes y colaborar en la toma de decisiones asociada a estos problemas ambientales y climáticos.

Para ilustrar la cadena de interacciones desencadenada por la deforestación, sigamos el siguiente razonamiento energético, que es apenas uno de los problemas involucrados. El cambio de cobertura implica un cambio en el albedo superficial. El bosque húmedo tropical tiene un bajo albedo, reflejando apenas del orden del 12% de la radiación solar incidente (onda corta). Las tierras dedicadas al pastoreo y sobrepastoreo tienen albedos mucho más altos, del orden del 22%. Bajo iguales condiciones de insolación el bosque tiene más energía radiativa disponible. El equilibrio energético se logra mediante la emisión de radiación de onda larga (proporcional a la cuarta potencia de la temperatura), a la entrega de calor latente a la atmósfera por evapotranspiración y a la conducción de calor sensible a la atmósfera. La selva tropical se caracteriza por altas tasas de evapotranspiración, mientras que los pastos tienen menores tasas de evapotranspiración (relación 3 a 2 aproximadamente). La ecuación de balance energético por si sola no permite establecer cómo se distribuye entre las distintas componentes la disminución en la energía disponible producida por la deforestación, incluso alguna puede aumentar.

El cambio de cobertura trae consigo adicionalmente un cambio significativo en la rugosidad aerodinámica. La altura promedio de los árboles en la selva es de aproximadamente 35 metros mientras que los pastos y los potreros difícilmente tienen alturas superiores a los 35 cm. El efecto más importante de la rugosidad está sobre la turbulencia en la capa límite planetaria. La evaporación y el flujo de calor sensible son apreciablemente afectadas por la turbulencia. En general a mayor intensidad de la turbulencia mayores tasas de transporte de temperatura y humedad. También es necesario considerar el efecto de la rugosidad sobre la estabilidad vertical del aire húmedo, asunto de capital importancia para las lluvias. Para aire seco, si el gradiente vertical de temperatura ( $\Gamma = -\partial T / \partial z$ ) es menor que el gradiente adiabático seco ( $\Gamma_a = g/C_p \approx 9.8 \text{ }^\circ\text{Ckm}^{-1}$ ) se tiene estabilidad estática, es decir, si una parcela de aire se eleva artificialmente, permitiendo la igualación de presiones con el ambiente que la rodea, tendrá menor temperatura que el medio, será por lo tanto más densa y tenderá a retornar hacia abajo. Igualmente se muestra que para un desplazamiento hacia abajo tiende a retornar hacia arriba.

Para aire húmedo, el ascenso produce enfriamiento y eventual saturación y condensación. La condensación libera calor y por lo tanto la disminución de la temperatura con la altura para una parcela saturada es menor. En este caso la estabilidad vertical de la atmósfera se analiza considerando el gradiente adiabático saturado ( $\Gamma_s$ ) que es función de la temperatura y la presión (para aire cálido,  $\Gamma_s$  es del orden de  $4 \text{ }^\circ\text{Ckm}^{-1}$ ). Si el gradiente real de temperatura está entre el gradiente saturado y el seco, la situación es condicionalmente inestable, pues si se produce saturación mediante un ascenso forzado, el enfriamiento de la parcela seguiría la tasa adiabática saturada y eventualmente la temperatura de la parcela puede ser superior a la del ambiente. El nivel al cual ocurre se llama nivel de convección libre, pues de allí en adelante la parcela continua ascendiendo sin necesidad de suministro de energía. En la zona ecuatorial, el aire es condicionalmente inestable casi todo el tiempo durante buena parte del día. La convección requiere de un mecanismo inicial que suministre la energía para producir el ascenso del aire húmedo hasta el nivel de convección libre, además se requiere el suministro de humedad a nivel de superficie para mantener saturación. Los árboles en la selva tropical húmeda cumplen ambas funciones. La mayor rugosidad significa que el espesor de la capa límite será mayor, que hay una mejor mezcla al interior de la capa y que una parte mayor de la energía del flujo principal se gasta en vórtices y movimiento desordenado, incluyendo corrientes ascendentes. Las mayores

tasas de evapotranspiración son también fuente continua de humedad superficial. Este papel reciclador de humedad de la selva está bien establecido. Este análisis indica que en la zona ecuatorial la deforestación tiende a disminuir condiciones favorables para la precipitación.

Otro efecto importante de la vegetación tiene que ver con los suelos y el almacenamiento de agua. El bosque húmedo tropical es más eficiente para almacenar agua, las raíces de un pastizal difícilmente alcanzan a extraer agua por debajo de los 50 cm de suelo, mientras que las raíces de los árboles pueden penetrar varios metros. Simultáneamente los árboles mismos son muy buenos interceptores de las gotas de lluvia, pueden almacenar en las hojas y demás depresiones hasta el 12% de la precipitación, la evaporación de esta agua ayuda a reducir temperatura, pero lo que es más importante, protege el suelo del impacto de las gotas y su efecto erosivo. El suelo se protege además de la radiación solar directa. La gran cantidad de materia orgánica en descomposición produce una capa superficial bastante permeable, que favorece la infiltración. Mediciones muy detalladas en la Reserva Duke cerca a Manaus, muestran que la variación en humedad del suelo es bastante modulada en la selva amazónica, a pesar de los períodos secos y las lluvias (Molion, 1991). Este efecto es importante desde el punto de vista hidrológico, pues la escorrentía de las cuencas en cobertura de selva tropical tiende a ser más regulada, con mayores caudales mínimos y menores caudales máximos, en comparación con una cuenca deforestada.

Evidentemente la deforestación tiene impactos también sobre la química de la atmósfera, en particular sobre el ciclo del  $\text{CO}_2$  y del  $\text{O}_3$ . Estos efectos también pueden retroalimentar otras variables climáticas. También es claro el efecto sobre la diversidad ecológica y la desaparición de especies incluso no inventariadas y con posibles usos ignorados. El presente trabajo se concentra solamente en los aspectos climáticos.

Muchos de los cambios que hemos discutido pueden ser de magnitud o al contrario pasar desapercibidos por insignificantes. La extensión espacial de la deforestación, su ubicación y la geometría pueden ser factores importantes. En general, una deforestación marginal y de poca extensión puede tener un impacto pequeño que incluso puede ser absorbido y compensado por la dinámica misma del equilibrio climático. Por el contrario, un cambio sustancial en extensión

puede afectar no sólo el clima local sino también regiones vecinas, viento abajo, e incluso hasta la tierra entera. La deforestación de la selva amazónica, por su magnitud y su ubicación tiene clara incidencia sobre el clima colombiano. La razón está en la circulación predominante sobre Colombia con vientos del este, provenientes del Amazonas. La humedad proviene en gran medida del Atlántico y el Amazonas, aunque algún influjo del Caribe y del Pacífico también existe.

Teniendo en cuenta el anterior análisis se espera que la deforestación amazónica traiga sobre Colombia menores lluvias, más altas temperaturas y menor evapotranspiración. Sin embargo la argumentación es apenas cualitativa y requiere más firmeza y apoyo en observaciones.

El esfuerzo por cuantificar ha llevado al empleo de modelos de Circulación Global, conocidos como GCM por sus siglas en inglés, que resuelven las ecuaciones físicas que gobiernan el movimiento del aire y el agua en la atmósfera, considerando balance de energía, masa y fuerzas. Sin embargo, la complejidad del problema es tanta que hay que recurrir a algunas "parametrizaciones" de fenómenos físicos no describibles por las ecuaciones a las escalas y resoluciones de los modelos numéricos actuales en los computadores más grandes y veloces. En particular, la lluvia convectiva en los trópicos, la capa límite turbulenta, el efecto de la biosfera y el almacenamiento del agua en los suelos son los aspectos más débiles de estos supermodelos. Esto ha conducido a estimativos contradictorios del efecto de la deforestación (Shuttleworth et al, 1991; Nobre, 1991).

Hoy hay un gran esfuerzo por mejorar la representación de la hidrología en estos modelos (precipitación convectiva, interceptación, infiltración, evapotranspiración, capa límite atmosférica, escorrentía) desde varios frentes (Epstein y Ramírez, 1993; Shuttleworth et al, 1991). En particular el trabajo del Experimento Regional Micrometeorológico en el Amazonas, con cooperación Inglesa y Brasileña ha conducido a importantes avances tanto experimentales como a nivel de modelamiento, con el desarrollo del llamado (SIB) modelo simple de la biosfera que acoplado con un GCM ha producido resultados dramáticos sobre el impacto de la deforestación total del Amazonas sobre Colombia (Figura 1). De hecho, una disminución de aproximadamente 400 mm al año en la precipitación y de algo más en evaporación tendría un impacto trágico sobre

la economía y la sociedad.

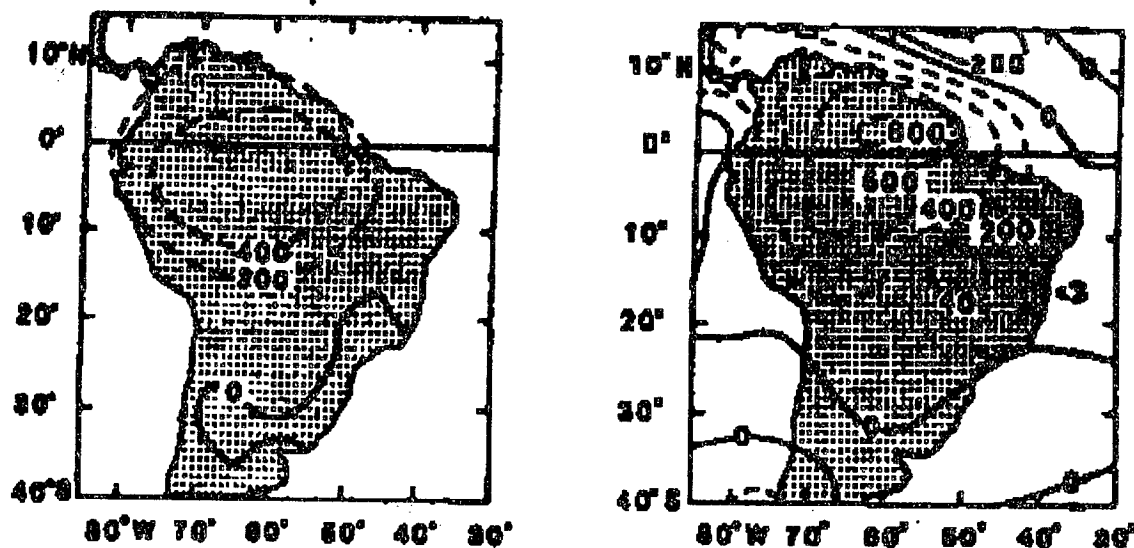


Figura 1. Disminución en mm de evaporación (izquierda) y precipitación (derecha) en la Amazonia a consecuencia de la deforestación según Shuttleworth y otros (1991).

### 3. CONCLUSIONES

Es claro que Colombia no puede seguir cruzada de brazos esperando que predicciones tan lúgubres se cumplan o no, sin estudios que permitan confirmar en que medida son ciertas o no estas predicciones, como nos afectaría regional y localmente y que permitan orientar las decisiones sobre posibles acciones correctivas y preventivas. Una lista parcial de conclusiones y propuestas es:

- Los mejores estudios indican que la deforestación tiene un impacto negativo sobre el clima: produce menor energía disponible para la biosfera, menor evapotranspiración, mayor temperatura, menores lluvias, menor escorrentía y con valores extremos más desfavorables.
- Los impactos negativos a largo plazo deben considerarse desde ya y reforzar las tareas reforestadoras y conservacionistas de los bosques.
- En particular hay que atacar las raíces sociales, culturales y económicas del problema de la colonización.

- El clima y los cambios climáticos en Colombia hay que investigarlos mucho más. Hoy Colombia no posee ni una sola escuela de meteorología. La gran mayoría de meteorólogos del Himat fueron formados académicamente en la antigua Unión Soviética, mediante becas que dejaron de existir. Los problemas que hay que enfrentar son muy complejos y requieren muchas personas bien calificadas en los distintos aspectos de la meteorología, la oceanografía y la hidrología.
- Desde ya se deben emprender investigaciones, tanto teóricas como numéricas y experimentales relacionadas con todos los aspectos climáticos y de cambio climático.

### REFERENCIAS

- Aceituno, P. 1988. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: Surface climate. *Monthly Weather Review*, 116, 3, 505-524.
- Brasil, INPE. 1989. *Avaliacao da cobertura florestal na Amazonia Legal utilizando sensoriamiento remoto orbital*. INPE, Sao Jose dos Campos, Brasil.
- Colombia, DNP. 1992. *Plan de acción forestal para Colombia*. DNP, Bogotá.
- Empresas Públicas de Medellín. 1993. Criticidad del período hidrológico de los últimos 3 años. *Boletín Hidrometeorológico*, vol 2:11-18.
- Epstein, D. and Ramírez, J. 1993. A statistical climate inversion scheme and its applications in hydrologic impact assesment studies associated with climate variability. in C.Y. Kuo (ed) *Engineering Hydrology*, ASCE.
- Glantz, M. H., R.K. Katz y N. Nicholls (eds.). 1991. *Teleconnections linking worldwide climate anomalies. Scientific basis and societal impacts*. Cambridge University Press. 535 p.
- Hastenrath, S. 1991. *Climate Dynamics of the Tropics*. Kluwer Academic Publishers. Boston. 488 p.
- Molion, L. C. B. 1991. Climate variability and its effects on Amazonian hydrology. IN: *Water Management of the Amazonian basin*. (Braga, B. y Fernández-Jauregui, eds.), UNESCO, pp.261-274.
- Nobre, C. A. 1991. Possible climatic impacts of Amazonia deforestation. IN: *Water Management of the Amazonian basin*. (Braga, B. y Fernández-Jauregui, eds.), UNESCO, pp. 245-260.
- Ortlieb, L. and J. Macharé (eds.). 1992. *Paleo-ENSO records international symposium*. International Symposium on Former ENSO phenomena in Western South America. Lima. ORSTOM & Instituto Geofísico del Perú. 333 p.
- Philander, S. G. H. 1990. *El Niño, La Niña and the Southern Oscillation*. Academic Press, 293 p.
- Poveda, G. y Mesa, O. 1993. Metodologías de predicción de la hidrología colombiana considerando el fenómeno de EL NIÑO/ oscilación del sur, ENOS. *Atmósfera*, 20:26-39, Sociedad Colombiana de Meteorología.
- Ramanathan, V. and Collins, W. 1991. Thermodynamics regulation of ocean warming by cirrus clouds deduced by observations of the 1987 El Niño. *Nature*, (351)27-32.
- Shuttleworth, J. A. et al. 1991. Post-Deforestation Amazonian climate: Anglo-Brasilian research to improve prediction. In: *Water Management of the Amazonian basin*. (Braga, B. y Fernández-Jauregui, eds.), UNESCO, pp. 275-288.
- UNESCO. 1991. *The disappearing tropical forest*. Paris.