

# EFECTOS HIDROLOGICOS DE LA DEFORESTACION

---

*Germán Poveda J. y Oscar J. Mesa S.  
Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos  
Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia,  
Medellín, Colombia*

## RESUMEN

La deforestación ocasiona fuertes perturbaciones en los ecosistemas y en el ciclo hidrológico. Hay posiciones que argumentan que la deforestación puede incrementar los caudales y por tanto ser benéfica para el aprovechamiento de los recursos hidráulicos. La posición contraria señala que las fuentes de agua se secan con la deforestación. Se presentan las evidencias teóricas y observacionales para mostrar los efectos de la deforestación sobre las componentes del ciclo hidrológico y en los balances de agua y energía. En particular se discuten los efectos de retro-alimentación entre los procesos de la interfaz tierra-atmósfera, y se demuestra que las pérdidas de agua por evapotranspiración son completamente indispensables para mantener en balance el régimen hidrológico. Se concluye que en general el efecto de la deforestación es reducir los caudales medios y aumentar los caudales extremos con los consecuentes efectos en inundaciones y sequías más fuertes y más frecuentes. Además, la deforestación induce aumentos de temperatura superficial, aumento de presión atmosférica, disminución en la humedad del suelo, disminución en la evapotranspiración, aumento del albedo, disminución de la rugosidad y del espesor de la capa límite atmosférica, disminución de la nubosidad y las lluvias en el mediano y en el largo plazo con la consecuente disminución de los caudales medios de los ríos. Este problema es fundamental para Colombia dada la situación de extinción del bosque tropical lluvioso de la cuenca Amazónica,

del Magdalena medio, como también la de los bosques de la costa Pacífica y del Darién. Se demuestran los efectos hidrológicos beneficios de la reforestación y se esboza un plan de investigación para cuantificar los efectos de la reforestación y el cambio climático sobre la hidro-climatología de Colombia.

## 1. INTRODUCCION

El agua es elemento fundamental para cualquier actividad humana. Los cambios en los suministros de agua que se dan como producto de acciones antrópicas tales como la deforestación pueden por tanto afectar de manera dramática sectores como el de agua potable, el energético y el agrícola.

El actual sistema de generación de electricidad en nuestro país tiene una componente hidráulica de aproximadamente el 75%. La circunstancia del racionamiento eléctrico de 1992 sirvió para que muchas voces clamaran por aumentar la componente térmica a toda costa. La falta de confiabilidad de los aportes hidrológicos se convirtió en un espanto. Sin embargo, Colombia tiene la ventaja natural de disponer de abundantes lluvias y topografía escarpada. Por lo tanto, no parece razonable desechar esta fuente por principio. La mezcla óptima debe ser producto de un análisis cuidadoso que incluya todas las perspectivas. La falta de visión y de apreciación de la hidrología han sido la norma en el sector eléctrico. La variabilidad se puede cuantificar, regular y predecir. A los cambios hay que anticiparse.

Hoy se dispone de herramientas más adecuadas para modelar la hidrología (Poveda & Mesa, 1995a; Mesa et al., 1994). Hay oscilaciones irregulares con período de 4 a 6 años asociadas al llamado fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). La falta de embalses de regulación multianual hace muy vulnerable el sistema a esas fluctuaciones. Los modelos hidrológicos hasta hoy usados por el sector eléctrico al ignorar estas

oscilaciones de baja frecuencia sobreestiman la confiabilidad energética del sistema. Esta situación llevó a que en la planeación de la expansión y de la operación se asumieran riesgos reales mayores que los calculados con los modelos, con consecuencias bien conocidas.

Otro fantasma que amenaza al sector eléctrico es el del cambio climático. Algunas de las series de aportes hidrológicos a los embalses muestran una clara tendencia decreciente en los últimos años. Aunque pueden haber distintas explicaciones para este comportamiento, es necesario estar alertas sobre el eventual impacto negativo de la deforestación y del llamado calentamiento global.

Uno de los temas de mayor relevancia dentro del debate acerca del cambio climático a escalas global, regional y local se refiere al impacto de la deforestación sobre el clima a tales escalas espaciales y en diferentes escalas de tiempo. Cerca de 200 000 km<sup>2</sup> de bosques tropicales se deforestan cada año (170 000 km<sup>2</sup>, según UNESCO, 1991), con el objeto de convertir las tierras en cultivos y/o para el pastoreo de ganado o para extracción de madera (Myers, 1989). Esto significa que cada año se está extinguiendo el 2,5% de la biomasa, lo que significa que de continuar a ese ritmo, para el próximo siglo se habrá exterminado los bosques tropicales que son soporte fundamental del clima de la tierra y que constituyen zonas de una complejidad y riqueza ecológica invaluable. Este problema es particularmente importante en las regiones tropicales donde existe el llamado bosque tropical lluvioso. Allí, los procesos hidrológicos que ocurren en la interfaz tierra-atmósfera tienen implicaciones fundamentales sobre el clima. El cambio de la cobertura vegetal tiene consecuencias sobre los ecosistemas y sobre todas las componentes del ciclo hidrológico con implicaciones dramáticas. En este trabajo examinamos en detalle los efectos que la deforestación produce sobre las componentes del ciclo hidrológico.

La presión de la colonización por nuevas tierras es un factor primordial para la deforestación en nuestro continente. Varias fuentes estiman la deforestación anual en la Amazonia Brasileña entre 3,0 y 4,5 millones de ha por año (Brasil, INPE, 1989). En Colombia se estima la deforestación en 0,6 millones de ha por año (Colombia, DNP, 1992). Es importante observar que la colonización no ha sido solución a los problemas

sociales que la han originado pues el ciclo de desalojo se repite por razones económicas y políticas. Otra observación crucial en este contexto es la carencia de alternativas tecnológicas para la explotación sostenible de los bosques húmedos y muy húmedos tropicales. El paquete tecnológico que tradicionalmente emplea la colonización es completamente inapropiado para el clima y los suelos predominantes. Para los estándares tradicionales los suelos que soportan la exuberancia de la selva tropical con su biodiversidad son suelos pobres o muy pobres. Claramente el desarrollo de una alternativa tecnológica adecuada es tal vez uno de los retos de mayor trascendencia para el siglo venidero.

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.

Además de la deforestación hay otras actividades humanas que pueden eventualmente modificar el clima y la hidrología. Entre ellas sobresale el llamado calentamiento global producto del aumento de la concentración de gases de efecto invernadero. Aunque la quema del material deforestado puede contribuir a este efecto, no se considera este problema por razones de espacio.

Sin embargo es conveniente anotar que en la discusión sobre el cambio climático global y el efecto invernadero hay posiciones muy serias (Ramanathan & 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

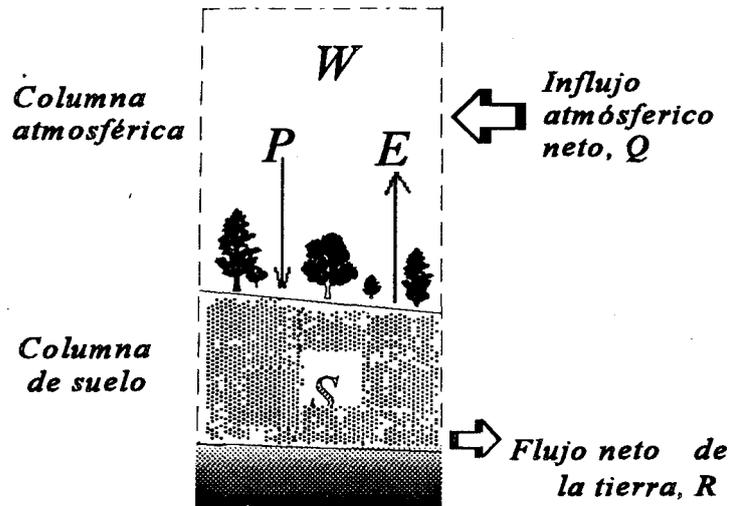


Figura 1. Conservación de la masa de agua en una columna del sistema suelo-atmósfera.

entonces una redistribución de la temperatura, produciendo eventos El Niño más frecuentes. Este tipo de análisis hace igualmente imperioso mantener la atención sobre el calentamiento global y sus efectos para Colombia.

## 2. BALANCES DE AGUA Y DE ENERGIA VS. DEFORESTACION: CONSECUENCIAS.

Existen importantes efectos de retro-alimentación general entre los procesos hidrológicos sobre tierra y la variabilidad climática. Múltiples estudios recientes así lo confirman: *Shukla & Mintz (1992)*, *Milly (1992)*, *Delworth & Manabe (1993)*, *Koster & Suarez (1995)*. Particularmente, este último sugiere mediante resultados de Modelos de Circulación General, que la variabilidad de la precipitación sobre tierra está dominada por los procesos que ocurren sobre la tierra por encima de los procesos que ocurren sobre el océano.

Para ilustrar los efectos de la deforestación sobre las variables hidro-meteorológicas, considerese la ecuación de conservación de masa dentro de una columna

de suelo-atmósfera, que bien podría ser una cuenca hidrográfica, una región o un continente (figura 1).

La ecuación de balance de agua para la atmósfera está dada por:

$$Q + E - P - \frac{dW}{dt} \quad (1)$$

La ecuación para la columna de suelo es

$$P - E - R - \frac{dS}{dt} \quad (2)$$

y la ecuación para la atmósfera y el suelo combinados es

$$Q - R - \frac{d(W + S)}{dt} \quad (3)$$

en donde  $W$  es el almacenamiento de agua en la atmósfera, la llamada agua precipitable, en unidades de longitud (volumen por unidad de área),  $S$  es el almacenamiento de agua en el suelo, también en unidades de longitud,  $P$  es la precipitación,  $E$  es la evaporación (incluye la transpiración),  $Q$  es el flujo neto de humedad en la atmósfera de agua, y  $R$  es el flujo de agua hacia afuera de la columna de suelo, constituida por la

escorrentía. Tanto  $P$ ,  $E$ ,  $Q$  como  $R$  están expresados en unidades de velocidad, es decir flujo o caudal por unidad de área. La atmósfera recibe humedad proveniente de la evapotranspiración, que se combina con el influjo de humedad para establecer el estado de humedad atmosférica,  $W$ . Este estado de humedad desencadena la precipitación,  $P$ , de regreso a tierra. Si llamamos  $u$  a la velocidad media del influjo de humedad a la columna atmosférica, es posible establecer la relación de precipitación reciclada (proveniente de la evapotranspiración interna) dentro de una región de escala horizontal  $L$ , como (Budyko, 1974, pag. 240)

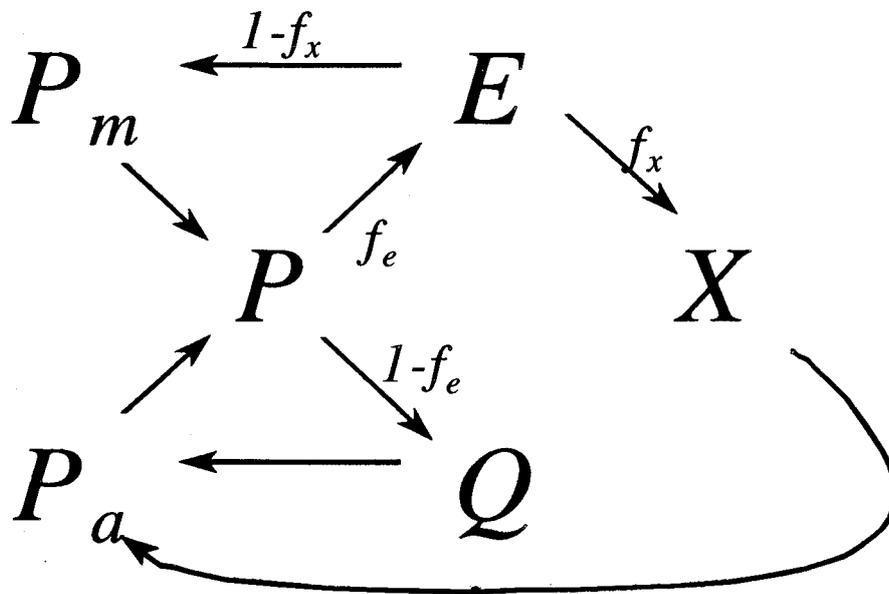
$$\frac{P_m}{P} = \frac{1}{1 + 2Wu/EL} \quad (4)$$

en donde  $P_m$  es la precipitación de agua que tiene origen en la evapotranspiración dentro de la misma columna. La relación ( $P_m/P$ ) en el bosque de la cuenca del Amazonas es del 50% (Shuttleworth, 1988). La ecuación (4) pone de presente que la precipitación es una función del estado de humedad del suelo, por la vía de la evapotranspiración. Así, una reducción de la evapotranspiración por causa de los cambios en la cobertura vegetal y deforestación se debe manifestar en una reducción en la precipitación sobre la región y en una alteración de la distribución espacio-temporal de la misma.

Para profundizar un poco más en las consecuencias de las ecuaciones (1) y (2) del balance de agua se considera la integración sobre un intervalo de tiempo largo (varias décadas), de tal manera que los cambios en las cantidades almacenadas  $W$  y  $S$  sean despreciables. En tal caso se tiene que el promedio de largo plazo del influjo atmosférico neto  $Q$  debe ser igual al promedio de largo plazo de la escorrentía neta,  $R$ , y que ambos son iguales a la diferencia entre los respectivos promedios de precipitación,  $P$ , y evaporación,  $E$ . Si se discrimina la precipitación entre la de origen local  $P_m$  y la que proviene de advección atmosférica  $P_a$  y además la evaporación la separamos mentalmente entre la humedad de origen local que se exporta  $X$  y la que se recicla o vuelve a caer como precipitación de origen local  $P_m$ , podemos interpretar el diagrama de la Figura 2 que representa las interrelaciones entre todas las componentes.

Como puede apreciarse, disminuciones en la evapotranspiración  $E$  significan en principio reducción en la precipitación reciclada  $P_m$  y en la humedad local exportada  $X$ . Esta última contribuye indirectamente a la precipitación advectiva. La cadena de cambios desencadenada se mueve hacia un nuevo equilibrio con menor precipitación y menor caudal. Sin embargo, este análisis es solamente a nivel de continuidad de agua y hace falta involucrar la continuidad de energía y de momentum en el razonamiento para tener una visión dinámica que permita hacer predicciones.

Para ilustrar la secuencia de interacciones desencadenada por la deforestación, sigamos el siguiente razonamiento energético, que como se dijo 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 sí 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. De hecho, la disminución en la evapotranspiración no sólo compensa la disminución en la energía radiativa disponible por aumento del albedo sino que lleva a que el balance se obtenga con aumento de la emisión de onda larga asociada a un aumento de temperatura superficial. Con la deforestación una mayor parte de la energía radiativa que viene del sol se gasta en calentamiento en vez de evaporación. Además, la deforestación produce cambios en la nubosidad y la humedad atmosférica como consecuencia de la disminución en la evaporación. Ambos cambios tienen repercusiones en el balance energético. A menor nubosidad se espera



**Figura 2.** Esquema de la interacción entre las distintas componentes del ciclo hidrológico en el largo plazo para una región.  $P$  es precipitación,  $E$  es evaporotranspiración,  $Q$  es influjo neto de humedad o escorrentía superficial,  $P_a$  es la precipitación de origen advectivo,  $P_m$  es la precipitación de origen local o reciclada y  $X$  es humedad de origen local que es exportada. Las flechas indican la contribución de otras componente para la conformación de cada variable. Las fracciones  $f_e$  y  $f_x$  representan la relación entre la evaporación y la precipitación, y la relación entre la humedad local exportada y la evaporación, respectivamente.

mayor cantidad de radiación solar alcanzando la superficie. Sin embargo la disminución en la humedad trae consigo una reducción en el efecto invernadero, lo que puede compensar el efecto anterior. *Ramanathan & Collins (1991)* estiman que estos dos factores se compensan en las zona tropical.

Para dar una idea de la magnitud de la energía asociada a la evaporotranspiración, considere que se requieren aproximadamente 100 000 kWh para una evaporación de 1400 mm sobre un área horizontal de 100 m<sup>2</sup>. Esto equivale a unas 20 veces la energía eléctrica que se consume en una casa típica en Colombia (con esa área) y donde la evaporación es de ese orden. La condensación del vapor de agua que forma la lluvia libera en la

media y alta troposfera gran cantidad de energía (el calor latente de evaporación y el de condensación son iguales). En Colombia la precipitación es aproximadamente el doble de la evaporación, y ambas ocurren sobre todo el área del país. Es decir que por efecto del área hay que multiplicar la cifra anterior por un factor de 10<sup>10</sup>.

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. 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 las 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 Manaos, 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.

Además de lo ya dicho, la remoción de la capa protectora del bosque expone los suelos a la intensidad de la lluvia tropical aumentando muy fuertemente la ero-

sión, no sólo laminar sino también aquella proveniente de movimientos en masa. Desde el punto de vista ambiental es claro que este tipo de impactos son negativos, más aún en cuencas hidrográficas que aportan a embalses destinados a la regulación de caudales. El incremento en las tasas de erosión reduce la vida y la capacidad útil de los embalses, con los consecuentes efectos adversos para el aprovechamiento del recurso hídrico de todo propósito.

Evidentemente la deforestación tiene impactos también sobre la química de la atmósfera, en particular sobre el ciclo del CO<sub>2</sub> y del O<sub>3</sub>. 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 alteración de la cubierta vegetal en las regiones tropicales a gran escala puede producir efectos no despreciables en los climas regionales. (Henderson-Sellers & Gornitz, 1984). Recientes estudios de modelación de la dinámica del clima a gran escala demuestran la importancia de los procesos hidrológicos sobre tierra sobre las condiciones atmosféricas, en particular sobre bosques tropicales lluviosos como en la Amazonia (Dickinson & Henderson-Sellers, 1988; Dickinson, 1989; Shukla et al., 1990; Gash & Shuttleworth, 1991; Elthair & Bras, 1993).

### 3. EVIDENCIAS OBSERVACIONALES Y RESULTADOS DE MODELOS SOBRE LOS EFECTOS DE LA DEFORESTACIÓN

A nivel local se ha demostrado que existe un vínculo entre la deforestación y la disminución en los regímenes de lluvia. Aunque algunos autores sostienen que no existe una conexión entre tales fenómenos (*Pereira, 1973; Lee, 1978; Lockwood, 1980; Thompson, 1980; Newson & Calder, 1989*), la evidencia observacional demuestra lo contrario. En el área del Canal de Panamá se ha detectado una disminución entre 6,1 y 9,6 mm/año en las lluvias de regiones sometidas a deforestación desde principios del siglo (*Windsor et al., 1986*). Situaciones similares se han reportado en Costa de Marfil (*Myers, 1989*), en varias regiones de la India (*Meher-Hojmi, 1985*) y en China (*Zhang, 1986*). En algunas regiones de Malasia se ha encontrado no sólo una disminución de la lluvia asociada a la disminución de los bosques, sino que se ha modificado su distribución espacio-temporal (*Chan, 1986*).

Los estudios más completos demuestran que la precipitación de origen recirculado dentro de la cuenca del Amazonas es del orden del 50% (*Molion, 1975*), que se origina en la evapotranspiración del bosque mismo. Este resultado sugiere que el bosque juega un papel fundamental para proporcionar su propia lluvia. De otra parte, es difícil extrapolar a partir de este dato sobre los cambios podrían esperarse por la remoción del bosque. Un cambio de gran escala en el uso de la tierra de bosque tropical lluvioso a cultivos bajos, reduce la evapotranspiración y, consecuentemente, la precipitación local. Los llamados Modelos de Circulación General (MCG) han sido usados para tratar de determinar los efectos de la deforestación sobre el clima de la cuenca del Amazonas (*Dickinson & Henderson-Sellers, 1988; Lean & Warilow, 1989; Shukla et al., 1990*). Los resultados sugieren una reducción entre el 20% al 30% en la precipitación sobre la cuenca (con reducciones de hasta 400 mm por año en la zona de Colombia). También se encontraron reducciones de hasta el 50% en la evapotranspiración en áreas de gran pluviosidad. Y la escorrentía superficial mostró reducciones entre el 10% y el 20% para la cuenca. Los resultados de estos MCG también indican que se pueden presentar cambios importantes en la distribución espacio-temporal de las variables hidrológicas y un

incremento en la duración de la temporada de bajas lluvias. Además, se detectan posibles reducciones en la infiltración debidas a compactación del suelo y una disminución en la disponibilidad de agua para los cultivos (*Molion, 1991*). Otros resultados de estos modelos indican un posible aumento de la temperatura superficial de 1 a 3 C para el caso deforestado, lo cual es consistente con la reducción de la evapotranspiración y con una menor rugosidad superficial, que hace menos turbulento el mezcaldado en la capa límite. También se identifican posibles cambios en cuanto a: reducción de la radiación solar en la superficie, incremento del albedo, aumento en la radiación de onda larga emergente debida a la mayor temperatura y una menor relación de Bowen (*Nobre, 1991*).

En el trabajo de *Nobre (1991)* se presentan los resultados de varios MCG aplicados al examen de los efectos de la deforestación sobre la cuenca del Amazonas, para el nivel local, regional y global. Los resultados pueden sintetizarse así:

- a) Cambios a nivel local: Reducción en la evapotranspiración (10-20%), reducción en la precipitación (10%), disminución en la longitud de la rugosidad superficial (del orden de 30-35 m), pérdida de la materia orgánica de la parte superior del suelo y de su fauna, compactación debida a prácticas agrícolas y sobrepastoreo, y la erosión del suelo que puede producir grandes cambios en las características físicas y químicas de los suelos Amazónicos. Estos cambios se combinarían para reducir drásticamente las tasas de infiltración, aumentar el caudal durante los períodos lluviosos y disminuir la humedad del suelo en la zona radicular principalmente durante las épocas de poca lluvia. La disminución en la humedad del suelo también contribuiría a reducir la evapotranspiración.
- b) Cambios a nivel regional: Incremento de la temperatura superficial y del suelo, aumento en las fluctuaciones diurnas de la temperatura, reducción en la evapotranspiración, reducción en la precipitación y en la humedad de la capa límite atmosférica, disminución en los caudales y en la escorrentía. Es probable que los caudales pico en los períodos de fuertes lluvias se incrementen y se disminuyan durante la estación seca. Los cambios

en los regímenes de precipitación al este de la cordillera de los Andes podrían tener profundos efectos sobre la diversidad de especies biológicas, particularmente en la Amazonia Colombiana, la región con la mayor diversidad biológica en el mundo.

- c) Cambios a nivel global: las alteraciones más fuertes estarían asociadas a los cambios que la perturbación en los campos de precipitación produciría en la liberación de calor latente de condensación en las nubes convectivas del trópico, perturbando la circulación atmosférica en las celdas de Hadley y de Walker. Tales alteraciones perturbarían tremendamente el transporte de calor de los trópicos hacia mayores latitudes.

El aspecto más importante de retroalimentación de la tierra a la atmósfera es la partición de la radiación solar incidente entre calor sensible y calor latente. Esta partición es controlada por la evapotranspiración superficial en una forma compleja.

*Lal (1981, 1987) y Salati et al. (1983)* reportan que después de la remoción de bosque las tasas de infiltración disminuyen. Esto coincide con la reducción de caudales que concluye el trabajo de *Eagleson (1978)*. Al respecto anota que ... se demuestra que el rendimiento de cuencas naturales se reduce en ausencia de vegetación como consecuencia de la disminución en la humedad promedio del suelo. Esto tiene implicaciones para el estudio de la deforestación y el sobrepastoreo. El rendimiento lo define como la suma de dos componentes del balance de agua: la escorrentía superficial y la escorrentía subterránea.

El trabajo de *Durbidge & Henderson-Sellers (1993)* reporta alteraciones importantes en la circulación atmosférica de las llamadas celdas de Walker y de Hadley por efectos de deforestación de los bosques tropicales, usando resultados de una versión actualizada del modelo CCM1 (Climate Community Model 1) del National Center for Atmospheric Research (NCAR). El modelo es capaz de simular el ciclo anual, estacional y diurno. Los resultados son coherentes con una reducción del ascenso vertical sobre las regiones deforestadas causado por la reducción en la evaporación y por la disminución en los intercambios turbulentos, a su vez causados por la disminución en la altura

del bosque y la longitud de la rugosidad de la vegetación. Como se sabe, una alteración de la circulación en la celda de Hadley en tal dirección tendría consecuencias en el sentido de disminuir la convección sobre los trópicos de las Américas y por tanto menor ascenso de aire húmedo y menor cantidad de precipitación. En este trabajo además se sugieren posibles teleconexiones entre las regiones deforestadas del Amazonas y del Sudeste asiático.

*Polcher & Laval (1993)* presentan resultados de un modelo de circulación general (LMD-GCM) acoplado a un modelo de vegetación (SECHIBA), para estudiar el impacto de la deforestación en bosques tropicales lluviosos sobre el clima, en un período de integración de 11 años. Los resultados muestran reducciones importantes tanto en la precipitación, como en la evaporación y en la convergencia de humedad para los bosques de la Amazonia, el sudeste asiático y África. En particular, los análisis encuentran una alta significancia estadística en la reducción de la evaporación. Además encuentran muy poco cambio en la temperatura debido al efecto combinado del aumento del albedo que reduce la energía disponible en la superficie, pero al reducir la evaporación se disminuye la cantidad de energía suministrada a la atmósfera. Así, el cambio en la temperatura sobre tierra está gobernado por estos dos efectos en competencia; el incremento de la energía disponible por haber una menor evaporación es cancelado por el incremento en el albedo.

*Gentry & Parody (1980)* reportan un aumento en el nivel de la cresta de la creciente para el río Amazonas en Iquitos para el período 1970-78, y lo atribuyeron al efecto de la deforestación en la parte alta de la cuenca al no notar cambios en las lluvias. *Nordin & Meade (1982)* discuten este resultado al encontrar que en el río Negro en Manaus, las crecientes oscilaron entre altas durante el período 1942 - 56, a bajas durante 1957-69 y de nuevo a bajas durante 1970-79. Es claro que el período inicial de altas no puede ser asociado con deforestación de gran escala.

La remoción de la vegetación natural puede afectar los balances de agua y energía al alterar cualquiera de los siguientes componentes (*Molion, 1976*):

- a) Concentración de vapor de agua: Es plenamente establecido que la superficie forestada suministra

más vapor de agua al aire que el suelo pelado o que cultivos no irrigados. El transporte vertical de vapor de agua sobre el bosque es distinto de otras superficies debido a diferencias en la estructura de los flujos de aire. La remoción de los bosques puede reducir la concentración de vapor de agua, decreciendo la cantidad de radiación solar dispersada y absorbida en la columna atmosférica.

- b) **Concentración y naturaleza de los aerosoles:** Sobre el bosque, los tipos de aerosoles predominantes son aquellos producto de reacciones fotoquímicas y de reacciones de gases homogéneos entre los hidrocarburos emitidos por las plantas. El crecimiento del aerosol depende de la humedad relativa del aire. Aun si no hay cambio en la concentración de vapor de agua en la columna de aire, la destrucción de la cubierta protectora de la canopia causará cambios en la temperatura superficial, en la turbulencia y en el perfil de velocidades en la capa límite y consecuentemente en el perfil de humedad. Los cambios en la naturaleza, cantidad y tamaño de los aerosoles influyen la dispersión y absorción de la atmósfera y por lo tanto la cantidad de radiación solar que alcanza la superficie.
- c) **Nubosidad:** La cantidad de radiación de onda corta reflejada, absorbida y transmitida por las nubes depende del tipo de nube y del contenido y distribución del agua líquida. Bernard (1953) sugiere que la deforestación del bosque local podría inducir inestabilidad y convergencia, y aumentar la nubosidad. De otra parte, una posible reducción de la evapotranspiración y de la rugosidad aerodinámica superficial puede disminuir el flujo vertical de vapor de agua, disminuyendo por tanto la nubosidad.
- d) **Albedo:** Los bosques tienen un menor albedo que campos de cultivos o suelo. Por tanto, la deforestación aumenta el albedo superficial, que contribuye a disminuir la radiación solar absorbida por la tierra.
- e) **Evapotranspiración:** Se concluye que se reduce por reducción de la potencia difusiva y de la humedad del suelo.

f) **Advección neta de agua precipitable:** Posibles cambios debidos a cambios en la velocidad del viento por reducción de la rugosidad superficial y por cambios en el contenido de humedad en la atmósfera.

g) **Precipitación:** Reducción de la lluvia media anual y cambios en la distribución espacial.

h) **Humedad del suelo y tiempo de retención:** La deforestación reduce el nivel y el tiempo de retención de la humedad en el suelo.

i) **Efectos en los flujos de energía:**

**Energía que llega al suelo:** Después que se remueve la canopia, el suelo estará expuesto a la radiación solar. Aunque el albedo se incrementa, la energía que llega al suelo es mayor que la del piso con bosque.

**Emisión de radiación de onda larga en la superficie (ROL):** Esta se expresa mediante la ley de Stefan-Boltzman:

$$ROL = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (5)$$

La emisividad,  $\epsilon$ , de las plantas es alrededor de 0.97 mientras que para los suelos está entre 0.9 (arena seca) y 0.98 (suelo húmedo). La deforestación cambia el tipo de superficie y la cantidad y el tipo de nubosidad afectando la radiación de onda larga.

**Radiación atmosférica:** Esta depende de la absorptividad (emisividad) y de la temperatura absoluta de las capas de la atmósfera. Es común encontrar que para un contenido de agua precipitable normal de 14.25mm, los primeros 100 m sobre la superficie contribuyen en un 90% de la contraradiación que llega a la superficie. El agua precipitable promedio en la cuenca del Amazonas es tres veces ese valor. Si la remoción de los árboles disminuye la evapotranspiración y la mezcla vertical, los primeros 100 m serán más secos y la contra-radiación será reducida. Además, al cambiar la nubosidad, el CO<sub>2</sub> y la concentración de aerosoles también se afecta el flujo de contraradiación.

**Flujo de calor convectivo:** La deforestación incrementa la cantidad de energía solar que alcanza la superficie.

Como la evaporación se reduce, se aumenta la participación de calor convectivo, por repartición de energía entre calor latente y calor sensible. Así, se incrementa la transferencia de calor sensible hacia la atmósfera.

En resumen, la deforestación altera la magnitud y distribución de los flujos de la ecuación de balance de energía.

## DISCUSION Y 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 qué medida son ciertas o no estas predicciones, y como nos afectaría regional y localmente, de manera 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 y los ecosistemas: 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 relacio-

nadas con todos los aspectos climáticos y de cambio climático.

- Es necesario iniciar esfuerzos serios de instrumentación tanto en parcelas con bosque natural como en parcelas deforestadas y en predios reforestados. Las variables por medir deben incluir todas las variables aerodinámicas registradas a diversas alturas sobre torres (temperatura, humedad, velocidad de viento y radiación), así como las hidrológicas (precipitación, interceptación, evaporación desde lisímetros, humedad del suelo a diversas profundidades, escorrentía y producción de sedimentos). Además la zona de estudio debe quedar cerca de un sitio de medición de variables meteorológicas mediante sondeos. El Chocó es un candidato excepcional pues la sola instrumentación meteorológica aporta información valiosa para el conocimiento de la dinámica del clima no sólo del occidente de Colombia, sino del resto del país, el trópico del hemisferio occidental y el globo entero (ver *Poveda y Mesa, 1995a y b*).
- El problema de cambio climático es un asunto de vital importancia para el futuro de Colombia. El país no puede demorarse más tiempo en comenzar a estudiar seriamente los posibles impactos sobre su situación hidro-meteorológica. Casi todos los sectores productivos del país se verán afectados por tales consecuencias; para mencionar unos pocos basta pensar en los sectores de generación de energía eléctrica, el sector agrícola y ganadero y los programas de irrigación, el suministro de agua potable para consumos humano, industrial y comercial, todo lo referente a riesgos naturales por crecientes, inundaciones, deslizamientos, y todo lo que tiene que ver con aprovechamiento del recurso hídrico. Esto requiere inversiones en formación de recurso humano en áreas como climatología, hidrología, meteorología, oceanografía. Además debe pensarse en consolidar y reforzar la red de estaciones de medición de todas las variables climáticas e hidrológicas de importancia, con énfasis en la calidad de la información. Además, hay que aprovechar todos los recursos tecnológicos disponibles internacionalmente, radares, lidars, medidores de viento vertical, como fotos e imágenes de satélites en tiempo real, consultas en bases de datos en redes electrónicas internacionales, e inserción dentro de

la comunidad científica internacional que está trabajando en el problema del cambio climático. Es indispensable elaborar una base de datos hidro-climáticos de libre acceso para la consulta por todos los sectores interesados, que permitan efectuar análisis de diagnóstico para propósitos de predicción a distintas escalas de tiempo y de espacio. Hace falta un estudio comprensivo del cambio climático usando toda la información disponible. Los beneficios que se obtendrían serían varios órdenes de magnitud mayores que las inversiones que estas acciones requerirían.

## REFERENCIAS

- Brasil, INPE, *Avaliacao da cobertura florestal na Amazonia Legal utilizando sensoriamiento remoto orbital*. INPE, Sao Jose dos Campos, Brasil, 1989.
- Budyko, M. I., *Climate and Life*. Academic Press, New York, 241 p., 1974.
- Chan, N. W., Drought trends in northwestern peninsular Malaysia: Is less rain falling?, *Wallaceana*, 44, 8-9, 1986.
- Colombia, DNP. *Plan de acción forestal para Colombia*. DNP, Bogotá, 1992.
- Delworth, T. & S. Manabe, Climate variability and land-surface processes. *Adv. Water Res.*, 16, 3-20, 1993.
- Dickinson, R. E., Implications of tropical deforestation for climate: a comparison of model and observational descriptions of surface energy and hydrological balance, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 324, 423-431, 1989.
- Durbidge, T. B. & Henderson-Sellers, A. Large-scale hydrological responses to tropical deforestation. In: *Macroscales Modelling of the Hydrosphere* (Ed. W. B. Wilkinson), IAHS Publ. 214, 103-112, 1993.
- Elthair, E. A. B., & R. Bras, Precipitation recycling in the Amazon basin, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 120, 861-880, 1994.
- Elthair, E. A. B., & R. Bras, On the response of the tropical atmosphere to large-scale deforestation, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 119, 779-793, 1993.
- Gash, J. H. C., & W. J. Shuttleworth, tropical deforestation: albedo and the surface-energy balance, *Clim. Change*, 19, 123-133, 1991.
- Gentry, A. H. & J. L. Parody, Deforestation and increased flooding of the upper Amazon, *Science*, 210, 1354-1356. 1980.
- Johnson, K.D., Entekhabi, D. & P.S. Eagleson, The implementation and validation of improved land-surface hydrology in an atmospheric general circulation model. *J. Climate*, 6, 1009-1026, 1993.
- Koster, R. D. & M. J. Suárez. The relative contributions of land and ocean processes to precipitation variability: Summary of a GCM study. Submitted to *Jour. Geoph. Res.*, 1994.
- Lal, R. Deforestation of tropical rainforest and hydrological problems. In: *Tropical agricultural hydrology - Watershed management and land use* (Ed. R. Lal & E. D. Russel), New York, John Wiley and Sons, 1981.
- Lee, R. *Forest Microclimatology*. Columbia University Press, New York, 1973.
- Mesa, O. J., G. Poveda, L. F. Carvajal & L. E. Salazar, "Influencia de variables macro-climáticas en la hidrología Colombiana", *Boletín Hidrometeorológico de Empresas Públicas de Medellín*, 3, 25-58, 1994.
- Lockwood, J. G. Some problems of humid equatorial climates. *Malaysian Journal of Tropical Geography*, 1, 12-20.

- Meher-Hojmi, V. M. Disasters of deforestation: Desertification or deluge? En: *Proceedings of the Conference on Forest Resource Crisis in the Third World*, Ed. Sahabat Alam Malaysia, Penang, Malaysia, 131-143, 1985.
- Molion, L.C. B. A climatonic study of the energy and moisture fluxes of Amazonas basin with consideration of deforestation effects. Ph. D. Thesis, University of Wisconsin, Madison, WI, USA, 1975.
- Molion, L. C. B. A climatonic study of the energy and moisture fluxes of the Amazonas basin with considerations of deforestation effects. Report No. 923-TPT/035, INPE, So Paulo, Brasil. 1976.
- Molion, L. C. B. Climate variability and its effects on Amazonian hydrology. En: *Water Management of the Amazon Basin*, (Braga, B. P.F. & C. A. Fernández-Jauregui, eds. ), Unesco, Montevideo, Uruguay, 261-269. 1991.
- Myers, N. Tropical Deforestation and climatic change. En: *Climate and Geo-Sciences (A. Berger et al., eds.)*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 341-353, 1989.
- Newson, M.D. & I. R. Calder, forests and water resources: problems of prediction on a regional scale. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 324, 283-298. 1989.
- Nobre, C. A. Possible climatic impacts of Amazonia deforestation. En: *Water Management of the Amazon Basin*, (Braga, B. P.F. & C. A. Fernández-Jauregui, eds. ), Unesco, Montevideo, Uruguay, 245-260, 1991.
- Nobre, C., P. J. Sellers, & J. Shukla, Amazonian deforestation and regional climate change. *J. Climate*, 4, 957-988.
- Nordin, C. F. & I. H. Meade, Deforestation and increased flooding of the upper Amazon. *Science*, 215, 426-427.
- Pereira, H. C. *Land use and water resources in temperate and tropical climates*. Cambridge University Press, Cambridge, Mass., U.S.A., 1973.
- Poveda, G. & O. J. Mesa, Las fases extremas del fenómeno ENSO-El Niño y La Niña- y su influencia sobre la hidrología de Colombia. En imprenta en *Ingeniería Hidráulica en México*. 1995a.
- Poveda, G. & O. J. Mesa, Feedbacks between large-scale oceanic-atmospheric phenomena and the hydrology of tropical South America. *Sometido a Water Res. Res.* 1995b.
- Ramanathan, V., & W. Collins, Thermodynamics regulation of ocean warming by cirrus clouds deduced by observations of the 1987 El Niño. *Nature*, (351)27-32, 1991.
- Salati, E., Lovejoy, T. E. & P. B. Vose, Precipitation and water recycling in tropical rainforests. *Environmentalist*, 3, 67-74, 1983.
- Shukla, J. & Y. Mintz, Influence of land-surface evapotranspiration on the Earth's climate, *Science*, 215, 1498-1500, 1992.
- Shukla, J., C. A. Nobre, & P. Sellers, Amazon deforestation and climate change, *Science*, 247, 1322-1325, 1990.
- Shuttleworth, W. J., Evaporation from Amazonian rainforest, *Philos. Trans. R. Soc. London, B*, 233, 321-346, 1988.
- Thompson, K. Forests and climate change in America: Some early views, *Climatic Change*, 3, 47-64, 1980.
- Windsor, D. M., A. S. Rand, & W. M. Rand. *Variations in rainfall on Barro Colorado Island*. Smithsonian Tropical Research Institute, Balboa, Panamá. 1986.
- Zhang, K. The influence of deforestation of tropical rainforest on local climate and disaster in Xishuangbanna region of China. *Climatological Notes*, 35, 223-236, 1986.