

DINÁMICA ECOHIDROLÓGICA EN UNA SELVA NUBLADA ANDINA VENEZOLANA

ECOHIDROLOGICAL DYNAMICS OF AN ANDEAN CLOUD FOREST OF VENEZUELA

Enrique Pacheco Graf¹ y Michele Ataroff²

¹Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, e ²Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE), Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. epacheco@ula.ve, ataroff@ula.ve

RESUMEN

Como parte de un programa general de la Red Interamericana de Cooperación Andes y Sabanas (RICAS-IAI), se realizó un estudio detallado de la dinámica hídrica en la selva nublada de La Mucuy (8°38'N, 71°02'W), estado Mérida, Venezuela, a 2300msnm, mediante el registro de los principales flujos aéreos cada 10min y cada 15min de los subterráneos. Para el lapso abril 2001-febrero 2002, la precipitación total fue de 3018mm, la precipitación vertical (Pv) 2678mm (Pv: 88,7%), la precipitación horizontal (Ph) 340mm (Ph: 11,3%), precipitación neta (Pn) 1552 (Pn: 51,4%), escurrimiento (Es) 19mm (Es: 0,63%), lámina infiltrada a 10cm 1313mm (43,50%) y lámina percolada a 90cm 869mm (28,8%). Se observaron importantes diferencias y establecieron relaciones en cuanto a las respuestas del sistema a eventos Pv con diferentes intensidades agrupados en las siguientes categorías: 0-2, 2-5, 5-10, 10-20, y >20mm h⁻¹. La proporción interceptada por el dosel disminuyó con el aumento intensidad (*i*) de las precipitaciones (Pv) de 23% con *i*>20mm h⁻¹, y 50% con *i* 0-2mm h⁻¹, al contrario de la percolación la cual aumentó con la intensidad de las precipitaciones en las tres profundidades medidas, llegando a ser >50% a 90cm para eventos con intensidades >10mm h⁻¹. Durante el estudio, el máximo de días continuos sin lluvia fue 5 (febrero 2002) y sin neblina interceptada fue 4 (enero 2002). La captación de neblina con dos instrumentos distintos (Standard Fog Collector –SFC-, y Louvered Screen Fog Collector -LSFC) mostró diferencias en las medidas entre 12 y 33% dependiendo de los montos y de la ocurrencia simultánea o no de lluvia y neblina. El estudio aporta al conocimiento del funcionamiento ecohidrológico del sistema, básico para la elaboración de planes de manejo de cuencas y su aprovechamiento hidráulico, así como referencia ante los efectos que eventuales cambios climáticos locales y globales pudiesen generar.

ABSTRACT

This study is part of a broader program related to effects of climatic change in the dynamics of tropical mountain and savanna ecosystems (Red Interamericana de Cooperación Andes y Sabanas, RICAS). We conducted a detailed study of the main water fluxes of a cloud forest over a period of 11 months, at La Mucuy, Mérida State, Venezuela, at 2300m (8°38'N, 71°02'W). This study implied direct measurements by recording precipitation and runoff within 10 min intervals, and infiltration and percolation within 15min intervals. For the period (April 2001-February 2002), the total water input was 3018 mm, of which vertical rainfall accounted for 2678mm (88.7%), and horizontal rainfall for 340mm (11.3%); net precipitation was 1552mm (51.4%); overland runoff was 19mm (0.63%). Infiltration at 10 cm depth was 1313 mm (43.5%), and drainage at 90cm was 869mm (28.8%). Important differences were observed in terms of hydrological responses of the ecosystem at various rainfall intensities which were grouped in the following categories: 0-2, 2-5, 5-10, 10-20, y >20mm h⁻¹. The fraction intercepted by the canopy decreased with rainfall increase from 50% with *i*=0-2mm h⁻¹ to 23% with *i*>20mm h⁻¹. Conversely, percolation increased with precipitation at all depths (10, 30, 60 and 90 cm), reaching >50% at 90cm for events with *i*>10mm h⁻¹. Maximum number of days without rain were five (in February 2002), and without fog interception were only four (in January 2002). A comparison between the two fog interception measurement devices used, Standard Fog Collector (SFC), and Louvered Screen Fog Collector (LSFC), showed differences between 12 and 33% depending upon the magnitude and simultaneous occurrence of rain and fog events. The study provides important information about the ecohydrological functioning of this ecosystem, essential for the elaboration of watershed management plans and water resource systems planning, as well as for possible scenarios of future local and global climatic change.

INTRODUCCIÓN

El estudio, planificación y manejo sustentable de cuencas hidrográficas implica el conocimiento

integral de sus componentes socioambientales. De estos, es fundamental la ecohidrología del sistema,

definida como la interrelación entre el ciclo hidrológico y ecosistemas terrestres (Rodríguez-Iturbe *et al.* 2001).

Entre los sistemas naturales comúnmente asociados a zonas montañosas tropicales productoras de agua, destaca, por su alta eficiencia y regulación hidrológica, cobertura antierosiva de suelos, y biodiversidad, la selva nublada (Weaver 1972, Zadroga 1981, Hamilton *et al.* 1995, Bruijnzeel y Hamilton 2000, Ataroff y Rada 2000, Bruijnzeel 2001, Kappelle y Brown 2001). Sin embargo, su transformación, reducción, y fragmentación, así como la creciente demanda sobre sus recursos y servicios ambientales, como el agua (Bruijnzeel 1990, Hamilton *et al.* 1995, Ataroff 1998, Bruijnzeel 2000), compromete su aprovechamiento sustentable. Esta situación puede hacerse aún más crítica si se consideran los posibles efectos generados por cambios climáticos globales y locales (van Dam 1999). En el caso de Venezuela, los estudios relativos son escasos (Steinhardt 1979, Cavelier y Goldstein 1989, Ataroff 1998, Ataroff y Rada 2000, Ataroff 2002).

Como parte de un estudio general patrocinado por la Red Interamericana de Cooperación Andes Sabanas (RICAS) financiada por el Inter-American Institute for Global Change Research (IAI), se realizó un estudio ecohidrológico en una selva nublada ubicada en Los Andes Venezolanos, mediante medición continua y simultánea de los principales flujos hídricos asociados a eventos de precipitación interrelacionados al sistema.

Los resultados obtenidos, se espera contribuyan al conocimiento en la materia, factor indispensable para el diseño e implementación de políticas, programas, y proyectos orientados al manejo sustentable de cuencas hidrográficas en la región andina venezolana.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de trabajo se encuentra en La Mucuy (8°38'N 71°02'W) a 2320m de altitud en el Parque Nacional Sierra Nevada, y a 12km de la ciudad de Mérida, estado Mérida, Venezuela. La litología del área corresponde al grupo Iglesias, caracterizada por gneises, esquistos micaceos y anfíbolitas del Precámbrico (Kovisar 1972). El área presenta altas pendientes, entre 40 y 80%, con posición de



Figura 1: Selva nublada de La Mucuy, Parque Nacional Sierra Nevada, Andes de Venezuela. Foto: P.J. Soriano.

ladera, orientada en sentido NO. La precipitación anual es de entre 2800 y 3300mm con distribución bimodal, presentando picos de precipitación para los meses de mayo y octubre, sin períodos climáticamente secos, con temperatura media anual de 14°C, siendo el factor ecológico más importante la nubosidad diaria existente la mayor parte del año (Ataroff y Rada 2000). Los suelos del orden de los entisoles (Psamments udipsamments) presentan 3 horizontes bien definidos, de textura franco arenosa, con un mayor contenido de materia orgánica en el horizonte A1 (W. Franco y L. Lugo, comunicación personal).

La cobertura vegetal (figura 1) corresponde a selva nublada montano alta andina (Ataroff 2001) o bosque muy húmedo montano alto (Ewel *et al.* 1968), y se caracteriza por una alta diversidad de especies, con más de 50 especies arbóreas por hectárea, con una altura media de 25m, entre las que destacan; *Guetarda steyermarkii*, *Clusia multiflora*, *Oreopanax moritzii*, *Sapium stylare*,

Billia columbiana y *Laplacea fruticosa*. Además 20 spp. de trepadoras, 40 spp. de epífitas vasculares, entre las que destacan; *Tillandsia complanata*, *T. biflora*, *Racinea tetrantha*, *Oncidium falcipetalum*, *Epidendrum dendrobii*, y *Peperomia microphyla* (Lamprecht 1954, Ataroff y Rada 2000).

MATERIALES Y MÉTODOS

En la selva, se delimitó una parcela para la medición de precipitación neta, lámina de escurrimiento (superficial), precipitación horizontal (neblina y rocío), lámina de infiltración a 10cm, y lámina de percolación a 30, 60 y 90cm de profundidad.

La precipitación vertical (lluvia, Pv) se midió en un pastizal abierto ubicado a 500m de la parcela, sobre la misma ladera, con un pluviómetro Texas Electronics TE525-L con capacidad mínima de registro de 0,254mm y hasta 18mm min⁻¹, conectado a datalogger Cambell CRX10.

Para la precipitación neta (Pn), se utilizaron cuatro canales de PVC, de 3 x 0,161m, colocados a 50cm del suelo, con inclinación leve (5%) y conectados en pares a dos pluviómetros TE525-L. Para la precipitación horizontal (Ph), dos captadores de neblina ubicados a 5m de altura y en sentido de la mayor probabilidad de vientos dominantes fueron conectados a sendos pluviómetros TE525-L, para su registro; uno fue un Standard Fog Collector (SFC) de malla tipo Raschel sin techo (Schemenauer y Cereceda 1994), y el otro cilíndrico de romanilla metálica Louvered Screen Fog Collector (LSFC) con techo (Juvik y Nullet 1995, sólo a partir de septiembre 2001). La lámina de escurrimiento (Le) se recogió en dos parcelas de escurrimiento de 3 x 10m (Ataroff y Sánchez 2000). Para las láminas de infiltración (Li) y flujos más profundos (Lp) se utilizaron 4 TDR Campbell CS615-L ubicados a 10, 30, 60 y 90cm de profundidad, insertados en

forma paralela a la pendiente del terreno y conectados al datalogger. Láminas relativas a eventos individuales se determinaron mediante el balance entre el contenido volumétrico de humedad en el suelo una vez ocurrido el evento (ϵ_e) y el contenido antecedente al evento (ϵ_i).

Las parcelas de escurrimiento, las canales para precipitación neta y el colector de neblina SFC corresponden a los instalados y descritos por Ataroff y Rada (2000). Todas las mediciones fueron registradas a intervalos de 10 minutos las aéreas y 15 minutos las subterráneas, entre abril de 2001 y febrero de 2002, con la excepción de la correspondiente al LSFC la cual operó entre agosto de 2001 y febrero de 2002.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se observaron importantes diferencias en cuanto a las respuestas del sistema a eventos de precipitación de diferente intensidad y duración, así como a las condiciones antecedentes de humedad en el suelo. En atención a ello, se establecieron cinco categorías de intensidad para precipitación vertical (Pv) 0-2, 2-5, 5-10, 10-20 y >20mm h⁻¹. Para el lapso de estudio, en la tabla 1 se resumen los montos totales medidos para precipitación vertical (Pv), horizontal (Ph) y neta (Pn), así como lámina de escurrimiento superficial (Le), de infiltración (Li) y de flujos a 30, 60 y 90cm (Lp30, Lp60 y Lp90), y también valores calculados de precipitación total (Pt=Pv+Ph) e intercepción (I=Pt-Pe), mientras la figura 2 muestra la relación entre la intensidad de las precipitaciones y la proporción de agua en cada flujo estudiado.

Los datos revelan proporciones similares a las reportadas por Ataroff y Rada (2000) para la misma localidad. El incremento en la proporción de agua que llega a la mayor profundidad (Lp90) pudiera deberse al aumento en precipitación neta

Tabla 1: Distribución de flujos hídricos durante el período abril 2001-febrero 2002, La Mucuy, Venezuela. Leyenda en el texto.

| | Pt | Pv | Ph | Pn | I | Le | Li | Lp30 | Lp60 | Lp90 |
|---------------------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|
| abr01-feb02 (mm) | 3018 | 2678 | 340 | 1552 | 1466 | 19 | 1313 | 1138 | 963 | 869 |
| % de Pt | 100 | 88,73 | 11,27 | 51,42 | 48,58 | 0,63 | 43,5 | 37,72 | 31,91 | 28,8 |

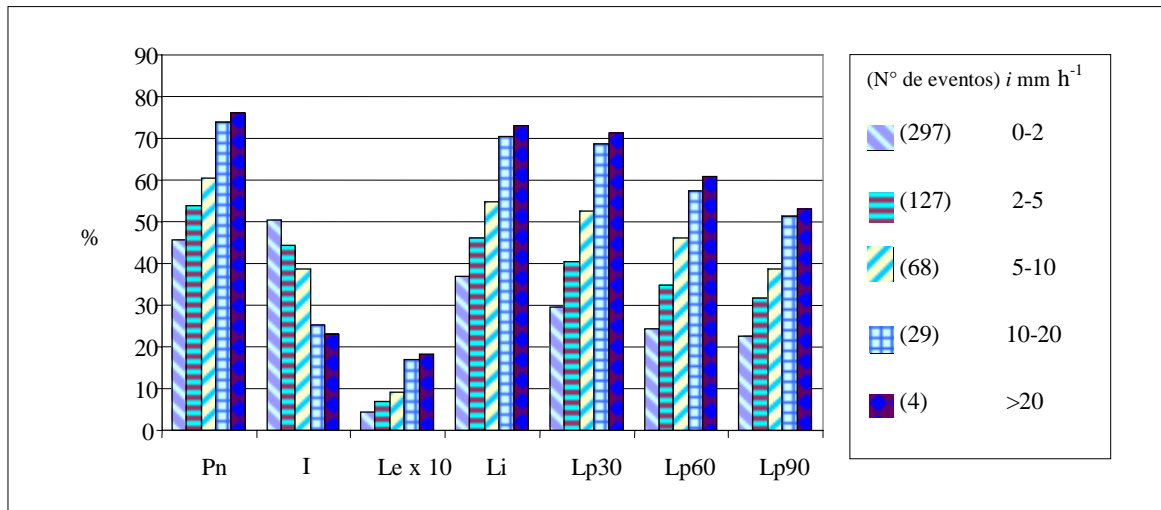


Figura 2: Distribución de flujos (% de Pt) en función a la categoría de intensidad de las precipitaciones, La Mucuy, Venezuela.

registrado en este caso en comparación con lo reportado por Ataroff y Rada (2000), 51 y 49%, respectivamente. Se nota que, la intercepción del dosel calculada en 48,6% de la precipitación total en todo el lapso, presentó una disminución en las proporciones a medida que aumentó la intensidad de los eventos de precipitación, con un máximo de 50,4% a i 0-2mm h⁻¹ y un mínimo de 23,2% a i >20mm h⁻¹ (figura 2), indicando una mayor retención proporcional de agua a intensidades bajas. Por el contrario, la proporción que percoló a 30, 60 y 90cm incrementó a medida que la intensidad de los eventos fue mayor, llegando a

ser >50% a 90cm para eventos con intensidades superiores a 10mm h⁻¹. Por su parte, la porción escurrida (Le) no superó el 2% ni para eventos con intensidades superiores a 20mm h⁻¹ lo que evidencia un efecto amortiguador y regulador del sistema.

Relacionando los flujos entre si, se obtuvo: Ph:Pv (0,13), Pe:Pt (0,51), Lp90:Pt (0,29), e I:Pt (0,46). La alta relación I:Pt (0,46) podría deberse a la complejidad estructural del dosel y la alta biomasa de epífitas (Veneklaas *et al.* 1990, Ataroff 1998, Walker y Ataroff 2002).

Tabla 2: Número de eventos de precipitación vertical (Pv) por cuadrante horario y por mes, para el período abril 2001-febrero 2002, La Mucuy, Venezuela.

| | Cuadrantes horarios | | | |
|-------------|---------------------|-------|-------|-------|
| | 0-6 | 6-12 | 12-18 | 18-24 |
| ABR 01 | 6 | 4 | 21 | 8 |
| MAY | 7 | 6 | 15 | 28 |
| JUN | 4 | 2 | 14 | 16 |
| JUL | 4 | 9 | 13 | 20 |
| AGO | 12 | 11 | 12 | 10 |
| SEP | 8 | 4 | 31 | 18 |
| OCT | 17 | 10 | 32 | 23 |
| NOV | 12 | 8 | 25 | 19 |
| DIC | 13 | 5 | 14 | 26 |
| ENE 02 | 3 | 0 | 5 | 9 |
| FEB | 2 | 1 | 7 | 10 |
| Eventos | 88 | 61 | 189 | 187 |
| % del total | 16,76 | 11,62 | 36,00 | 35,62 |

Aun ante la ocurrencia de eventos con intensidades superiores a 10mm h^{-1} , los % correspondientes a Lp60 y Lp90 parecen reflejar pérdidas por flujo sub superficial (figura 2) dado que las diferencias de 10 y 7% con relación al contenido volumétrico de humedad del suelo (θ) medido a Lp30, no coinciden con un posible escenario de baja demanda hídrica en condiciones de nubosidad, alta humedad relativa, y contenido superior al 98%.

Las mediciones continuas nos permiten una primera evaluación de la frecuencia de días con interceptación de neblina en contraste con los de Pv. El máximo de días continuos con lluvia fue de 29 (mayo 2001) y con neblina fue de 25 (diciembre 2001), pero fue sólo de 5 días continuos sin lluvia (febrero 2002) y 4 días sin neblina interceptada (enero 2002). El número total de días con lluvia fue 226 (67,87%) con un promedio por evento

de 5,10mm. La ocurrencia diaria de los eventos de Pv analizada por cuadrantes horarios mostró que más del 70% de los eventos ocurrieron en horas de la tarde y noche, con una variación importante a nivel mensual (tabla 2).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha recibido apoyo financiero de: la Red Interamericana de Cooperación Andes Sabanas (RICAS) financiada por el Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) a través del proyecto IAI-CRN-040 y el Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT) de la Universidad de Los Andes (proyecto código C-703-95). Agradecemos a INPARQUES por permitirnos realizar las medidas en el Parque Nacional Sierra Nevada, estado Mérida, Venezuela, así como a la familia Rodríguez propietarios de la finca Agropecuaria La Isla.

BIBLIOGRAFÍA

- Ataroff, M. 1998. Importance of cloud water in Venezuelan Andean cloud forest water dynamics. In: R.S. Schemenauer y H.A. Bridman (eds.) First International Conference on Fog and Fog Collection, ICRC, Ottawa, pp.25-28.
- Ataroff, M. 2002. Precipitación e Interceptación en ecosistemas boscosos de Los Andes venezolanos. *Ecotropicos* 15(2):194-203.
- Ataroff, M., F. Rada. 2000. Deforestation impact on water dynamics in a Venezuelan Andean cloud forest. *Ambio*. 29(7):440-444.
- Ataroff, M., L.A. Sánchez. 2000. Precipitación, interceptación y escorrentía en cuatro ambientes de la cuenca media del río El Valle, Estado Táchira, Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana* 41(1):11-30.
- Bruijnzeel, L.A. Tropical forests and environmental services: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems, and Environment*. (in press).
- Bruijnzeel, L.A. 1990. Hydrology of Moist Tropical Forests and Effects of Conversion: a State of Knowledge Review. IHP-UNESCO Humid Tropical Programme, Paris, 224.
- Bruijnzeel, L.A. 2001. Hydrology of tropical mountain cloud forests: A Reassessment. *Land Use and Water Resources Research* 1. 1-1-18.
- Bruijnzeel, L.A., L.S. Hamilton. 2000. Decision Time for Cloud Forests. IHP Humid Tropics Programme Series no. 13, IHP-UNESCO, Paris, IUCN-NL, Amsterdam and WWF International, Gland, 4.
- Bruijnzeel, L.A., J. Proctor. 1995. Hydrology and biogeochemistry of tropical montane cloud forests: what do we really know? In: L.S. Hamilton, J.O. Juvik y F.N. Scatena (eds.) *Tropical Montane Cloud Forests*. Ecological Studies 110, Springer Verlag, New York.
- Cavelier, J., G. Goldstein. 1989. Mist and fog interception in elfin cloud forest in Colombia and Venezuela. *Journal of Tropical Ecology* 5:309-322.
- Ewel, J., A. Madríz, J. Tosi. 1968. Zonas de Vida de Venezuela. Ministerio de Agricultura y Cría. MAC-FONAIAP, Caracas.
- Hamilton, L.S., J.O. Juvik, F.N. Scatena (eds.) 1995. *Tropical Montane Cloud Forests*. Ecological Studies 110, Springer Verlag, New York.
- Juvik, J.O., D. Nullet. 1995. Comments on a proposed standard fog collector for use in high elevation regions. *Journal of Applied Meteorology* 34:2108-2110.
- Kappelle, M. y A. Brown (eds.) 2001. *Bosques Nublados del Neotrópico*. INBIO, Costa Rica.
- Kovisar, L. 1972. Geología de la parte norte-central de los Andes Venezolanos. IV Congreso Geológico Venezolano. Memorias. Ministerio de minas e hidrocarburos. Boletín geológico. Publicación especial 1. II: 217-232.
- Lamprecht, H. 1954. Estudios Silviculturales en los Bosques del Valle de La Mucuy, cerca de Mérida. Ed. Fac. Ingeniería Forestal, Univ. Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Rodriguez-Iturbe, I., A. Porporato, F. Laio, F., L. Ridolfi. 2001. Plants in water controlled ecosystems: active role in

- hydrologic processes and response to water stress. I Scope and general outline. *Adv. Wat. Res.* 24: 695-705.
- Schemenauer, R.S., P. Cereceda. 1994. A proposed standard fog collector for use in high elevation regions. *Journal of Applied Meteorology* 33:1313-1322.
- Steinhardt, U. 1979. Untersuchungen über den Wasser und Nährstoffhaushalte eines andinen Wolkenwaldes in Venezuela. *Göttinger Bodenkundliche Berichte* 56:1-185.
- Van Dam, J.C. 1999. Impacts of climate change and climate variability on hydrological regimes. UNESCO International Hydrology Series, Cambridge University Press. 1-6, 21-34.
- Veneklaas, E.J., R.J. Zagt, A. Van Leerdam, R. Van Ek, A.J. Broekhoven, M. Van Genderen. 1990. Hydrological properties of the epiphyte mass of a montane rain forest. *Vegetatio* 89:183-192.
- Walker, R., M. Ataroff. 2002. Biomasa epifita y su contenido de nutrientes en una selva nublada andina, Venezuela. *Ecotropicos* 15(2):203-210.
- Weaver, P.L. 1972. Cloud moisture interception in the Luquillo Mountains of Puerto Rico. *Caribbean Journal of Science* 12:129-144.
- Zadroga, F. (1981). The hydrological importance of a montane cloud forest area of Costa Rica. Pp 59-73. *In* R. Lal y E.W. Russell (eds) *Tropical Agricultural Hydrology*. John Wiley & Sons, New York.